

凤阳山森林生态系统碳交换及其物候特征

纪小芳¹, 龚元², 郑翔¹, 姜姜¹, 鲁建兵¹, 刘胜龙³, 王丹³, 方万里³, 何雪凯³

1. 南京林业大学 林学院, 南京 210037

2. 南京林业大学 生物与环境学院, 南京 210037

3. 凤阳山-百山祖国家级自然保护区凤阳山管理处, 龙泉 323700

摘要: 凤阳山位于浙江省龙泉市南部, 为亚热带典型森林生态系统保护区, 受海洋性气候和季风的影响, 是研究森林生态系统碳预算及其物候特征的理想之地。采用位于浙江凤阳山的涡动相关通量观测系统 (EC) 观测的 2017 年 (除去 9 月) CO₂ 通量数据、气象数据并结合物候模型来分析本地尺度亚热带森林生态系统总初级生产力 (GPP)、生态系统呼吸 (Re) 动态特征、不同时间尺度下的影响因子及其物候特征, 结果表明: 该生态系统全年扮演着碳汇的角色, 净生态系统碳交换量 (NEE) (除去 9 月) 为 $-89 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (以碳计), GPP 总量为 $1377.75 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, Re 总量为 $1288 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, GPP 和 Re 的日变化和季节变化均呈单峰型, 先增加后降低。GPP 在不同的物候时期均为倒“U”型的变化趋势, 而 Re 在夜间的生态系统呼吸略高于白天, 且在日夜交替时刻会出现陡降现象。整个生态系统在 174 d GPP 增长率达到峰值 $0.25 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 达到最大恢复率; 202 d 的 GPP 增长率为 $0 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 228 d 的 GPP 增长率最低, 为 $-0.21 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 达到最大衰退率。不论是日尺度还是月尺度上, GPP 和 Re 变化的主要驱动因素为空气温度, 日尺度上 Re 较 GPP 对环境因子的变化更加敏感; 反之, 在月尺度上 GPP 对环境因子变化的响应比 Re 更加敏感。总体而言, 凤阳山森林生态系统全年表现为碳汇, 能够调节当地的二氧化碳浓度; 生长季森林生态系统生长旺盛, 稳定阶段的 GPP 与 Re 达到峰值; 在不同的时间跨度上生态系统对环境因子的响应存在差异。

关键词: 森林生态系统; 碳循环; 涡动协方差; 环境因子; 物候模型

Local-scale carbon exchange and phenological characteristics of forest ecosystem in Fengyang Mountain of Zhejiang, China using tower-based eddy covariance technique

Ji Xiaofang¹, Gong Yuan², Zheng Xiang¹, Jiang Jiang¹, Lu Jianbing¹, Liu Shenglong³, Wang Dan³, Fang Wanli³, He Xuekai³

1. College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

2. College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

3. Fengyang Mountain Administration of Zhejiang Fengyang Mountain-Baishanzu National Nature Reserve, Longquan 323700, China

收稿日期: 2019-09-17; 录用日期: 2019-12-30; 网络出版: 2020-01-08

Received Date: 2019-09-17; Accepted Date: 2019-12-30; Online first: 2020-01-08

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC0505502); 国家自然科学基金 (41701225); 江苏省自然科学基金 (BK20170920)

Foundation Item: National Key Research and Development Program of China (2017YFC0505502); National Natural Science Foundation of China (41701225); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20170920)

通信作者: 姜姜, E-mail: ecologyjiang@gmail.com

Corresponding Author: JIANG Jiang, E-mail: ecologyjiang@gmail.com

引用格式: 纪小芳, 龚元, 郑翔, 等. 2020. 凤阳山森林生态系统碳交换及其物候特征 [J]. 地球环境学报, 11(4): 376-389.

Citation: Ji X F, Gong Y, Zheng Xiang, et al. 2020. Local-scale carbon exchange and phenological characteristics of forest ecosystem in Fengyang Mountain of Zhejiang, China using tower-based eddy covariance technique [J]. *Journal of Earth Environment*, 11(4): 376-389.

Abstract: Background, aim, and scope Forest ecosystems are important carbon sinks for terrestrial ecosystems, the analysis of the dynamics and phenological characteristics of carbon exchange of forest ecosystems has important practical and theoretical significance for evaluating the carbon balance in terrestrial ecosystem. Since the 1990s, the research on CO₂ flux in forest ecosystems has become a hot spot with the development of eddy covariance (EC) systems. Thus, this study used EC systems and phenological models to analyze the carbon dynamic characteristics of a subtropical forest ecosystem in Zhejiang, China for better understanding the carbon cycle of terrestrial ecosystems. **Materials and methods** This study used the CO₂ flux data, meteorological data measured by the tower-based eddy covariance (EC) system in Fengyang Mountain of Zhejiang, China to analyze the dynamic characteristics of gross primary productivity (GPP), ecosystem respiration (Re), its environmental control factors and its phenological characteristics using the phenology model of a subtropical forest ecosystem among different time series at local scale. **Results** (1) The yearly net ecosystem carbon exchange (NEE), GPP, Re of this ecosystem in 2017 (excluding September) was $-89 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, $1377.75 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, $1288 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ respectively. This forest ecosystem played the role of carbon sink in 2017. (2) The growth rate of GPP in the forest ecosystem reached a peak recovery rate of $0.25 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ on 174 d of 2017, the growth rate of GPP reached a peak senescence rate of $-0.21 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ on 228 d of 2017. The GPP showed a tendency of inverted “U” shape in different phenological periods, while Re at nighttime was slightly higher than the daytime and there was a steep drop during the alternation of day and night. (3) The main environmental control factors of GPP and Re was the air temperature (T_a , °C) on daily or monthly scale, but Re was more sensitive to the change of other environmental control factors than GPP at the daily scale. Conversely, the response of GPP to the change of environmental control factors was more sensitive than Re at the monthly scale. **Discussion** Due to the lack of data for September in this study, the study may underestimate the annual carbon sink value. There should be a combination of analysis in several aspects, such as anthropogenic forest management, to propose some guiding forest management measures. It is generally accepted that forest ecosystems act as carbon sinks, but it is more important to explore how forests achieve these functions and how they are regulated by environmental factors. Although this paper got the different environmental factor and the GPP, Re, but its real regulation mechanism still needs to continue to explore. At the same time, different calculation methods may cause differences in research results. For example, the single-point method used in this paper may underestimate the carbon sink capacity of the forest in the study area, because the carbon storage term of the forest canopy is ignored. **Conclusions** The Fengyang Mountain forest ecosystem is characterized by carbon sinks throughout the year, which can regulate the local carbon dioxide concentration; the forest ecosystem grows vigorously during the growing season, and the GPP and Re peak in the stable stage; There are differences in the response of ecosystems to environmental factors over different time horizons. **Recommendations and perspectives** As the global CO₂ concentration increases year by year, people are paying more attention to the carbon sequestration function of forests. As one of the most important ecosystems of the earth, estimating the carbon sink value and carbon exchange characteristics of forest ecosystems will make important contributions to the future research of the global carbon cycle.

Key words: forest ecosystem; carbon cycle; eddy covariance; environmental control factors; phenology model

生态系统总初级生产力 (gross primary productivity, GPP) 是指植被在单位时间内通过光合作用所产生的总有机碳量, 又称总第一性生产

力 (方精云等, 2001), 在地球下垫面 - 大气碳交换过程中扮演重要角色 (Chapin et al, 2002), 代表植被固碳和其光合作用能力 (Kramer, 1981;

吴小翠, 2015)。森林是全球三大生态系统之一, 是陆地生态系统中最重要碳库, 其年均固碳量大约占陆地生态系统植被固碳量的 2/3 (Kramer, 1981), 在调节全球气候及陆地生态系统碳循环中发挥着关键性的作用 (Dixon et al, 1994)。在全球气候变化背景下, 量化不同森林生态系统碳交换动态特征, 分析其环境影响因子, 对全球温室效应以及更好地了解生物地球化学过程具有重要的实践和理论意义 (李慧, 2008)。其中正确地理解生态系统呼吸过程是能否准确评价生态系统碳收支平衡的前提和基础之一, 也是现今研究碳循环的一大重点 (朱先进等, 2013)。生态系统呼吸 (ecosystem respiration, R_e) 主要指土壤呼吸和植物地上部分的呼吸 (杨洁等, 2016), 是陆地生态系统向大气中释放 CO_2 的主要来源 (朱先进等, 2017)。

为了更好地观测陆地生态系统与大气间碳交换, 基于涡动相关系统 (eddy covariance, EC) 的植被与大气间碳交换的研究成为热点, 而目前关于生态系统碳交换的研究主要在于环境因子, 比如受到空气温度和土壤温度的影响 (张涛等, 2018), 但是受土壤水分影响的研究还存在争议。李军祥等 (2016)、姜海梅等 (2017)、姜海梅等 (2018) 提出半干旱区的草地生态系统呼吸主要受到土壤含水量的限制; 而张涛等 (2018) 同样对草地生态系统的研究却发现生态系统呼吸与土壤水分含量的相关性较低; 李军祥等 (2016) 和白炜等 (2019) 指出土壤水分和土壤温度同时调节生态系统呼吸, 且李军祥等 (2016) 提出在未来较干旱的生长季时间段内, 阶段性增温可能会抑制高寒草甸生态系统呼吸。温度 (闫敏等, 2016) 和降雨量影响陆地生态系统碳交换, 是空间异质性的主导因素 (Yu et al, 2013)。土地利用类型的变化也会严重影响生态系统的固碳能力 (Schimel et al, 2001)。草甸生态系统中饱和水汽压差 (VPD) (李辉东等, 2015)、光合有效辐射 (PAR) (何学兆等, 2011) 和叶面积指数 (LAI) (徐小军等, 2016) 对 GPP 有显著影响。阔叶生态系统的 GPP 存在温度适应现象 (石旭霞等, 2018)。生长季长度对 GPP 的影响受降雨量的限制 (王苗苗等, 2018)。GPP 具有较强的季节动态, 基本都呈现出单峰变化趋势, 且常绿落叶林森林生态系统 GPP 较其他林分大 (王鹤松等, 2010)。

而有研究指出降雨量与年 GPP 关系较弱, 大部分地区出现微弱的负相关 (闫敏等, 2016)。针对千烟洲 GPP 的研究发现, 太阳辐射变化会影响阴叶 (阴叶只能接受散射辐射, 且其光能利用率较高) 的光合作用最终导致冠层 GPP 的变化 (李登秋等, 2014)。对全球森林 GPP 数据进行收集研究, 发现森林 GPP 对降雨量、温度和叶面积指数变化的响应受到菌根组合类型的影响, 而在所研究的全部菌根组合类型中, 森林 GPP 均随温度的升高而显著增加 (石兆勇等, 2017)。但是很少有人进行全面的环境因子的分析并将生态系统碳交换与物候模型进行结合。能够系统、准确地分析 GPP、 R_e 的变化特征以及其对环境因子的响应对今后生态系统碳循环的研究至关重要。

凤阳山地区森林覆盖率达 90.8%, 1975 年即为省级自然保护区, 在 1992 年晋升为国家级自然保护区 (<http://www.longquan.gov.cn/>), 在 2009 年被评为中国最佳生态环境保护十大保护区之一, 保护区内生物多样性丰富, 具有很高的生态、经济和科研价值。目前关于凤阳山自然保护区的研究多集中于林分类型和土壤 (孟苗婧等, 2018a; 孟苗婧等, 2018b; 赵友朋等, 2018a, 2018b), 而关于该亚热带森林生态系统 GPP 和 R_e 的估算及其动态特征分析的研究尚未报道。因此, 本研究以浙江凤阳山自然保护区为研究区域, 基于本地尺度森林生态系统 CO_2 通量和微气象观测数据, 结合物候模型来分析 2017 年研究区 GPP、 R_e 动态特征及生态系统物候特征, 以及该生态系统碳循环过程与环境影响因子的关系。通过该研究可更加全面地了解该区域碳循环及生态环境状况, 为该区域的气候变化、森林保持水土, 涵养水源和生态环境的治理起到一定的理论支持和实践指导, 为之后其他同类型自然保护区森林生态系统评价和经济社会可持续发展规划提供更多的依据和参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

浙江凤阳山自然保护区 (119°06'—119°15'E, 27°46'—27°58'N) 位于浙江省龙泉市南部, 属洞宫山系, 由福建武夷山脉向东伸展而成, 保护区现有面积 153 km², 其中林地 4245.2 hm², 主要植被类型为针阔混交林, 森林覆盖率达

90.8%, 属亚热带湿润气候, 年均气温 12.3℃, 年降雨量 2400 mm (孟苗婧等, 2018a; 孟苗婧等, 2018b), 年蒸发量达到 1170 mm, 气候特征为温暖湿润, 雨量充沛, 雾多, 湿度大; 保护区内地形复杂, 沟壑交错, 最高峰为黄茅尖, 海拔 1929 m, 为江浙第一高峰。保护区内通量塔在 2016 年 10 月修建完成, 塔高 40 m, 下垫面为阳坡 24°。周围林地以木荷 (*Schima superba*)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 混交为主, 平均冠层高度约 15 m, 平均林龄约 40 年, 土壤类型主要为黄壤土。植物资源丰富, 天然分布的木本植物有杉木、木荷、柳杉 (*Cryptomeria fortunei* Hooibrenk)、黄檀 (*Dalbergia hupeana*)、光皮桦 (*Betula luminifera* H.)、马尾松 (*Pinus massoniana*)、黄山松 (*Pinus taiwanensis*)、多脉青冈 (*Cyclobalanopsis multinervis*)、福建柏 (*Fokienia hodginsii*)、黄山木兰 (*Magnolia cylindrica*)、柏木 (*Cupressus funebris*)、榧树 (*Torreya grandis* Fort)、红豆杉 (*Taxus chinensis*)、雷公鹅耳枥 (*Carpinus viminea*) 等。自然保护区内天然混交林的优势种群以木荷、浆果楸 (*Tilia endochrysea*)、多脉青冈和亮叶水青冈 (*Fagus lucida*) 为主, 形成多优势种结构特征。人工杉木林和人工柳杉林分布在海拔 1400—1500 m, 黄山松在海拔 600 m 和 1300 m 处均有分布, 木荷分布在海拔 300 m、900 m 和 1500 m 处, 多脉青冈和黄山木兰分布在海拔 1500 m 左右 (田月亮, 2012)。

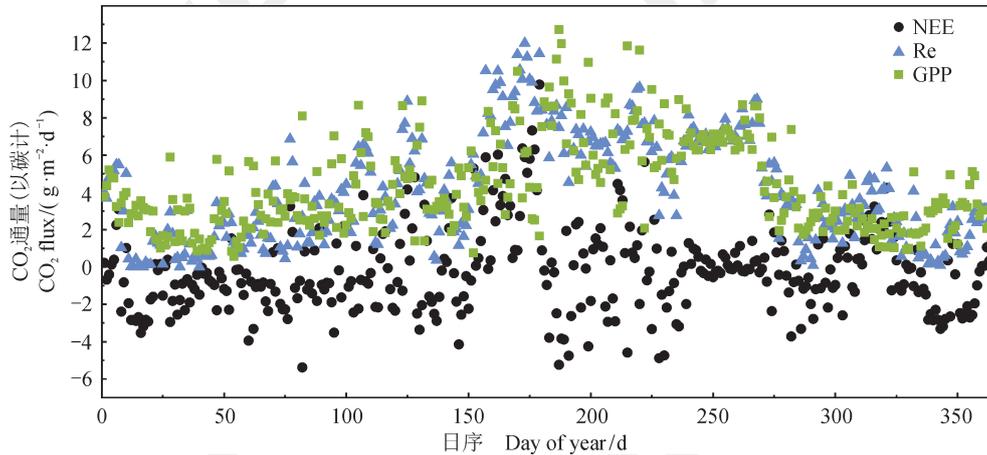
1.2 通量塔观测系统组成

研究区内搭建了距离地面高度为 40 m 的通量观测塔, 位于北纬 27°54'22"、东经 119°10'15", 安装在研究区中心位置。通量塔搭载有通量、梯度系统: (1) 通量观测系统的主要传感器有数据采集器 (CSI CR300, Campbell Scientific Inc., USA), 三维超声及 CO₂/H₂O 分析仪 (IRGASON, Campbell Scientific Inc., USA), 四分量辐射表 (CNR4, Campbell Scientific Inc., USA), 空气温湿度传感器 (HMP155A, Campbell Scientific Inc., USA), 土壤热通量板 (HFP01, Campbell Scientific Inc., USA)。(2) 配套的气象观测系统为 6 层梯度观测 (空间高度 2 m、8 m、16 m、24 m、32 m、40 m, 土壤深度 10 cm、20 cm、30 cm、40 cm、60 cm、90 cm), 梯度系统测量大气中不同高度的温度、

湿度、风速、风向以及不同深度土壤含水量和土壤温度, 适用于不同的下垫面和大气条件, 是边界层气象、农林气象、大气环境监测运用最普遍和最基本的观测手段。主要传感器有土壤温度传感器 (TCAV)、土壤水分传感器 (Campbell CS616, Campbell Scientific Inc., USA)、风向传感器 (MetOne 020C, Campbell Scientific Inc., USA)、数据采集器 (CSI CR300, Campbell Scientific Inc., USA)、6 层风速传感器 (MetOne 010C, Campbell Scientific Inc., USA)、HOBO 雨量传感器 (Onset RG3-M, Campbell Scientific Inc., USA) 和空气温湿度传感器 (HMP155A, Campbell Scientific Inc., USA)。研究人员每隔三个月去现场进行数据下载和维护仪器等工作。土壤水分数据来自于地下土壤 10 cm 处, 其余数据均来自于 40 m 高度处。2017 年 9 月份因天气原因仪器断电出现故障, 导致 9 月数据未完成记录, 因此本文采用的为 2017 年 1—8 月、10—12 月共 11 个月的通量和气象数据来进行分析。

1.3 CO₂ 通量数据质量控制

质量保证 (QA) 和质量控制 (QC) 流程对涡度协方差测量是极其重要的。通量塔所观测的原始数据频率为 10 Hz, 可通过在线程序 (EasyFluxTM-PC, Campbell Scientific Instruments, USA, <https://www.campbellsci.com/>) 处理得到 30 min 间隔的通量与气象数据, 该在线数据源代码来自 EddyPro (Li-COR, NE, USA, <https://www.licor.com/>) 软件 (纪小芳等, 2019), 主要的处理过程为: 野点去除、平面坐标拟合、WPL 校正、建立通量质量等级指标 (1—9) 等 (Webb et al, 1980; Wilczak et al, 2001)。之后对采集到的 30 min 时间序列的数据进行降雨及降雨前后 1 h 剔除; 剔除红外分析仪 CO₂ 信号强度低于 0.8 的数据, 质量等级指标为 “9” 的数据和摩擦速率低于 0.2 m·s⁻¹ 的数据 (Papale et al, 2006), 剔除之后, 2017 年的通量数据合格率达到 51% (剔除了全部 9 月份的数据), 一般通量数据合格率超过 50% 则具有代表性 (龚元等, 2017)。之后对数据进行插补, 主要采用平均日变化法 (MDV) 和查表法 (look-up table, LUT) (Falge et al, 2001)。插补后的生态系统通量值如图 1 所示。生态系统年 NEE 总量为 -77.34 g·m⁻²·a⁻¹, 表现为碳汇。



NEE 为净生态系统碳交换量, GPP 为生态系统总初级生产力, Re 为生态系统呼吸。下同。

NEE is the net ecosystem carbon exchange, GPP is gross primary productivity, Re is ecosystem respiration. The same below.

图 1 插补后的生态系统日通量值

Fig.1 Daily flux after gap-filling

1.4 GPP 和 Re 数据的拆分计算

对 CO₂ 通量观测数据进行质量控制之后, 对数据进行插补并对 NEE 进行拆分, 采用了 Reichstein et al (2005) 提出的基于夜间的净碳交换量拆分法 (night-time based flux-partitioning algorithm) 来获得生态系统呼吸 (Re) 和生态系统总初级生产力 (GPP), 具体方法分为三步:

(1) 根据所测得的凤阳山 2017 年插补后的数据求出温度敏感性 (E_0); (2) 用一个连续 7 天的滑动窗口来估算全年的参考温度 (R_{ref}) 的季节性变化, 如果无法找到 R_{ref} 的周期就采用线型内插法, 该步骤中使用的为原始未插补的 NEE 数据; (3) 利用前两步得到的 E_0 和 R_{ref} , 拟合出生态系统呼吸模型:

$$R_{eco} = R_{ref} e^{E_0(1/(T_{ref}-T_0)-1/(T-T_0))} \quad (1)$$

式中: T_0 为固定常数 -46.02°C (Lloyd and Taylor, 1994), 从而得到生态系统呼吸 Re, 然后根据下式求出生态系统初级生产力 (GPP):

$$Re = GPP + NEE \quad (2)$$

此时的 NEE 数据为插补完整的数据 (纪小芳等, 2019)。主要用到了 R 语言 “REddyProc” 安装包 (<https://CRAN.R-project.org/package=REddyProc/>)。之后将每 30 min 的 GPP 累积得到日 GPP。再将日 GPP 按月份累积得到月 GPP, 最后将月 GPP 进行累积得到年 GPP (Lloyd and Taylor, 1994; 于贵瑞等, 2004)。

1.5 CO₂ 通量物候特征的计算

为了便于整年 CO₂ 通量的连续计算以及推断

该生态系统的物候特征, 使用由 Gu et al (2009) 提出的物候模型 (phenology model) 进行分析。该模型基于生态系统 GPP 的植物群落冠层光合作用的物候模型, 对植物群落光合能力的季节变化进行量化 (CPC), 如公式 (3)、(4) 所示 (Gu et al, 2009)。该模型主要使用单年内连续单日每半小时最大 GPP ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) (以 CO₂ 计) 来表示植物群落 / 生态系统的物候特征。

$$A(t) = y_0 + \frac{a_1}{1 + \exp(-\frac{t-t_{01}}{b_1})} c_1 - \frac{a_2}{1 + \exp(-\frac{t-t_{02}}{b_2})} c_2 \quad (3)$$

$$k(t) = \frac{dA(t)}{dt} = \frac{a_1 c_1}{b_1} \times \frac{\exp(-\frac{t-t_{01}}{b_1})}{[1 + \exp(-\frac{t-t_{01}}{b_1})]^{1+c_1}} - \frac{a_2 c_2}{b_2} \times \frac{\exp(-\frac{t-t_{02}}{b_2})}{[1 + \exp(-\frac{t-t_{02}}{b_2})]^{1+c_2}} \quad (4)$$

在进行 GPP 增长率计算时将 9 月数据插补完整, 为了分析研究区的 GPP 动态特征和生态系统物候特征, 选取了每天最大的 GPP ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 代入物候模型进行运算。公式 (3) 中: $A(t)$ 为 GPP; t 为日序 (d); y_0 、 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 、 c_1 、 c_2 、 t_{01} 和 t_{02} 为待估计的经验参数, 公式 (4) 中: $k(t)$ 为 GPP 增长率函数, 将全年 (1—366 d) 的每天每半小时最大 GPP 代入公式 (3) 中计算出所需的拟合参数, 之后代入公式 (4) 中, 运行 $k(t)$ 函数, 便可计算出 GPP 增长率 (Gu et al, 2009)。该物候模型的主要计算结果包括恢复率峰值

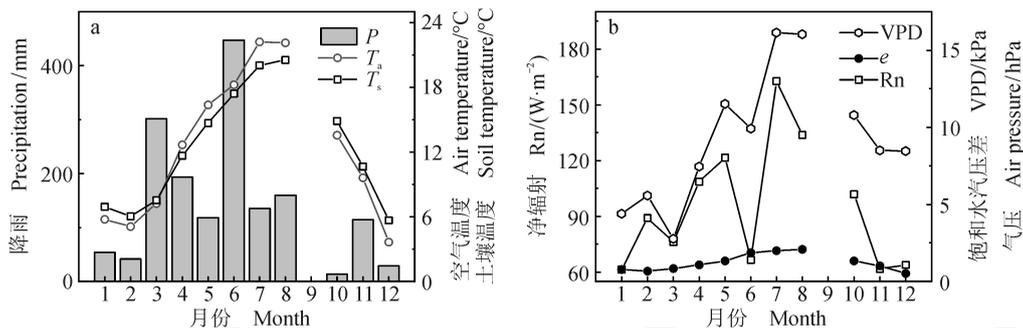
(peak recovery rate, k_{PRR})、衰落率峰值 (peak senescence rate, k_{PSR})、0 值以及生态系统不同物候阶段的计算等 (龚元等, 2019)。

2 结果与讨论

2.1 环境控制因子特征

依据气象观测系统记录的微气象数据, 统计出该生态系统不同环境因子的月变化特征, 具体为空气温度 (T_a)、土壤温度 (T_s)、饱和水汽压差 (VPD)、净辐射 (Rn)、降雨量 (P) 和气压 (e) (图 2)。由图 2 可知, 研究区降雨量在 6 月达到最大 (447.2 mm), 其次是 3 月 (301.6 mm), 最小降雨量发生在 10 月 (13.4 mm)。10 cm 土壤温度与空气温度的变化趋势基本一致, 均为先升高

后增大, 空气温度在 7 月份达到最大 (22.2℃), 其次为 8 月 (22.1℃), 12 月温度最低 (3.6℃); 土壤温度在 8 月达到最大 (20.5℃), 其次为 7 月 (20.1℃), 土壤温度最低值出现在 12 月 (5.7℃); Rn 和 VPD 在 3 月和 6 月均有一个急速下降过程, 主要是 3 月和 9 月降雨事件发生较多导致, 但是总体也呈现出先升后降的趋势, Rn 在 7 月达到最大值, 为 $162.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 其次为 8 月 ($133.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), 最小值出现在 1 月 ($61.4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$); VPD 最大值出现在 7 月 (16.1 kPa), 其次为 8 月 (16.0 kPa), 最小值出现在 3 月 (2.7 kPa); e 最大值出现在 8 月 (2.1 hPa), 其次为 7 月 (2.0 hPa), 最小值出现在 12 月 (0.5 hPa)。



Rn 为净辐射, VPD 饱和水汽压差。下同。

Rn is net radiation, and VPD is vapor pressure deficit. The same below.

图 2 生态系统月尺度环境因子特征

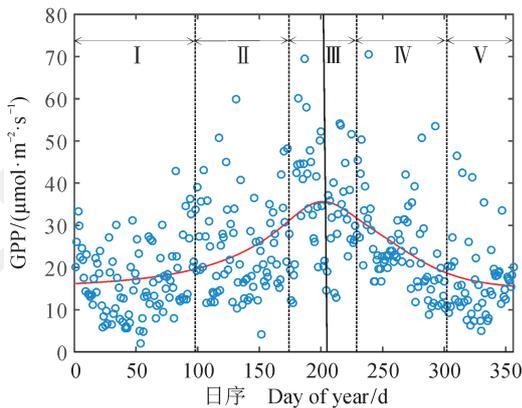
Fig.2 Characteristics of monthly environmental factors

2.2 生态系统的物候特征分析

为了更好地分析研究区内的物候, 使用物候模型 (Gu et al, 2009) 进行协助, 用插补后的凤阳山 2017 全年的数据经该物候模型拟合后 R^2 为 0.53, 且 $p < 0.01$, 模型拟合效果较好 (图 3)。依据该模型不同物候阶段的表征方法, 可根据公式 (3) 和公式 (4) 的计算结果推断该生态系统的物候特征 (Gu et al, 2009)。如图 3 所示, 根据斜率, 可以看出生态系统物候过程全年可分为五个阶段, 1—98 d 为前期阶段 (I), 为生长季开始前, 上升比较缓慢; 98—174 d 为恢复阶段 (II), 该阶段 GPP 增加迅速, 开始生长, 范围开始扩张; 174—229 d 为稳定阶段 (III), 主要是生长季中期相对比较稳定的阶段; 229—302 d 为衰老阶段 (IV), 此时的 GPP 开始降低, 并迅速下降, 植被开始衰老; 302—356 d 为终止阶段 (V),

该阶段生长季已经结束, 生态系统开始进入非生长季, 衰退迹象明显。该研究区自 98 d (4 月 8 日) 起进入恢复阶段, 而 302 d (10 月 28 日) 开始进入终止阶段, 与 Kim et al (2018) 研究结果略有不同, 其对马萨诸塞州西南部哈佛森林站点 (LTER) 的研究发现生长季为 5 月 10 日至 10 月 19 日, 主要是由于其研究区受西风带内风暴的影响很大, 东部滨海, 且受湾流的影响, 冬季不太冷时降雪不多, 冬季极冷时雪量也大, 冬季较长, 最终使其恢复阶段的开始时间较本文研究区晚。芬兰的松树林生态系统, 其生长季开始时间也较本研究区晚 (Gu et al, 2009), 主要原因可能是芬兰冬季严寒漫长, 夏季温和短暂, 年降雨量较低。但是, 田纳西混交林生态系统的生长季长度与起、终结果 (Gu et al, 2009) 与本研究较一致, 均从 4 月开始进入恢复期, 主要原因可能是当地

降雨量为 1300 mm，与本研究区相差较少，均为亚热带气候区，且受到季风影响。



蓝色点为 GPP，红色曲线为拟合后的 $A(t)$ 函数。
The blue point is GPP, and the red curve is $A(t)$ function after fitting.

图 3 生态系统全年每天最大 GPP 分布图及其物候特征
Fig.3 Daily maximum GPP distribution pattern and its phenological characteristics in 2017

从图 4 中可以看出，整个生态系统从 1 月 1 日到 6 月 24 日 GPP 增长率一直在增加，在 6 月 24 日 GPP 增长率达到峰值 $0.25 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，代表整个森林生态系统达到峰值恢复率 (k_{PRR})，随后下降，在 7 月 20 日 GPP 增长率降到 $0 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，代表在该时间段生态系统的光合作用达到最强。之后一直降低，并在 8 月 16 日 GPP 增长率达到最低，为 $-0.21 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，代表整个森林生态系统达到峰值衰退率 (k_{PSR})。该森林生态系统的峰值恢复率大于峰值衰老率，该特征与 Gu et al (2009) 对暖季植被的研究结果一致，光合恢复越快，其光合衰退也越快。6 月 24 日到 8 月 16 日是该研究区的光合作用最强且较稳定的时间（光合作用稳定期，stable phase），7 月 20 日是生长季的中点。

2.3 不同时间尺度 GPP 和 Re 动态变化特征

2.3.1 全年月和日尺度 GPP 与 Re 特征

从图 1 和图 5 可以看出：GPP 和 Re 的日变化和季节变化保持一致，先增加后降低，呈单峰型，月 GPP 峰值在 7 月，为 $232.03 \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{month}^{-1}$ （以碳计），其次为 8 月和 6 月，分别为 $208.77 \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{month}^{-1}$ 、 $161.26 \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{month}^{-1}$ ；日 GPP 最大值出现在 7 月 6 日，为 $12.72 \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ；月 GPP 最小值在 2 月，为 $59.44 \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{month}^{-1}$ ，其次为 11 月 $68.49 \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{month}^{-1}$ ；日 GPP 最小值

出现在 2 月 23 日，为 $0.57 \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。该结果与吴力博等 (2010) 对三江源的研究结果相似，均在 7 月达到最大值，但是高于三江源地区，三江源地区最大值为 $134.44 \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{month}^{-1}$ ，原因可能是三江源地区研究对象为人工草地，而本文是亚热带森林生态系统。凤阳山森林生态系统年 GPP 为 $1377.75 \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，除去 9 月份数据，与鼎湖山森林生态系统 $1460.1 \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和千烟洲森林生态系统 $1669.7 \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 相似 (何学兆等, 2011)。月 Re 在 6 月达到最大为 $264.51 \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{month}^{-1}$ ，日 Re 最大值出现在 6 月 23 日为 $12 \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ；月 Re 最小值在 2 月为 $35.99 \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{month}^{-1}$ ，日 Re 最小值出现在 1 月 13 日。由于 9 月数据的缺失，年 GPP 和 Re 总值分别为 $1377.75 \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $1288 \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ，NEE 为 $-89 \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。研究区降雨多集中在生长季，而 9 月已经为该区的非生长季，发生降雨事件的可能性较小，且凤阳山常绿植被较多，因此可能 9 月份数据的缺失会低估该生态系统的碳汇量，但是依然发挥着碳汇的功能。

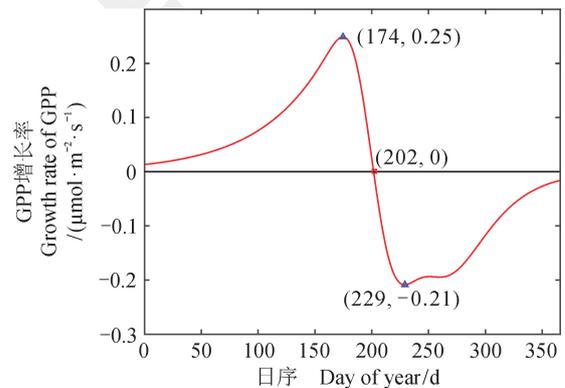


图 4 生态系统 GPP 增长率特征
Fig.4 GPP growth rate characteristics of the study area

2.3.2 不同物候阶段内 GPP 和 Re 的特征

对不同物候时期的 GPP 和 Re 每半小时通量值进行分析，得到图 6。从图 6 中可以看出：稳定阶段的 GPP 和 Re 均在五个物候时期中处于最大值，而 GPP 从大到小排列依次为稳定阶段、衰老阶段、恢复阶段、前期阶段和终止阶段，且不同物候时期的 GPP 均呈现倒“U”型变化趋势，主要原因是清晨随着温度和太阳辐射的增加，森林生态系统的光合作用强度开始增加，并在中午 10:00—13:30 达到最大值，其后随着辐

射减少, 温度降低, 光合作用强度开始降低, 森林生态系统的生产力降低, 导致 GPP 的下降; 而 Re 在不同物候时期略有不同, 从大到小依次排列为稳定阶段、恢复阶段、衰老阶段、前期阶段和终止阶段。从图 6b 中还可以看出: 07 : 30 和 17 : 30 生态系统呼吸值开始急速下降, 主要由于此时为日夜交替的时刻, 在夜间生态系统仅有呼吸, 07 : 30 太阳出来, 温度和太阳辐射开始增大, 生态系统开始吸收大气中的 CO₂, 导致生态系统呼吸急剧下降, 但是随着温度和太阳辐射越来越大, 生态系统呼吸也开始增加, 而到 17 : 30, 太阳下山, 温度和太阳辐射均较低, 生态系统呼吸也随之降低, 但随后进入夜间, 生态系统已不再吸收空气中的 CO₂, 因此生态系统呼吸再次增大, 最终导致日夜交替时陡降现象的发生。GPP 在前期阶段、恢复阶段、稳定阶段、衰老阶段、和终止阶段达到峰值的时间分别为 13 : 30、11 : 00、10 : 00、10 : 30、11 : 30, 其对应的最大值分别为 9.2 μmol·m⁻²·s⁻¹、13.8 μmol·m⁻²·s⁻¹、21.6 μmol·m⁻²·s⁻¹、23.6 μmol·m⁻²·s⁻¹、10.1 μmol·m⁻²·s⁻¹; Re 在前期阶段、恢复阶段、稳定阶段、衰老阶段、和终止阶段达到峰值的时间分别为 09 : 30、

17 : 00、00 : 30、17 : 00、16 : 00, 其对应的最大值分别为 3.9 μmol·m⁻²·s⁻¹、6.9 μmol·m⁻²·s⁻¹、9.2 μmol·m⁻²·s⁻¹、7.3 μmol·m⁻²·s⁻¹、5.7 μmol·m⁻²·s⁻¹。GPP 出现峰值的时间在中午 10 : 00 到 13 : 30, 而 Re 峰值出现的时间则主要集中于夜间, 且两者峰值大小均为先增大后减少趋势, 随着温度和太阳辐射的先升高后降低, 植被生长逐渐旺盛之后开始衰老, 同理生态系统呼吸也先增强后降低, 符合其物候变化规律。

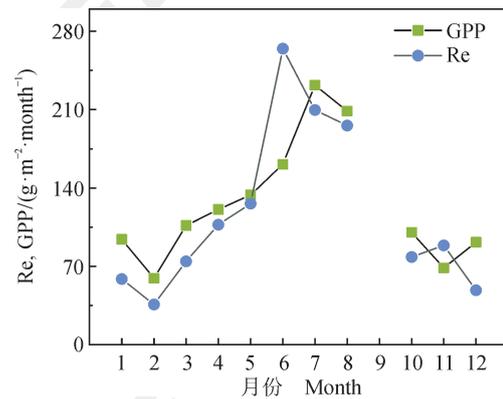


图5 生态系统 GPP、Re 在日和月尺度上的动态变化特征

Fig.5 Daily and seasonal patterns in the GPP and Re

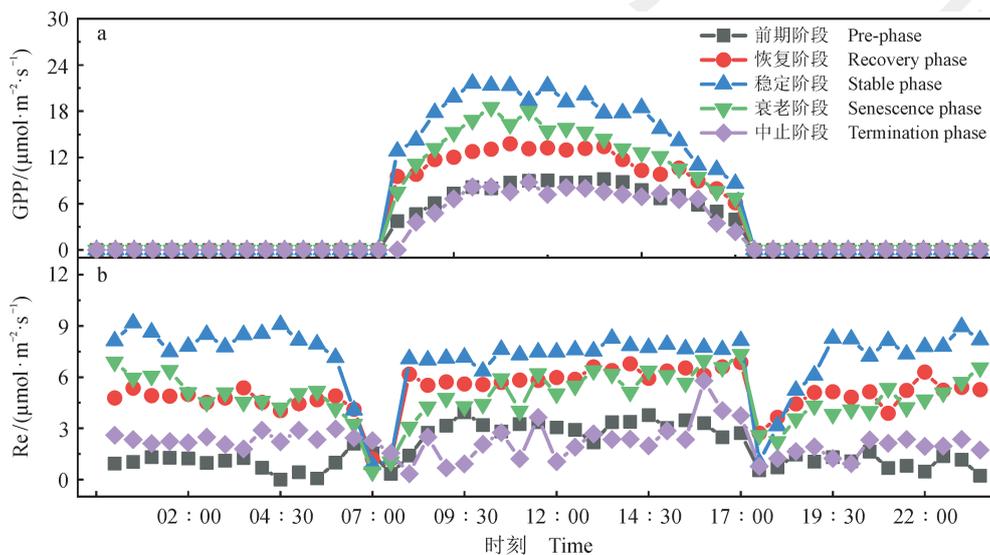


图6 生态系统 GPP 和 Re 不同物候阶段平均日变化

Fig.6 Mean daily variation of GPP and Re in different stages

生态系统不同物候阶段的 CO₂ 通量特征不同, 统计出不同物候阶段的 CO₂ 通量日累积均值, 如图 7 所示。从图 7 可以看出, GPP 和 Re 随物候的变化均为先增加后降低的趋势, 在稳定阶段, 两者

均达到最大值, 此时生态系统生长最为旺盛, 呼吸值已经略大于 GPP 值; 而在前期阶段和终止阶段, 两者均较低, 此时的 GPP 值较大, 虽然生态系统处于前期和终止阶段, 但是此时的生态系统依然在

吸收大气中的 CO_2 ，主要因为该森林生态系统中的常绿林在该阶段依然在进行光合作用，吸收空气中的 CO_2 ，同时生态系统呼吸也较低，导致该阶段的生态系统呈现为碳汇。基于图 5，该生态系统生长季 GPP、Re 的总量分别为 $1131.63 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $1173.89 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ，生态系统在生长季呈现出微弱的碳源效应，该结果与张一平等 (2006) 研究结论一致，原因可能为生长季降雨较多，有利于凋落物以及腐殖质的分解，而夜间森林生态系统的光合作用转变为呼吸作用，再次加大了生态系统的 CO_2 排放，其次两者都采用单点法得到 NEE，可能忽略了森林冠层的碳储存，最终导致对森林生态系统固碳量的低估 (姚玉刚等, 2011)，张雷明等 (2006) 的研究结果也与本文类似。生长季 GPP、Re 的总量分别占全年的 71.5% 和 78.0%，与王苗苗等 (2018) 对东北地区的检查结果相似，但是较其比例低，其生长季内的 GPP 占全年的 97.5%，主要原因可能是本研究区在 3 月发生大量的降雨事件 (图 2a)，从而导致该比值偏低，而东北地区生长季降雨较多，且降雨主要集中于生长季，从而导致其生长季固定的碳较多。周丽艳等 (2010) 对中国北方针叶林生态系统的研究发现，生长季生长旺盛，GPP 和 Re 均达到最大值，主要原因是生长季有较高的温度和光合有效辐射，该结论与本文研究结果一致。王广帅等 (2013) 对青藏高原高寒草甸的研究发现，非生长季排放的 CO_2 占全年的 13.3%，而本研究区该值略高 (占全年的 22%)，主要由于本研究区为森林生态系统，较草地生态系统植被更加丰富，且温度较高寒地区高，最终导致非生长季生态系统呼吸占全年呼吸值略高。

2.4 不同时间尺度 GPP、Re 与环境因子的关系

2.4.1 日尺度上 GPP、Re 与环境因子的关系

森林生态系统在不同物候阶段的 CO_2 通量差异显著，且由图 2 可知生态系统的环境因子有较强的时间差异性。为分析影响该生态系统碳交换的影响因素，将日 GPP、Re 累积值分别与环境因子——空气温度 (T_a)、饱和水汽压差 (VPD)、净辐射 (Rn)、气压 (e)、土壤温度 (T_s) (地下 10 cm 处) 与降雨量 (P) 进行相关性分析 (均采用二次函数进行拟合) (图 8)，发现除了降雨量与 GPP 显著相关 ($p < 0.05$)，其余环境因子均与 GPP 呈极显著相关 ($p < 0.001$)；而 Re 除

了与 Rn 关系不显著外，与其余因子均呈极显著相关；Re 随温度的增加而增加。该结论与解欢欢等 (2016) 对亚高山草地的研究结果一致——降雨会促进生态系统呼吸速率。空气温度与 GPP 相关性最高 ($R^2 = 0.51$)，呈二次函数关系，从 -5°C 到 2°C 范围内，GPP 随温度增加而降低，而当温度大于 0°C 时，GPP 随温度的增加而增加；饱和水汽压差与 GPP 同样呈二次函数关系，阈值出现在 -5 kPa 左右，之后随着饱和水汽压差的增大而增大；净辐射与 GPP 呈直线关系，GPP 随净辐射的增加而增加；气压与 GPP 呈二次函数关系，先降低，在 0.5 hPa 处达到最低值，随后开始呈上升趋势；土壤温度与空气温度对 GPP 的影响相似，但是土壤温度的阈值出现在 7°C ；而降雨量与 GPP 的关系呈微弱的负相关关系 ($R^2 = 0.0359$)。Re 与大气压的相关性最大 ($R^2 = 0.65$)，其次为空气温度 ($R^2 = 0.61$) 和土壤温度 ($R^2 = 0.56$)，其相关性均高于对应的 GPP 与环境因子的相关性，可以看出 Re 相对于 GPP 对环境因子的变化更加敏感；Re 与 Rn 的相关性最低 ($R^2 = 0.01$)，且不显著，但是仍然有缓慢上升的趋势。

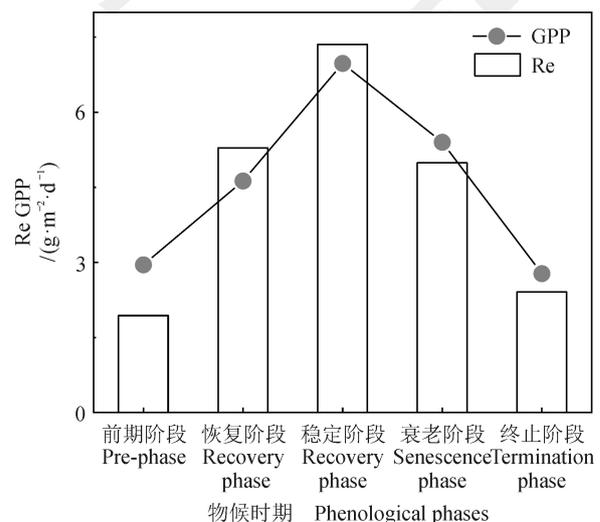


图 7 生态系统不同物候时期 GPP 和 Re 日均值特征
Fig.7 Daily mean of GPP and Re at different phenological periods

2.4.2 月尺度上 GPP、Re 与环境因子的关系

为进一步分析在月尺度上 GPP 和 Re 对环境的响应，对 GPP 和 Re 的月累积值与各个环境因子进行分析 (除降雨量采用幂函数进行拟合，其余均采

用二次函数进行拟合), 如图9所示。从图9可以看出, GPP和Re与各环境因子的相关性明显高于日时间尺度, 降雨量与GPP的关系不显著, 但是相关性依然高于日时间尺度, 因此推断该生态系统降雨量对GPP和Re的影响具有滞后性; Re与Rn的关系仍然不显著, 但是其相关性($R^2=0.29$)也大于日尺度。Re与降雨量和饱和水汽压差呈显著相关, 与空气温度、土壤温度和大气压均呈极显著相关。从图9还可以看出, Re均随着环境因子数值的增加呈现出上升的趋势, 同日尺度一样, Re受到大气压($R^2=0.85$)、空气温度($R^2=0.78$)和土壤温度($R^2=0.76$)的影响较大。该结果与张

涛等(2018)的结论一致——生态系统呼吸主要受到空气温度和土壤温度的影响。GPP与降雨量呈幂函数关系, 与其余因子均呈二次函数关系, 与降雨量无显著相关性, 与饱和水汽压差显著相关, 与其余因子均为极显著相关。空气温度可以解释92%的GPP变化, 其次为土壤温度、大气压、饱和水汽压差, 最后为净辐射。石兆勇等(2017)发现森林GPP均随着温度的升高而显著增加, Liu et al (2017)对中国亚热带成熟林的研究也发现在月尺度上GPP随空气温度的上升而显著增加, 本文研究结果与上述结论一致。在月尺度上, GPP对环境因子变化的响应比Re更加敏感。

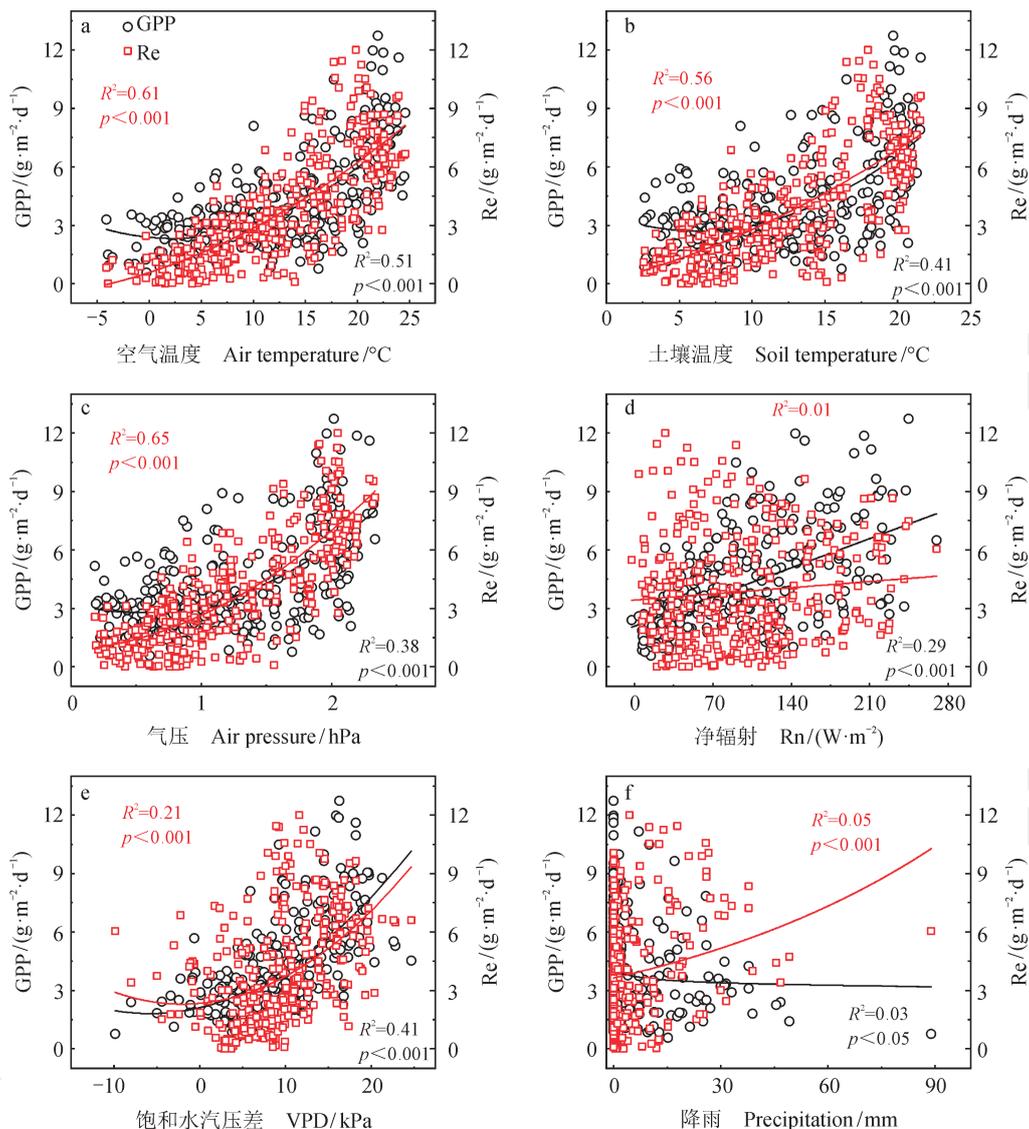


图8 生态系统日尺度上GPP、Re与环境因子的关系

Fig.8 The relationship between GPP, Re and environmental factors on a daily scale

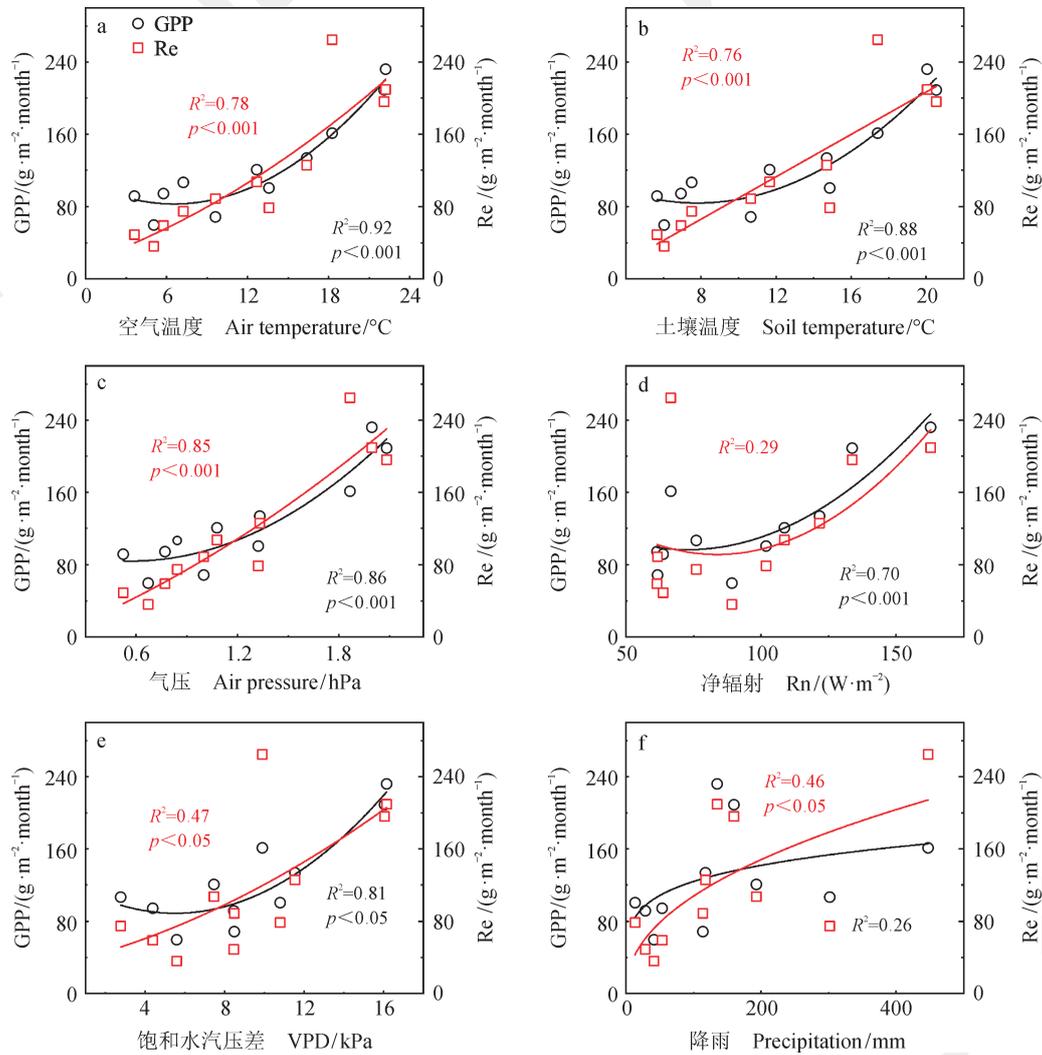


图 9 生态系统月尺度上 GPP、Re 与环境因子的关系

Fig.9 The relationship between GPP, Re and environmental factors on a monthly scale

3 结论

对浙江凤阳山森林生态系统碳交换 (GPP, Re) 分别在日和月尺度上与多个环境变量 (空气温度、土壤温度、降雨量、大气压、饱和水汽压差、净辐射) 的关系进行研究, 并结合物候模型进行分析, 得出主要结论如下:

(1) 该生态系统全年扮演着碳汇的角色。研究区 2017 年 (除去 9 月) 的 GPP 总量为 $1377.75 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 而全年 (除去 9 月) Re 总量为 $1288 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。GPP 和 Re 的日变化和季节变化一致, 均呈单峰型, 先增加后降低, 峰值分别在 7 月和 6 月。

(2) GPP 在不同的物候时期均呈倒“U”型的变化趋势, 而 Re 在夜间略高于白天, 且在日夜

交替时出现陡降现象。在稳定阶段, GPP 和 Re 总量均达到最大值, 在前期阶段和终止阶段, 两者均达到较低水平。整个生态系统在 174 d 时 GPP 增长率达到峰值, 为最大恢复率, 202 d 时 GPP 增长率为 $0 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 228 d 的 GPP 增长率最低, 为最大衰退率。

(3) 不论是日尺度还是月尺度上, GPP 和 Re 变化的主要驱动因素为空气温度。在日尺度上 Re 较 GPP 对环境因子的变化更加敏感; 而在月尺度上 GPP 对环境因子变化的响应比 Re 更加敏感。该生态系统降雨对 GPP 和 Re 的影响具有滞后性。GPP 和 Re 随着土壤温度、VPD、Rn、e 的增大而增大, 且与土壤温度、VPD、Rn、e 均显著相关。

参考文献

- 白 炜, 奚晶阳, 王根绪. 2019. 短期增温与施氮对青藏高原高寒沼泽草甸生态系统 CO₂ 排放的影响 [J]. *生态学报*, 38(4): 927–936. [Bai W, Xi J Y, Wang G X. 2019. Effects of short-term warming and nitrogen addition on CO₂ emission during growing season in an alpine swamp meadow ecosystem of Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 38(4): 927–936.]
- 方精云, 柯金虎, 唐志尧, 等. 2001. 生物生产力的“4P”概念、估算及其相互关系 [J]. *植物生态学报*, 25(4): 414–419. [Fang J Y, Ke J H, Tang Z Y, et al. 2001. Implications and estimations of four terrestrial productivity parameters [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 25(4): 414–419.]
- 龚 元, 郭智娟, 张凯迪, 等. 2019. 植被对亚热带城市生态系统 CO₂ 通量的影响 [J]. *生态学报*, 39(2): 530–541. [Gong Y, Guo Z J, Zhang K D, et al. 2019. Impact of vegetation on CO₂ flux of a subtropical urban ecosystem [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 39(2): 530–541.]
- 龚 元, 赵 敏, 郭智娟, 等. 2017. 复杂下垫面碳通量足迹分析——以上海市奉贤大学城为例 [J]. *上海师范大学学报 (自然科学版)*, 46(2): 284–291. [Gong Y, Zhao M, Guo Z J, et al. 2017. Footprint analysis on carbon flux of complex underlying surface—a case study of Shanghai Fengxian University Town [J]. *Journal of Shanghai Normal University (Natural Sciences)*, 46(2): 284–291.]
- 何学兆, 周 涛, 贾根锁, 等. 2011. 光合有效辐射总量及其散射辐射比例变化对森林 GPP 影响的模拟 [J]. *自然资源学报*, 26(4): 619–634. [He X Z, Zhou T, Jia G S, et al. 2011. Modeled effects of changes in the amount and diffuse fraction of PAR on forest GPP [J]. *Journal of Natural Resources*, 26(4): 619–634.]
- 纪小芳, 鲁建兵, 杨 军, 等. 2019. 凤阳山针阔混交林碳通量变化特征及其影响因子 [J]. *东北林业大学学报*, 47(3): 49–55. [Ji X F, Lu J B, Yang J, et al. 2019. Carbon flux variation characteristics and its influencing factors in coniferous and broad-leaved mixed forest in Fengyang Mountain [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 47(3): 49–55.]
- 姜海梅, 张德广, 王若静, 等. 2018. 不同生态系统呼吸模型在半干旱草原生长季碳循环研究中的比较及应用 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 54(3): 593–604. [Jiang H M, Zhang D G, Wang R J, et al. 2018. Comparison of different ecosystem respiration models and its application in carbon cycle research over semi-arid grassland during growing season [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 54(3): 593–604.]
- 姜海梅, 张德广, 叶昊天, 等. 2017. 锡林郭勒草原生态系统生长季呼吸与碳交换研究 [C]// 第 34 届中国气象学会年会 S12 提升气象科技水平, 保障农业减灾增效论文集. [Jiang H M, Zhang D G, Ye H T, et al. 2017. Respiratory and carbon exchange in the growing season of Xilin Gol grassland ecosystem [C]// 34th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society S12 Improve the level of meteorological science and technology, and ensure the collection of agricultural disaster reduction and efficiency effects.]
- 解欢欢, 马文璞, 赵传燕, 等. 2016. 祁连山亚高山草地土壤呼吸和生态系统呼吸对降雨的响应 [J]. *生态学报*, 35(11): 2875–2882. [Xie H H, Ma W Y, Zhao C Y, et al. 2016. Rainfall effect on soil respiration and ecosystem respiration of a subalpine meadow in Qilian Mountains [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 35(11): 2875–2882.]
- 李登秋, 周艳莲, 居为民, 等. 2014. 太阳辐射变化对亚热带人工常绿针叶林总初级生产力影响的模拟分析 [J]. *植物生态学报*, 38(3): 219–230. [Li D Q, Zhou Y L, Ju W M, et al. 2014. Modelling the effects of changes in solar radiation on gross primary production in subtropical evergreen needle-leaf plantations [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38(3): 219–230.]
- 李辉东, 关德新, 袁凤辉, 等. 2015. 科尔沁草甸生态系统水分利用效率及影响因素 [J]. *生态学报*, 35(2): 478–488. [Li H D, Guan D X, Yuan F H, et al. 2015. Water use efficiency and its influential factor over Horqin meadow [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 35(2): 478–488.]
- 李 慧. 2008. 福建省森林生态系统 NPP 和 NEP 时空模拟研究 [D]. 福州: 福建师范大学. [Li H. 2008. On the spation-temporal simulation of forest ecosystem net primary productivity and net ecosystem productivity in Fujian Province [D]. Fuzhou: Fujian Normal University.]
- 李军祥, 曾 辉, 朱军涛, 等. 2016. 藏北高原高寒草甸生态系统呼吸对增温的响应 [J]. *生态环境学报*, 25(10): 1612–1620. [Li J X, Zeng H, Zhu J T, et al. 2016. Responses of different experimental warming on ecosystem respiration in Tibetan alpine meadow [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 25(10): 1612–1620.]
- 孟苗婧, 郭晓平, 张金池, 等. 2018a. 海拔变化对凤阳山针阔混交林地土壤微生物群落的影响 [J]. *生态学报*, 38(19): 7057–7065. [Meng M J, Guo X P, Zhang J C, et al. 2018a. Effects of altitude on soil microbial community in Fengyang Mountain coniferous and broad-leaved forest [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 38(19): 7057–7065.]
- 孟苗婧, 张金池, 郭晓平, 等. 2018b. 海拔变化对黄山松阔

- 叶混交林土壤有机碳组分的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 42(6): 106–112. [Meng M J, Zhang J C, Guo X P, et al. 2018b. Effects of altitude change on soil organic carbon fractions in *Pinus taiwanensis* and broad-leaved mixed forest [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 42(6): 106–112.]
- 石旭霞, 侯继华, 王冰雪, 等. 2018. 长白山阔叶红松林生态系统生产力与温度的关系[J]. *北京林业大学学报*, 40(11): 49–57. [Shi X X, Hou J H, Wang B X, et al. 2018. Relationship between primary productivity and temperature in broadleaved *Pinus koraiensis* mixed forest in Changbai Mountains of northeastern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 40(11): 49–57.]
- 石兆勇, 张晓龙, 肖莉, 等. 2017. 菌根组合类型对森林总初级生产力应对温度和降水变化的影响[J]. *生态环境学报*, 26(3): 379–385. [Shi Z Y, Zhang X L, Xiao L, et al. 2017. Responses of gross primary production to changes of temperature and precipitation in different forests dominated by different mycorrhizal strategies [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 26(3): 379–385.]
- 田月亮. 2012. 凤阳山主要林分类型结构特征及其改土效应[D]. 南京: 南京林业大学. [Tian Y L. 2012. The structural properties of main forest stand and their effect of soil improvement in Fengyang Mountain [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University.]
- 王广帅, 杨晓霞, 任飞, 等. 2013. 青藏高原高寒草甸非生长季温室气体排放特征及其年度贡献[J]. *生态学杂志*, 32(8): 1994–2001. [Wang G S, Yang X X, Ren F, et al. 2013. Non-growth season's greenhouse gases emission and its yearly contribution from alpine meadow on Tibetan Plateau of China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 32(8): 1994–2001.]
- 王鹤松, 贾根锁, 冯锦明, 等. 2010. 我国北方地区植被总初级生产力的空间分布与季节变化[J]. *大气科学*, 34(5): 882–890. [Wang H S, Jia G S, Feng J M, et al. 2010. Spatial distribution and seasonality of gross primary production in northern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 34(5): 882–890.]
- 王苗苗, 周蕾, 王绍强, 等. 2018. 东北地区生长季长度变化及其对总初级生产力的影响分析[J]. *地理科学*, 38(2): 284–292. [Wang M M, Zhou L, Wang S Q, et al. 2018. Change of growing season length and its effects on gross primary productivity in northeast China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 38(2): 284–292.]
- 吴力博, 古松, 赵亮, 等. 2010. 三江源地区人工草地的生态系统 CO₂ 净交换、总初级生产力及其影响因子[J]. *植物生态学报*, 34(7): 770–780. [Wu L B, Gu S, Zhao L, et al. 2010. Variation in net CO₂ exchange, gross primary production and its affecting factors in the planted pasture ecosystem in Sanjiangyuan Region of the Qinghai-Tibetan Plateau of China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34(7): 770–780.]
- 吴小翠. 2015. 中国地区辐射变化对陆地生态系统总初级生产力的影响[D]. 南京: 南京大学. [Wu X C. 2015. Impacts of changes in solar radiation on terrestrial gross primary productivity in China [D]. Nanjing: Nanjing University.]
- 徐小军, 周国模, 杜华强, 等. 2016. 毛竹林总初级生产力年际变化及其驱动因素——以安吉县为例[J]. *生态学报*, 36(6): 1636–1644. [Xu X J, Zhou G M, Du H Q, et al. 2016. Interannual variability of moso bamboo forest GPP and its driving factors: a case study of Anji County [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 36(6): 1636–1644.]
- 闫敏, 李增元, 田昕, 等. 2016. 黑河上游植被总初级生产力遥感估算及其对气候变化的响应[J]. *植物生态学报*, 40(1): 1–12. [Yan M, Li Z Y, Tian X, et al. 2016. Remote sensing estimation of gross primary productivity and its response to climate change in the upstream of Heihe River Basin [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40(1): 1–12.]
- 杨洁, 刘冉, 马杰, 等. 2016. 古尔班通古特沙漠南缘梭梭(*Haloxylon ammodendron*)群落土壤呼吸对生态系统呼吸的贡献[J]. *中国沙漠*, 36(3): 726–733. [Yang J, Liu R, Ma J, et al. 2016. The contribution of soil respiration to ecosystem respiration of *Haloxylon ammodendron* community in the south of Gurbantunggut Desert [J]. *Journal of Desert Research*, 36(3): 726–733.]
- 姚玉刚, 张一平, 于贵瑞, 等. 2011. 热带森林植被冠层 CO₂ 储存项的估算方法研究[J]. *北京林业大学学报*, 33(1): 23–29. [Yao Y G, Zhang Y P, Yu G R, et al. 2011. Estimation of CO₂ storage flux between forest and atmosphere in a tropical forest [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 33(1): 23–29.]
- 于贵瑞, 温学发, 李庆康, 等. 2004. 中国亚热带和温带典型森林生态系统呼吸的季节模式及环境响应特征[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 34(S2): 84–94. [Yu G R, Wen X F, Li Q K, et al. 2004. Seasonal patterns and environmental response characteristics of typical forest ecosystems in subtropical and temperate zones of China [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 34(S2): 84–94.]
- 张雷明, 于贵瑞, 孙晓敏, 等. 2006. 中国东部森林样带典型生态系统碳收支的季节变化[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 36(S1): 45–59. [Zhang L M, Yu G R, Sun X M, et al. 2006. Seasonal variation of carbon budget in a typical

- ecosystem of forest strips in eastern China [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 36(S1): 45–59.]
- 张涛, 王根绪, 杨燕, 等. 2018. 青藏高原多年冻土区不同草地类型生态系统呼吸季节差异性 [J]. *冰川冻土*, 40(6): 1255–1264. [Zhang T, Wang G X, Yang Y, et al. 2018. The seasonal variation of ecosystem respiration in different vegetation types in the permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 40(6): 1255–1264.]
- 张一平, 沙丽清, 于贵瑞, 等. 2006. 热带季节雨林碳通量年变化特征及影响因子初探 [J]. *中国科学 (D辑: 地球科学)*, 36(S1): 139–152. [Zhang Y P, Sha L Q, Yu G R, et al. 2006. Preliminary study on annual variation characteristics and influence factors of carbon flux in tropical seasonal rain forest [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 36(S1): 139–152.]
- 赵友朋, 孟苗婧, 张金池, 等. 2018a. 不同林地类型土壤团聚体稳定性与铁铝氧化物的关系 [J]. *水土保持通报*, 38(4): 75–81, 86. [Zhao Y P, Meng M J, Zhang J C, et al. 2018a. Relationship between soil aggregate stability and different forms of Fe and Al oxides in different forest types [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 38(4): 75–81, 86.]
- 赵友朋, 孟苗婧, 张金池, 等. 2018b. 凤阳山主要林分类型土壤团聚体及其稳定性研究 [J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 42(5): 84–90. [Zhao Y P, Meng M J, Zhang J C, et al. 2018b. Study on the composition and stability of soil aggregates of the main forest stands in Fengyang Mountain, Zhejiang Province [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 42(5): 84–90.]
- 周丽艳, 贾丙瑞, 周广胜, 等. 2010. 中国北方针叶林生长季碳交换及其调控机制 [J]. *应用生态学报*, 21(10): 2449–2456. [Zhou L Y, Jia B R, Zhou G S, et al. 2010. Carbon exchange of Chinese boreal forest during its growth season and related regulation mechanisms [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 21(10): 2449–2456.]
- 朱先进, 于贵瑞, 王秋凤, 等. 2013. 典型森林和草地生态系统呼吸各组分间的相互关系 [J]. *生态学报*, 33(21): 6925–6934. [Zhu X J, Yu G R, Wang Q F, et al. 2013. The interaction between components of ecosystem respiration in typical forest and grassland ecosystems [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 33(21): 6925–6934.]
- 朱先进, 张函奇, 殷红. 2017. 增温影响陆地生态系统呼吸的研究进展 [J]. *沈阳农业大学学报*, 48(5): 513–521. [Zhu X J, Zhang H Q, Yin H. 2017. Advances in warming effect on ecosystem respiration in terrestrial ecosystems [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 48(5): 513–521.]
- Chapin F S, Matson P A, Mooney H A. 2002. Principles of terrestrial ecosystem ecology [M]. New York, NY: Springer.
- Dixon R K, Solomon A M, Brown S, et al. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems [J]. *Science*, 263(5144): 185–190.
- Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. 2001. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange [J]. *Agricultural Forest Meteorology*, 107(1): 43–69.
- Gu L H, Post W M, Baldocchi D D, et al. 2009. Characterizing the seasonal dynamics of plant community photosynthesis across a range of vegetation types [M]// Noormets A. Phenology of ecosystem processes. New York, NY: Springer: 35–58.
- Kim J, Hwang T, Schaaf C L, et al. 2018. Seasonal variation of source contributions to eddy-covariance CO₂ measurements in a mixed hardwood-conifer forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 253/254: 71–83.
- Kramer P J. 1981. Carbon dioxide concentration, photosynthesis, and dry matter production [J]. *BioScience*, 31(1): 29–33.
- Liu X D, Chen X Z, Li R H, et al. 2017. Water-use efficiency of an old-growth forest in lower subtropical China [J]. *Scientific Reports*, 7: 42761. DOI: 10.1038/srep42761.
- Lloyd J, Taylor J A. 1994. On the temperature dependence of soil respiration [J]. *Functional Ecology*, 8(3): 315–323.
- Papale D, Reichstein M, Aubinet M, et al. 2006. Towards a standardized processing of net ecosystem exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation [J]. *Biogeosciences*, 3(4): 571–583.
- Reichstein M, Falge E, Baldocchi D, et al. 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm [J]. *Global Change Biology*, 11(9): 1424–1439.
- Schimel D S, House J I, Hibbard K A, et al. 2001. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems [J]. *Nature*, 414(6860): 169–172.
- Webb E K, Pearman G I, Leuning R. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 106(447): 85–100.
- Wilczak J M, Oncley P S, Stage S A. 2001. Sonic anemometer tilt correction algorithms [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 99: 127–150.
- Yu G R, Zhu X J, Fu Y L, et al. 2013. Spatial patterns and climate drivers of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China [J]. *Global Change Biology*, 19(3): 798–810.