

DOI: 10.20103/j.stxb.202310252322

王靖钰, 李国栋, 任晓娟, 张曼, 李鹏飞, 孙雪健, 赵晴涛, 王龙升, 龚云飞. 南北过渡带常绿落叶阔叶混交林碳通量特征及其对环境因子的响应. 生态学报, 2024, 44(14): 6243-6253.

Wang J Y, Li G D, Ren X J, Zhang M, Li P F, Sun X J, Zhao Q T, Wang L S, Gong Y F. Carbon flux characteristics and responses to environmental factors in the evergreen-deciduous broadleaf mixed forest of the north-south transitional zone. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(14): 6243-6253.

南北过渡带常绿落叶阔叶混交林碳通量特征及其对环境因子的响应

王靖钰^{1,2}, 李国栋^{1,2,3,*}, 任晓娟^{1,2}, 张曼^{1,2}, 李鹏飞^{1,2}, 孙雪健^{1,2}, 赵晴涛^{1,2}, 王龙升^{1,2}, 龚云飞^{1,2}

1 河南大别山森林生态系统国家野外科学观测研究站(河南大学), 郑州 450046

2 河南大学地理与环境学院/黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 开封 475004

3 信阳生态研究院, 信阳 464000

摘要: 森林生态系统强大的碳源/汇功能是实现“碳中和”和“碳达峰”战略目标最经济、有效的自然气候解决方案和固碳增汇手段。准确评估森林生态系统的碳汇能力, 对于明确森林碳储量有重要意义。为明确亚热带-暖温带气候过渡带的常绿落叶阔叶混交林的碳通量特征及其驱动因素, 2011—2020 年利用涡度相关法开展了大别山常绿落叶阔叶混交林碳通量和环境要素的观测试验。结果表明: 大别山常绿落叶阔叶混交林净生态系统 CO_2 交换量、生态系统呼吸 (Reco)、总初级生态生产力分别为 $-788.13 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $1074.14 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $1862.27 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 该森林生态系统整体表现为碳汇, 其固碳能力与相近纬度的常绿落叶阔叶混交林基本持平, 并高于针阔叶混交林、毛竹林等其他类型的森林生态系统。10 年间, 大别山常绿落叶阔叶混交林的固碳能力有所增强。影响大别山常绿落叶阔叶混交林碳通量的主要环境因子为温度与太阳辐射, 气温 (T_a)、净辐射 (R_n)、光合有效辐射和总辐射与生态系统碳生产力和 GPP 呈显著正相关 ($P < 0.001$), Reco 与 T_a 和 R_n 呈显著正相关 ($P < 0.001$)。研究结果为气候变化响应敏感的南北气候过渡带森林生态系统的碳储量估算、碳循环过程模拟提供观测数据支持和科学依据。

关键词: 碳通量; 碳汇效应; 涡度相关法; 常绿落叶阔叶混交林; 大别山

Carbon flux characteristics and responses to environmental factors in the evergreen-deciduous broadleaf mixed forest of the north-south transitional zone

WANG Jingyu^{1,2}, LI Guodong^{1,2,3,*}, REN Xiaojuan^{1,2}, ZHANG Man^{1,2}, LI Pengfei^{1,2}, SUN Xuejian^{1,2}, ZHAO Qingtao^{1,2}, WANG Longsheng^{1,2}, GONG Yunfei^{1,2}

1 Henan Dabieshan National Field Observation and Research Station of Forest Ecosystem (Henan University), Zhengzhou 450046, China

2 College of Geography and Environmental Science, Henan University/Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions, Ministry of Education, Kaifeng 475004, China

3 Xinyang Academy of Ecological Research, Xinyang 464000, China

Abstract: The robust carbon source/sink function of forest ecosystems is identified as the most economical and effective natural climate solution for achieving the strategic objectives of carbon neutrality and carbon peaking. Accurately assessing the carbon sequestration capability of forest ecosystems is crucial for determining forest carbon storage. In order to clarify the carbon flux characteristics and their driving factors in the evergreen-deciduous broadleaf mixed forest in the North-South

基金项目: 国家自然科学基金 (42171112); 河南省科技攻关项目 (222102320322); 信阳生态研究院开放基金 (2023DBS04)

收稿日期: 2023-10-25; **网络出版日期:** 2024-05-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liguodong@henu.edu.cn

climate transition zone, observations of carbon flux and environmental factors were conducted in the Dabie Mountains' evergreen-deciduous broadleaf mixed forest using eddy covariance method from 2011 to 2020. The results revealed that the net ecosystem exchange (NEE), ecosystem respiration (Reco), and gross primary productivity (GPP) of this forest were $-788.13 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, $1074.14 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, and $1862.27 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, respectively. This forest ecosystem was overall a carbon sink, with its carbon sequestration capacity being comparable to similar latitude evergreen-deciduous broadleaf mixed forests and higher than other types of forest ecosystems like the mixed coniferous-broadleaf forests and bamboo forests. Over a decade, the carbon sequestration capacity of the Dabie Mountains' evergreen-deciduous broadleaf mixed forest has increased. The carbon flux in this forest was significantly influenced by temperature and solar radiation. Air temperature (T_a), net radiation (R_n), Photosynthetically Active Radiation (PAR), and total radiation (R_g) showed significantly positive correlation with the ecosystem's Net Ecosystem Productivity (NEP) and GPP ($P < 0.001$); Reco showed significantly positive correlation with T_a and R_n ($P < 0.001$). The findings provide observational data support and scientific basis for the estimation of carbon storage and simulation of carbon cycling processes in forest ecosystems of the north-south climatic transitional zone, which are sensitive to climate change.

Key Words: carbon flux; carbon sink effect; eddy covariance method; evergreen-deciduous broadleaf mixed forest; Dabie Mountains

工业革命以来,化石燃料的使用导致大气中 CO_2 的浓度大幅增加。从 1750 到 2018 年间,全球大气 CO_2 浓度约增加了 47%^[1], CO_2 浓度的升高使得以全球变暖为主的气候变化态势日趋紧迫^[2]。陆地生态系统是大气中 CO_2 的主要源/汇,中国承诺在 2030 年前温室气体排放实现碳达峰、2060 年前实现碳中和已成为长期发展目标,增强陆地生态系统碳汇功能是实现碳达峰、碳中和的重要手段^[3]。森林生态系统作为陆地生态系统中最大的有机碳库,在减轻自然环境压力、减弱温室效应的影响以及全球碳循环中发挥着重要作用,其微小变化可能导致全球气候发生显著变化^[4-6]。因此,分析森林生态系统碳交换的动态和物候特征,量化森林生态系统碳收支情况,对于保护生态系统生物多样性,减缓和治理全球气候变化具有重要意义^[7],也是解决全球气候问题的关键^[8]。

森林储存的碳是大气中的 3 倍,并且对全球气候变化敏感。气候变化可能通过增加超过总初级生态生产力(GPP)的热最佳温度的频率来改变生态系统的 GPP^[9],气候变暖将降低生态系统固碳的能力^[10]。太阳辐射通过为植物的生长发育提供光合作用中的直接能量,影响森林固碳能力^[2]。北方森林的 GPP 和生态系统呼吸(Reco)一般受温度和辐射限制,因此,气温异常是影响北方森林 CO_2 年际交换变率的重要因素^[11]。Shiri 等^[12]使用随机森林模型在局部和外部(空间)尺度上对北半球森林生态系统进行了建模研究,以模拟 CO_2 通量组分,结果表明温度相关参数(如空气和土壤温度、蒸气压不足)在决定生态系统的通量组分方面起着关键作用。在墨西哥热带干旱森林的通量观测研究中发现土壤含水量和净辐射之间的反馈是控制热带干旱森林生态系统通量的主要环境变量^[13]。由此可见,在全球气候变化背景下,森林生态系统碳循环对环境因子的响应是当下热点问题之一。

涡度相关法作为监测陆地生态系统碳-水通量的主要方法,在农田、森林、荒漠及草地等生态系统的通量观测研究中得到广泛应用。目前,由欧洲通量网、美洲通量网和亚洲通量观测网等组成的国际通量观测研究网络(FLUXNET)正逐步完善。中国通量观测研究网络(ChinaFLUX)已有超过 50 个通量观测站点,形成了我国陆地生态系统通量观测体系的基础框架。由于森林生态系统的复杂特征以及其他方法的局限性,涡度相关法成为研究森林生态系统碳循环的主流方法。我国利用涡度相关法开展了森林、草地、农田等生态系统的碳水通量研究^[14]。其中森林生态系统通量塔分布于东北^[15]、华北^[16]、华东^[17]、华南^[18]、西南^[19]等地,南北过渡带的森林生态系统由于地理位置特殊,开设的通量站点少,目前关于该类森林生态系统碳通量的动态监测及碳汇能力评估的报道较少。大别山位于南北气候过渡带,兼具南北两地气候特点,地处我国人类社会经

活动强烈的鄂豫皖三省交汇处,是国家重点生态功能区以及长江流域和淮河流域重要的生态安全屏障。因此,在全球变化和强烈人类活动的双重作用下,大别山地带性植被-常绿落叶阔叶混交林退化、流域水资源数量和质量下降已经成为该地区面临的最主要生态问题。研究大别山森林生态系统碳通量变化及其对环境因子的响应,对于评估南北过渡带森林生态系统碳收支非常关键。本文基于涡度相关法,以大别山森林生态系统国家野外科学观测研究站典型常绿落叶阔叶混交林为对象,利用涡度相关法定量评估该森林生态系统的碳汇功能,旨在明确大别山常绿落叶阔叶混交林碳通量在不同时间尺度上的变化特征、年固碳量及其对环境因子响应的响应,为今后估算相似的森林生态系统在气候变化背景下碳储量,模拟碳循环过程提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区大别山(30°10′—32°30′N,112°40′—117°10′E)位于南北气候过渡带(图1),南部属于北亚热带湿润季风气候,北部属于暖温带半湿润季风气候,年平均气温 15.2℃,年平均降水量 1119 mm。土壤类型多样,大部分区域的土壤类型以黄棕壤、黄褐土为主。林地以有林地和灌木林为主,主要分布于研究区的西北和东南部,面积为 $2.71 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。受人为因素干扰,观测塔附近以人工林、次生林为主,原始植被较少。主要乔木树种有枫香(*Liquidambar formosana* Hance)、麻栎(*Quercus acutissima* Carruth)、栓皮栎(*Quercus variabilis* Bl)等,主要灌木树种有山胡椒(*Lindera glauca* Bl)、三角枫(*Acer buergerianum* Miq)、朴树(*Celtis sinensis* Pers)等,林龄约为 50a。大别山地处北亚热带与暖温带气候过渡区,地带性植被-常绿落叶阔叶混交林兼具南北特征,对气候变化的响应非常敏感。

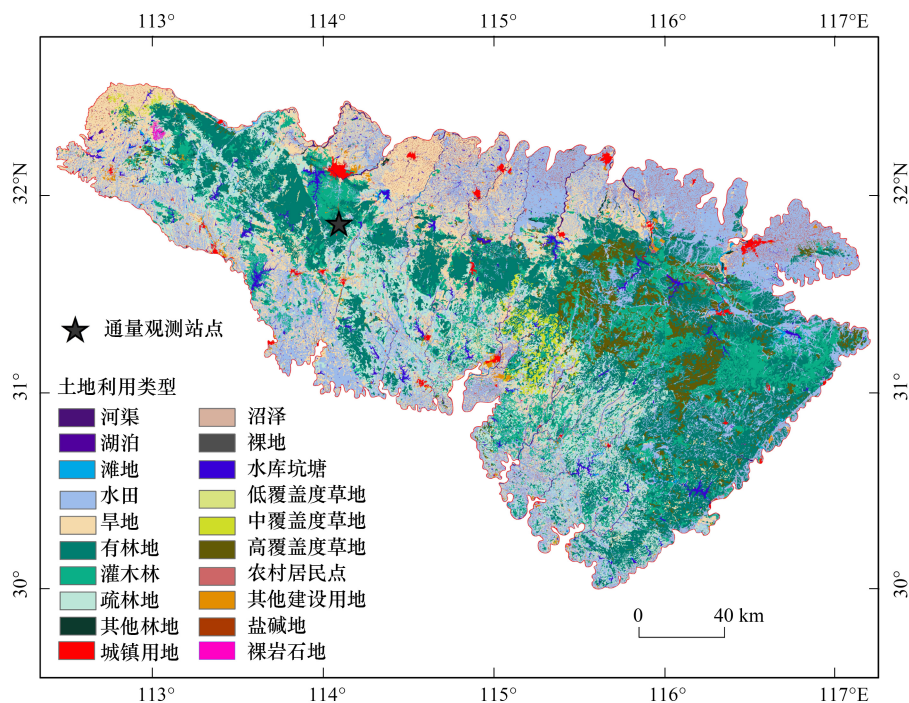


图1 研究区图

Fig.1 Study area map

1.2 观测试验与数据来源

2011—2020 年在河南大别山森林生态系统国家野外科学观测研究站的 30m 观测塔(31°51′41″N,114°05′33″E)架设 OPEC 开路式涡度相关系统开展碳通量观测实验,涡度相关系统安装高度为 23m,涡度相关系统由开路式 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 红外气体分析仪(LI-7500 A, LI-Cor, 美国)和三维超声风速仪(CSAT-3, CSI, 美国)组成,测量水

汽/二氧化碳脉动和三维风速、虚温的脉动量。数据采样频率为 10Hz, 通量平均时间为 30min。

在观测塔距地 3m, 18m, 23m 高度处分别架设 3 层森林梯度气象传感器, 对常绿落叶阔叶混交林的环境气象要素进行同步监测, 环境气象要素观测包括: 光合有效辐射 (PAR)、总辐射 (R_g)、净辐射 (R_n)、气温 (T_a)、土壤温度 (T_s)、相对湿度 (RH)、饱和水汽压差 (VPD)、土壤热通量 (G)、土壤含水量 (SWC)、降雨量 (Rain)、风速 (WS)、风向 (WD)、摩擦速度 (U^*)。数据采集器为 CR1000, 数据存储间隔为 30min。本研究选用 2011、2020 年 CO_2 通量观测数据合计 666 d (2011 年 1 月 1 日—5 月 11 日、7 月 10 日—12 月 25 日、2020 年 1 月 1 日—12 月 31 日), 每天 48 组数据。

本文运用的 2000 年土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>), 一级分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地; 通过 ArcGIS 进行掩膜提取获得, 空间分辨率为 30m。

1.3 通量数据处理

1.3.1 数据质量控制

受到气象因素、仪器自身因素和人为因素等影响, 涡度相关技术采集的数据会出现一定的异常值, 需要对原始数据进行校正和质量控制。数据质量控制标准主要有: (1) 根据前人经验及研究成果^[20–21], 本研究选取 0.2m/s 作为 U^* 的临界值, 剔除摩擦风速 $U^* < 0.2$ m/s 的观测数据; (2) 剔除夜晚 CO_2 通量为负值的数据; (3) 我国森林生态系统的 CO_2 通量变化范围在 $-2 \sim 2$ $mg\ m^{-2}\ s^{-1}$ 之间, 剔除此范围之外的 CO_2 通量数据。

1.3.2 数据的插补

本研究中对连续缺失 $< 2h$ 的数据选择线性内插法进行插补, 连续缺失 $> 2h$ 的运用非线性回归法进行插补。夜间生态系统呼吸值 (R_{night}) 等于夜间 NEE 值, 白天的生态系统呼吸值 (R_{day}) 由 (2) 式结合白天土壤温度计算得出。

白天^[22]的缺失数据利用 Michaelis-Menten 直线双曲线模型进行插补^[23]:

$$NEE_{day} = \frac{P_{max} \times \alpha \times PAR}{P_{max} + \alpha \times PAR} - R_{day} \quad (1)$$

式中, NEE_{day} 为白天净生态系统碳交换量 ($mg\ m^{-2}\ s^{-1}$), P_{max} 为最大光合速率 ($mg\ m^{-2}\ s^{-1}$), α 为表观量子效率, PAR 为光合有效辐射 ($\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$), R_{day} 为白天生态系统呼吸量 ($mg\ m^{-2}\ s^{-1}$)。

夜间缺失数据利用下式进行插补^[24]:

$$NEE_{night} = R_{10} \times e^{\ln(Q_{10})(T_s - 10)/10} \quad (2)$$

式中, NEE_{night} 为夜间净生态系统碳交换量 ($mg\ m^{-2}\ s^{-1}$), R_{10} 代表土壤温度为 10℃ 时生态系统的参考呼吸速率 ($mg\ m^{-2}\ s^{-1}$), Q_{10} 是温度敏感性系数, T_s 为土壤 5cm 处温度 (℃)。

1.3.3 通量的分离

NEE 的计算公式为:

$$NEE = FC + FS \quad (3)$$

$$FS = \Delta C / \Delta t \times h \quad (4)$$

式中, F_c 为 CO_2 湍流通量 ($mg\ m^{-2}\ s^{-1}$); F_s 为观测高度以下的碳储存通量; h 为观测高度 (m); ΔC 为高度 h 处前后两次相邻时间测定的 CO_2 浓度差值 (mg/m^3); Δt 为前后两次测定的时间间隔 (1800s)。净生态系统生产力 (NEP) 与 NEE 的关系为:

$$NEP = -NEE \quad (5)$$

为了确定 GPP 和 Reco, 需要对数据进行拆分计算, Reco 可由下式计算:

$$Reco = R_{day} + R_{night} \quad (6)$$

GPP 可由下式计算:

$$GPP = Reco - NEE \quad (7)$$

1.4 数据分析方法

1.4.1 主成分分析

选取 RH 、 SWC 、 $Rain$ 、 T_a 、 T_s 、 Rn 、 R_g 、 PAR 、 VPD 、 NEE 、 $Reco$ 、 GPP 共 12 个指标利用 SPSS 软件进行统计分析。主成分分析方法是多个具有相关性的要素转化成几个不相关的综合指标的分析与统计方法,在保证信息丢失最少的原则下,对原来指标进行降维处理,省去不相关的指标,将较多的指标转换成能反映研究现象的较少的综合指标^[25]。主成分可由下式表示:

$$Z_{ij} = a_{i1}x_{1j} + a_{i2}x_{2j} + a_{i3}x_{3j} + \cdots + a_{im}x_{mj} \quad (8)$$

式中, Z 是成分得分, a 是成分载荷, x 为变量测量值, i 为成分编号, j 是样本编号, m 是变量值个数。

1.4.2 相关性分析

Pearson 相关系数能够反映两个随机变量之间的线性相关程度,相关系数 r 的值一般在 -1 — 1 之间, 1 表示两个变量完全正相关, 0 表示二者无关, -1 表示二者完全负相关。 r 的值越接近 1 ,表示数据的相关性越强。相关系数 r 采用下式计算:

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2}} \quad (9)$$

式中: r 代表 Pearson 相关系数, x 、 y 代表变量。

2 结果与分析

2.1 不同时间尺度碳通量变化特征

2.1.1 NEE、Reco、GPP 不同季节平均日变化

分析大别山森林生态系统四个季节的 NEE、Reco、GPP 的平均日变化(图 2)。各季节 NEE 的日变化呈“U”型变化趋势,其变化幅度在冬季最小,春季和夏季较大,即春季和夏季该森林生态系统的光合作用较强。

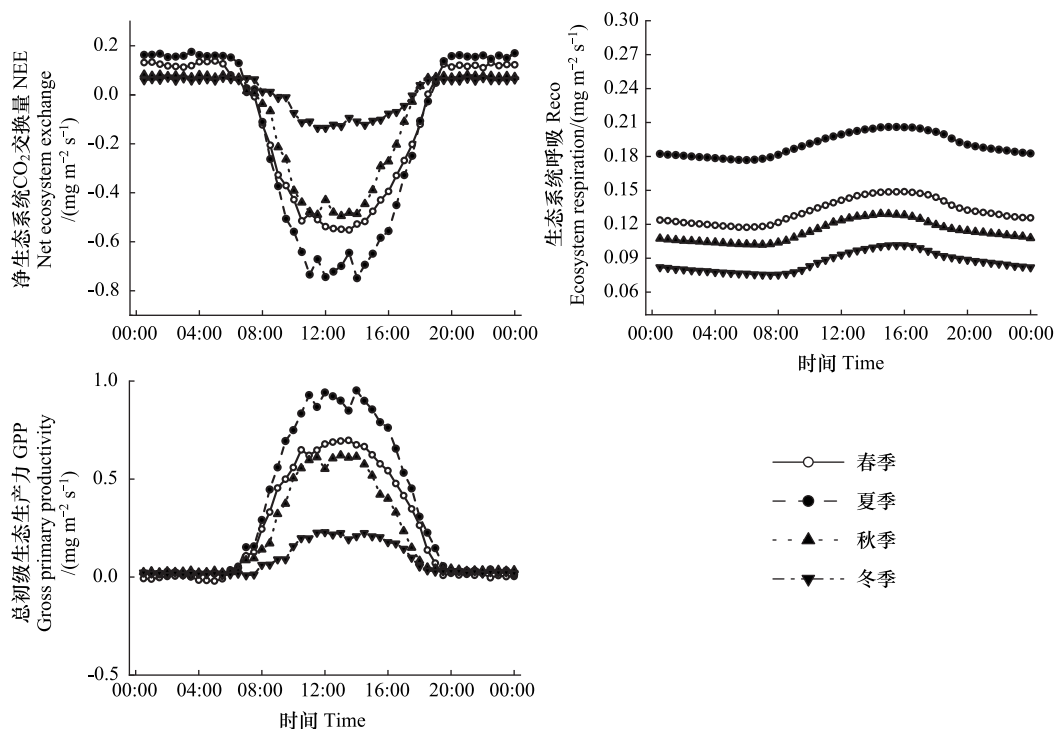


图 2 不同季节 NEE、Reco 和 GPP 平均日变化

Fig.2 The average diurnal variation of NEE、Reco and GPP in different seasons

大别山常绿落叶阔叶混交林存在“光合午休”的现象,在不同季节该现象的发生时刻有明显的差异,夏季最早出现,发生时间为 11:00,冬季最晚出现,发生时间为 12:00。夏季气温高、太阳辐射强,植物叶片更快速地关闭气孔,冬季反之。各季节 NEE 大约在 7:30—18:30 为负值,日出后,太阳辐射增强,气温升高,光合作用逐渐增强,8:00 左右开始由排放 CO_2 转为平衡最后达到吸收 CO_2 的状态,12:30 左右 NEE 达到一天中的最小值,之后逐渐增大,18:00 左右由负值转变为正值,开始释放 CO_2 。GPP 的日变化呈抛物线,在中午 13:00—14:30 达到峰值。夏季 Reco 较高,而夏季的 GPP 远高于其他四个季节,因此该森林生态系统夏季的碳汇功能强于其他季节。除冬季平均 NEE 大于 0 外,其余季节 NEE 均值为负,大别山常绿落叶阔叶混交林四季整体上具有一定的碳汇作用。

2.1.2 NEE、Reco、GPP 逐日变化

2020 年大别山常绿落叶阔叶混交林净生态系统碳交换量 NEE 的变化范围为 $-9.39 \sim 3.41 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (图 3),当每日 NEE 累积量大于 0,释放碳,出现碳源;NEE 月累积量小于 0,固定碳,出现碳汇。NEE 变化具有一定的季节性,夏季多小于 0,为碳汇且固碳量较大,冬季多大于 0,为碳源且固碳量较小。该森林生态系统生长季均有碳源日出现(图 4),其中 7 月份碳源日出现频率最大。全年共有 275 天为碳汇,生态系统系统固定碳;有 91 天为碳源,生态系统系统释放碳,可见大别山常绿落叶阔叶混交林碳汇能力较强。研究期间生态系统呼吸量 Reco 均为正值,其随温度变化明显,在 1、2 月份,温度较低,Reco 在 $2.00 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 附近徘徊,之后波动上升,10 月开始回落,11 月中下旬和 12 月在 $2.00 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 附近徘徊并在 12 月 13 日出现最小值 $0.28 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。GPP 基本呈正值,全年只有 6 天为负值且都集中在非生长季,GPP 在夏季数值较大,在 5 月 15 日达到一年中最大值 $13.28 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$,在 12 月 29 日达到最小值 $-1.37 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。2011 年大别山常绿落叶阔叶混交林碳通量变化趋势和 2020 年基本相同,在 7 月份之后,NEE 多在 $-5 \sim 0 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 附近徘徊;而 2020 年 7 月份之后 NEE 多在 $-7 \sim -2.5 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 之间波动,且逐日 GPP 值较 2011 年有所增大,由此可见,大别山常绿落叶阔叶混交林的碳交换量在不断上升,固碳能力也在不断增强。

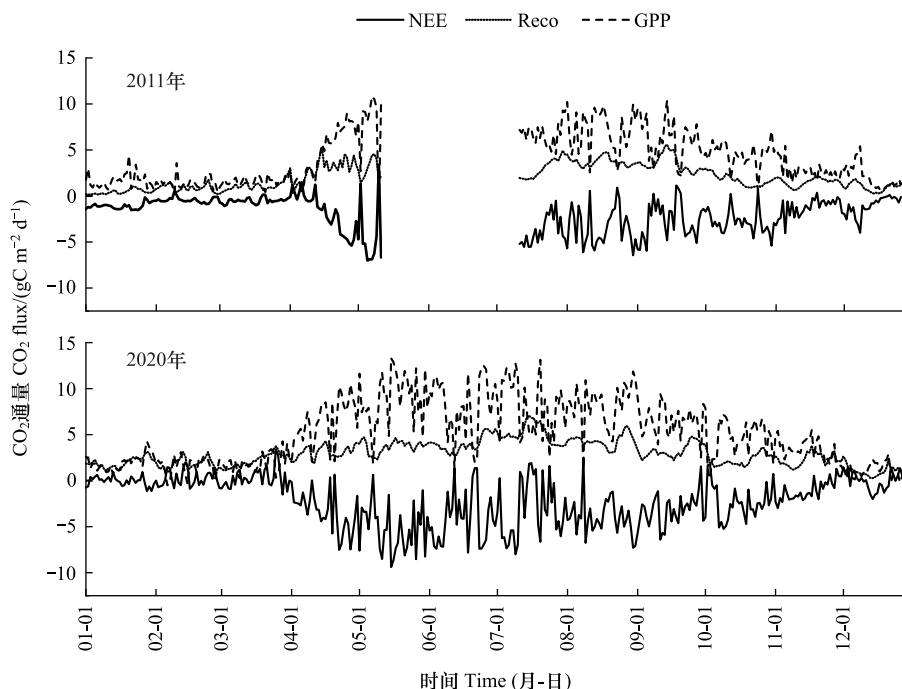


图 3 2011、2020 年 NEE、Reco 和 GPP 的变化趋势
Fig.3 Trends of NEE, Reco and GPP in 2011 and 2020

2.1.3 NEE、Reco、GPP 月变化

2020 年大别山常绿落叶阔叶混交林统整体表现出碳汇。NEE 的月变化范围在 $-162.55 \sim 9.43 \text{ gC m}^{-2} \text{ 月}^{-1}$

之间(图 5),大别山森林生态系统在 2、3、12 月为碳源,同 1 月份相比,2、3、12 月降雨量较多,光合作用强度较小导致 GPP 低于 Reco,从而 NEE 出现正值为碳源;其余月份 NEE 均为负值,其中 NEE 值在 5 月份达到最大,为 $162.548 \text{ gC m}^{-2} \text{月}^{-1}$ 。NEE 月总量变化呈双峰型,由于温度升高、光照强度增大,生态系统光合作用大于呼吸强度,在 5 月份生长季期间出现第一个峰值。在 8 月份由于降水较 6、7 月份减少且光照仍较为充足,故出现第二个小峰值。生态系统 Reco 的月变化为单峰型变化,Reco 最大值出现在 7 月,数值为 $157.48 \text{ gC m}^{-2} \text{月}^{-1}$,其主要原因为 7 月降水量全年最多,降雨后土壤微生物活动频繁,生态系统呼吸量有所增加。大别山森林生态系统固碳率为双峰型,在 2、3 和 12 月为负值,即这三个月为碳源;5 月固碳率达到最大值,为 58.63%,10 月出现第二个峰值。由 NEE、Reco、GPP 各月累积量可计算出大别山常绿阔叶落叶混交林生态系统的年 NEE、Reco、GPP 分别为 $-788.13 \text{ gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 、 $1074.14 \text{ gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 、 $1862.27 \text{ gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$,年固碳量为 50.5 TgC 。

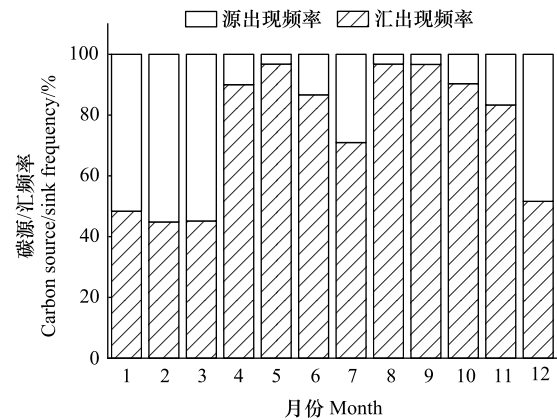


图 4 2020 年逐月碳源/汇出现频率

Fig.4 Monthly source/sink frequency in 2020

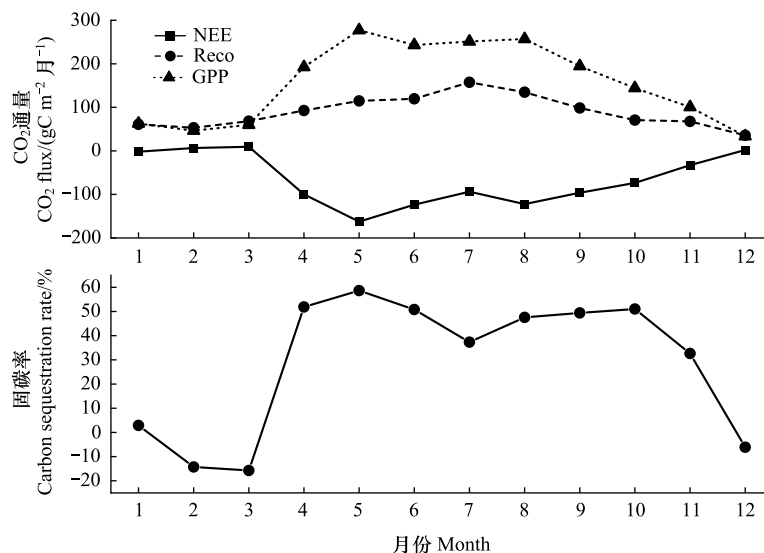


图 5 2020 年 NEE、Reco 和 GPP 各月累积量及固碳率

Fig.5 The monthly accumulation and carbon sequestration rate of NEE, Reco and GPP in 2020

2.2 大别山常绿落叶阔叶混交林碳通量影响因子分析

本研究对于影响大别山常绿落叶阔叶混交林碳通量变化的环境因子选取较多。因此利用主成分分析方法,通过降维,用少数几个综合变量来代替原始多个变量,进行环境因子贡献影响力综合评价。对 2011 和 2020 年的 NEE、Reco 和 GPP 进行 KMO 和 Bartlett 检验,KMO 值大于 0.6,且数据通过 Bartlett 检验 ($P < 0.05$),即本研究数据适合进行主成分分析。选取环境因子贡献率大于 15%,特征值大于 2 的两个主成分,其中第一、二主成分贡献率分别为 45.1%、18.7%(图 6),两者的总累积贡献率为 63.8%。载荷系数绝对值大于 0.4 时即说明该项和主成分有对应关系,据此,确定第一主成分的关键因子为气温、土壤温度、光合有效辐射、饱和水汽压差、净辐射、总辐射,第二主成分的关键因子为相对湿度、土壤含水量。

NEP、Reco 和 GPP 与环境因子的相关性如图 7 所示,NEP 与气温、净辐射、光合有效辐射、总辐射呈显著

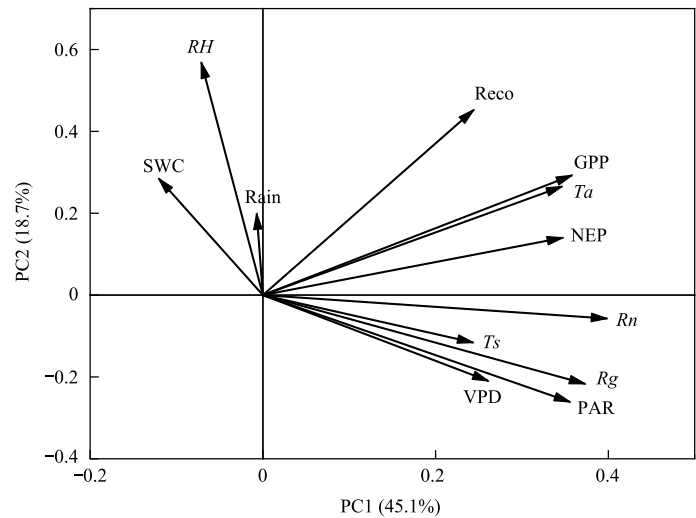


图 6 NEE、Reco 和 GPP 与环境因子的主成分分析

Fig.6 Principal component analysis of NEE、Reco and GPP with environmental factors

PAR: 光合有效辐射; R_g : 总辐射; R_n : 净辐射; T_a : 气温; T_s : 土壤温度; RH : 相对湿度; VPD: 饱和水汽压差; SWC: 土壤含水量; Rain: 降雨量; NEP: 生态系统碳生产力; Reco: 生态系统呼吸

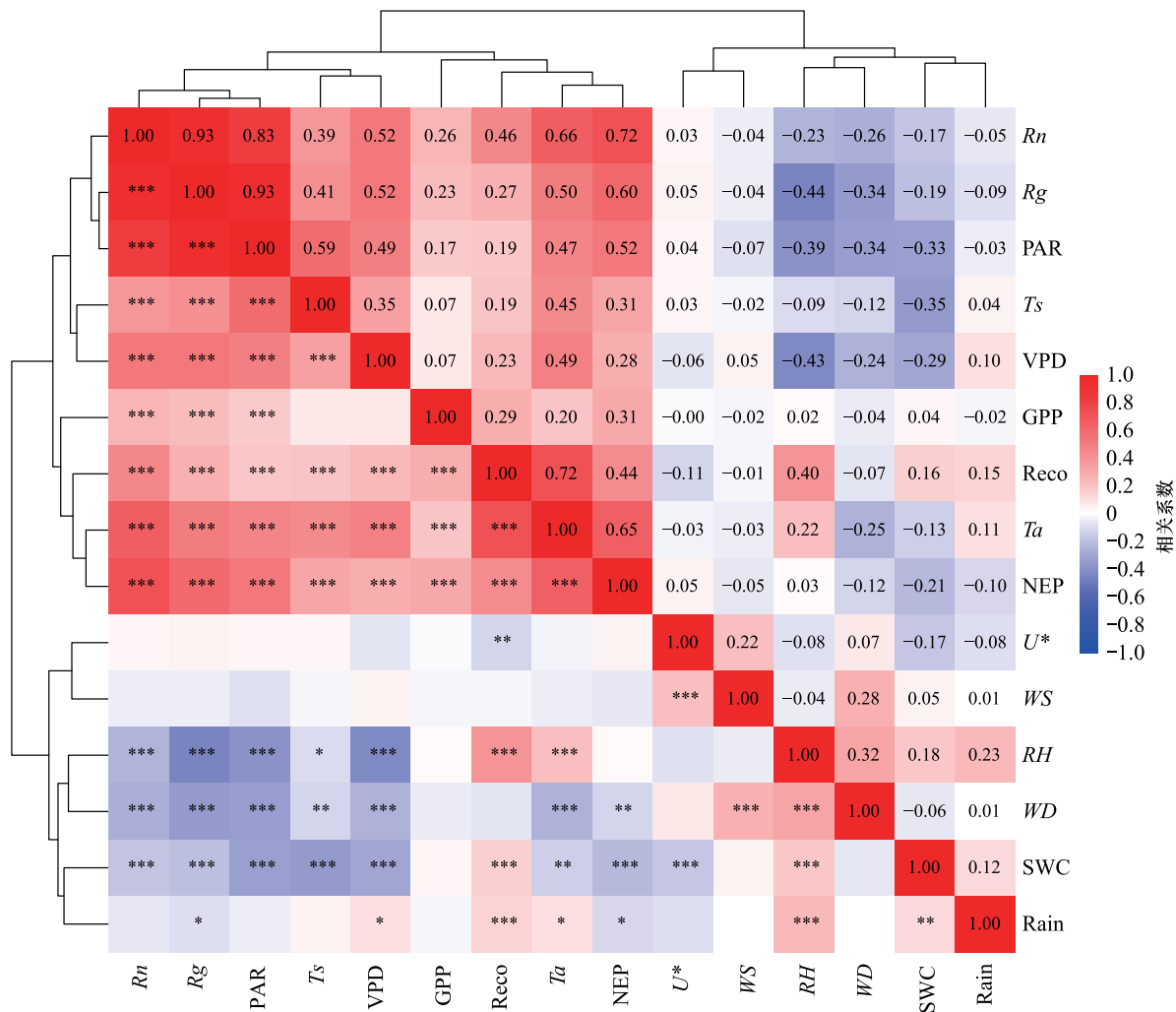


图 7 NEE、Reco 和 GPP 与环境因子的相关性

Fig.7 The correlation between NEE, Reco, GPP and environmental factors

* $P < 0.05$ ** $P < 0.01$ *** $P < 0.001$

正相关,相关系数为 0.52—0.72 ($P<0.001$); GPP 与气温、净辐射、光合有效辐射、总辐射呈显著正相关,相关系数为 0.17—0.26 ($P<0.001$); 太阳辐射作为植被光合作用的必要条件,是影响大别山常绿落叶阔叶混交林碳通量变化的环境因子之一。Reco 与气温、净辐射呈显著正相关,相关系数为 0.40—0.72 ($P<0.001$), 温度与太阳辐射对于大别山森林生态系统呼吸有着重要影响。随着太阳辐射的增强与温度的升高,植被光合作用与呼吸作用增强,森林植被生长所需的营养物质增加,其呼吸作用产生的 CO_2 增多。

3 讨论

大别山常绿阔叶落叶混交林生态系统的年 NEE、Reco、GPP 分别为 $-788.13 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $1074.14 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $1862.27 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。与表 1 中纬度较为接近的其他森林生态系统观测站点的通量数据对比,发现大别山常绿落叶阔叶林的固碳量与天目山常绿落叶阔叶林相差不大,并大于其他四个森林生态系统。这两个森林类型同属常绿落叶阔叶混交林,其森林结构稳定,具有完整的乔-灌-草复层结构^[26],相比于竹林和针叶林等森林类型,林分类型较多,固碳能力较强。小浪底阔叶混交林所在纬度高于大别山常绿落叶阔叶混交林,而大别山常绿落叶阔叶混交林的年固碳量远远大于优势种同为栓皮栎的小浪底阔叶混交林,这符合 NEE 随纬度增加而降低的普适规律^[27]。大别山常绿落叶阔叶混交林的 Reco 年总量略低于缙云山针阔叶混交林,大于其他四个森林生态系统,这与缙云山全年气候温和,土壤微生物呼吸活跃有关。GPP 年总量均高于其他五个森林生态系统,说明大别山常绿落叶阔叶混交林光合作用较强,拥有较高的固碳能力。

表 1 相近纬度不同森林生态系统 NEE、Reco 和 GPP 的对比

Table 1 Comparison of NEE, Reco and GPP in different forest ecosystems at similar latitudes

站点 Site	纬度(N) Latitude	气候类型 Climate type	森林类型 Forest type	树木年龄 Tree age/a	净生态系统 碳交换量 NEE/ ($\text{gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)	生态系统呼吸 Reco/ ($\text{gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)	总初级生产力 GPP/ ($\text{gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)	参考文献 References
河南大别山	31°46'	亚热带湿润季风气候	常绿落叶阔叶混交林	约 65	-788.13	1074.14	1862.27	本文
浙江天目山	30°21'	中亚热带季风湿润气候	常绿落叶阔叶混交林	约 140	-738.18	931.05	1669.23	[28]
河南宝天曼	33°03'	大陆性季风气候	针叶林和落叶阔叶林	约 65	-569.4	526.7	1096.80	[29]
重庆缙云山	29°41'	亚热带季风湿润性气候	针阔混交林	—	-566.49	1196.68	1761.63	[30]
浙江安吉	30°28'	亚热带季风气候	毛竹林	—	-668.40	932.55	1600.92	[21]
河南小浪底	35°01'	暖温带大陆性季风气候	阔叶混交林	约 30	-335	841	1193	[31]

NEE:净生态系统碳交换量 Net ecosystem exchange; Reco:生态系统呼吸 Ecosystem respiration; GPP:总初级生产力 Gross primary productivity

大别山常绿阔叶落叶混交林碳通量受气温、净辐射、光合有效辐射和总辐射等因素的综合影响。太阳辐射是自然生态系统中能量和碳通量的关键驱动因素,对 GPP、NEP 的影响较为显著^[32]。漫射光被认为会增加陆地生态系统的碳吸收,其可以通过减少植物的水分和热胁迫,创造有利于光合作用的条件^[33—34]。当太阳辐射增强时,更多的树冠暴露在漫射光线下,使得生态系统的 GPP、NEP 增大^[35]。大别山常绿落叶阔叶混交林植被覆盖度大且季节变化小,太阳辐射是该生态系统碳通量变化的关键驱动因素。净辐射是大别山森林生态系统碳通量变化的重要驱动因素,NEP 随着净辐射的增大而增大,这与前人的研究一致^[17,36—37]。水分增加可能会使土壤中气体的扩散速率受到限制^[38—39],但大别山地区气候湿润,降雨较多,植物的生理过程很少因短时间的的水分变化而受到胁迫,因而饱和水汽压差等对大别山森林生态系统碳通量的影响相对于太阳辐射和温度等其他环境因子较弱。大别山森林生态系统 Reco 的变化受辐射与温度的影响较为显著,气温、净辐射与 Reco 呈显著正相关。随着降雨历史延长和降雨量增加,二者对呼吸速率的抑制强度增强,但当两者达到一定

值时,抑制效应与强度均减弱^[40]。土壤含水量和降雨量对大别山森林生态系统呼吸作用的影响较小,同样与该地区气候湿润,湿度适宜有关。但在生长季的月尺度上,大别山常绿落叶阔叶混交林碳通量与降雨的相关性较强。如2020年7月份的降雨量与碳通量进行的相关性达0.601($P < 0.01$),即7月降雨量与碳通量的变化存在显著相关性。7月降雨量达到了全年最高值559.1mm,发生了长达22d的降雨事件,占全年总降雨量的30.2%,降雨增多导致净辐射减小,7月平均净辐射值为 94.21 W/m^2 ,和8月(139 W/m^2)相比净辐射值较低,森林生态系统能够有效利用的太阳辐射减少,光合作用减弱。同时,长时间降雨使得大别山森林生态系统呼吸能力增强,最终导致7月有35%的日子出现碳源,这与纪小芳等^[17]的研究一致。

本研究运用涡度相关系统对大别山常绿落叶阔叶混交林碳通量进行多年连续观测,综合考虑数据质量与连续性,选取2011、2020年观测数据重点探讨了碳通量在不同时间尺度的变化特征及其与环境因子的响应。通过对时间跨度长达10年的碳通量数据进行逐日变化趋势分析,发现大别山常绿落叶阔叶混交林的碳交换量在不断上升,固碳能力不断增强。可见,长期的数据观测对于分析森林生态系统碳收支的变化有着及其重要的意义,因此在将来的研究中,仍需坚持长期的观测和数据分析。同时,环境因子净辐射对南北过渡带常绿落叶阔叶混交林碳通量的影响机制也是今后需要深入探讨的方面。

4 结论

本研究基于2011—2020年在大别山森林生态系统国家野外科学观测研究站开展的常绿落叶阔叶混交林涡度相关观测试验和环境气象观测试验,揭示亚热带—暖温带南北气候过渡带森林生态系统NEE、Reco与GPP的动态变化特征;阐明大别山常绿落叶阔叶混交林碳通量在不同时间尺度上的变化特征、年固碳量及其对环境因子的响应,得到以下结论:

(1) 大别山常绿阔叶落叶混交林存在“光合午休”现象,发生时间随季节有所变化,主要发生在11:00—13:30。中午太阳辐射强度大,植物叶片因高温干旱关闭气孔并降低与光合作用有关的酶活性,从而使得中午段NEE增大。

(2) 2020年大别山常绿落叶阔叶混交林的NEE、Reco、GPP分别为 $-788.13 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $1074.14 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $1862.27 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,年固碳量为 50.5 TgC 。其固碳能力与相近纬度同种类型的常绿落叶阔叶混交林基本持平,并高于针阔叶混交林、毛竹林等其他类型的森林生态系统,2020年总体整体表现为碳汇。2011—2020年间。大别山常绿落叶阔叶混交林的碳交换量在不断上升,固碳能力不断增强。

(3) 影响大别山常绿落叶阔叶混交林碳通量的主要环境因子为温度与太阳辐射。气温、净辐射、光合有效辐射和总辐射与NEP和GPP呈显著正相关($P < 0.001$),促进 CO_2 的吸收,Reco与气温和净辐射呈显著正相关($P < 0.001$),促进 CO_2 的释放。

参考文献(References):

- [1] Friedlingstein P, Jones M W, O'Sullivan M, Andrew R M, Zaehle S. Global Carbon Budget 2019. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1783-1838.
- [2] 朱牛,王金牛,王旭峰,罗栋梁,申承,盖艾鸿. 三江并流核心区亚高山森林非生长季净生态系统 CO_2 交换量及其影响因素. *生态学报*, 2023, 43(14): 5967-5979.
- [3] 张婷,周军志,李建柱,陈伏龙,冯平. 陆地生态系统碳通量特征研究进展. *地球环境学报*, 2022, 13(6): 645-666.
- [4] Wang Y, Zhang L M, Xu S N, Yu H M, Liu Y. Analysis on soil animals, soil respiration and the correlation in three forest ecosystems in Maershan. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(1): 172-183.
- [5] Xu B, Arain M A, Black T A, Law B E, Pastorello G Z, Chu H S. Seasonal variability of forest sensitivity to heat and drought stresses: a synthesis based on carbon fluxes from North American forest ecosystems. *Global Change Biology*, 2020, 26(2): 901-918.
- [6] Zhang J H, Zhu L Q, Li G D, Zhao F, Qin J T. Distribution patterns of SOC/TN content and their relationship with topography, vegetation and climatic factors in China's north-south transitional zone. *Journal of Geographical Sciences*, 2022, 32(4): 645-662.
- [7] Man Z H, Che S Q, Xie C K, Jiang R Y, Liang A Z, Wu H. Effect of climate change on CO_2 flux in temperate grassland, subtropical artificial coniferous forest and tropical rain forest ecosystems. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(24): 13056.
- [8] 纪小芳,龚元,郑翔,姜姜,鲁建兵,刘胜龙,王丹,方万里,何雪凯. 凤阳山森林生态系统碳交换及其物候特征. *地球环境学报*, 2020, 11(4): 376-389.

- [9] Bennett A C, Arndt S K, Bennett L T, Knauer J, Beringer J, Griebel A, Hinko-Najera N, Liddell M J, Metzen D, Pendall E, Silberstein R P, Wardlaw T J, Woodgate W, Haverd V. Thermal optima of gross primary productivity are closely aligned with mean air temperatures across Australian wooded ecosystems. *Global Change Biology*, 2021, 27(19): 4727-4744.
- [10] Landry G, Thiffault E, Cyr D, Moreau L, Boulanger Y, Dymond C. Mitigation potential of ecosystem-based forest management under climate change: a case study in the boreal-temperate forest ecotone. *Forests*, 2021, 12(12): 1667.
- [11] Mamkin V, Varlagin A, Yaseneva I, Kurbatova J. Response of spruce forest ecosystem CO₂ fluxes to inter-annual climate anomalies in the southern taiga. *Forests*, 2022, 13(7): 1019.
- [12] Shiri N, Shiri J, Kazemi M H, Xu T R. Estimation of CO₂ flux components over Northern Hemisphere forest ecosystems by using random forest method through temporal and spatial data scanning procedures. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(11): 16123-16137.
- [13] Rojas-Robles N E, Garatuza-Payán J, Álvarez-Yépiz J C, Sánchez-Mejía Z M, Vargas R, Yépez E A. Environmental controls on carbon and water fluxes in an old-growth tropical dry forest. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020, 125(8): e2020JG005666.
- [14] 田东哲, 吴苏, 徐梦帅, 李明放, 刘立业. 基于凋落相关法的森林生态系统碳通量观测研究. *现代信息科技*, 2022, 6(11): 149-152.
- [15] 王宇, 周广胜, 贾丙瑞, 李帅, 王淑华. 中国东北地区阔叶红松林与兴安落叶松林的碳通量特征及其影响因子比较. *生态学报*, 2010, 30(16): 4376-4388.
- [16] 谭丽萍, 刘苏峡, 莫兴国, 杨丽虎, 林忠辉. 华北人工林水热碳通量环境影响因子分析. *植物生态学报*, 2015, 39(8): 773-784.
- [17] 纪小芳, 鲁建兵, 杨军, 姜姜, 王丹, 何雪凯, 方万力. 凤阳山针阔混交林碳通量变化特征及其影响因子. *东北林业大学学报*, 2019, 47(3): 49-55.
- [18] 杨思琪, 杨川, 龚元, 章杰, 宋波, 吴志祥. 海南橡胶林生态系统净碳交换物候特征. *热带作物学报*, 2022, 43(6): 1288-1296.
- [19] 冯印成, 王云琦, 王玉杰, 王凯, 王松年, 王杰帅. 重庆缙云山针阔混交林水汽通量特征及其影响因子. *植物生态学报*, 2022, 46(8): 890-903.
- [20] 温学发, 于贵瑞, 孙晓敏, 刘允芬. 复杂地形条件下森林植被湍流通量测定分析. *中国科学: D 辑: 地球科学*, 2004, 34(S2): 57-66.
- [21] 孙成, 江洪, 周国模, 杨爽, 陈云飞. 我国亚热带毛竹林 CO₂ 通量的变异特征. *应用生态学报*, 2013, 24(10): 2717-2724.
- [22] Zha T S, Kellomäki S, Wang K Y, Rouvinen I. Carbon sequestration and ecosystem respiration for 4 years in a Scots pine forest. *Global Change Biology*, 2004, 10(9): 1492-1503.
- [23] Schmid H P, Su H B, Vogel C S, Curtis P S. Ecosystem-atmosphere exchange of carbon dioxide over a mixed hardwood forest in northern lower Michigan. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D14): 4417.
- [24] 马文婧, 李英年, 张法伟, 韩琳. 青海湖北岸草甸草原 CO₂ 通量年际动态及其驱动机制. *生态学报*, 2023, 43(3): 1102-1112.
- [25] 王鹏, 祝福民, 邓育武, 田亚平, 易锋. 基于主成分分析的衡阳市土地生态安全评价. *经济地理*, 2015, 35(1): 168-172.
- [26] 陈亮, 周国模, 杜华强, 刘玉莉, 毛方杰, 徐小军, 李雪建, 崔璐, 李阳光, 朱迪恩. 基于随机森林模型的毛竹林 CO₂ 通量模拟及其影响因子. *林业科学*, 2018, 54(8): 1-12.
- [27] 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, Lai C T, Law B E, Meyers T, Moncrieff J, Moors E, Munger J W, Pilegaard K, Rannik Ü, Rebmann C, Suyker A, Tenhunen J, Tu K, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 43-69.
- [28] 牛晓栋, 江洪, 张金梦, 方成圆, 陈晓峰, 孙恒. 浙江天目山老龄森林生态系统 CO₂ 通量特征. *应用生态学报*, 2016, 27(1): 1-8.
- [29] 牛晓栋, 孙鹏森, 刘晓静, 栾军伟, 刘世荣. 中国亚热带-暖温带过渡区锐齿栎林净生态系统碳交换特征. *生态学报*, 2020, 40(17): 5980-5991.
- [30] 王倩, 王云琦, 马超, 王彬, 李一凡. 缙云山针阔混交林碳通量变化特征及影响因子研究. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(3): 565-576.
- [31] Tong X J, Meng P, Zhang J S, Li J, Zheng N, Huang H. Ecosystem carbon exchange over a warm-temperate mixed plantation in the lithoid hilly area of the North China. *Atmospheric Environment*, 2012, 49: 257-267.
- [32] Carrara A, Kolari P, de Beeck M O, Arriga N, Berveiller D, Dengel S, Ibrom A, Merbold L, Rebmann C, Sabbatini S, Serrano-Ortiz P, Biraud S C. Radiation measurements at ICOS ecosystem stations. *International Agrophysics*, 2018, 32(4): 589-605.
- [33] Sarmiento J L, Gloor M, Gruber N, Beaulieu C, Jacobson A R, Mikaloff Fletcher S E, Pacala S, Rodgers K. Trends and regional distributions of land and ocean carbon sinks. *Biogeosciences*, 2010, 7(8): 2351-2367.
- [34] Urban O, Klem K, Ač A, Havráňková K, Holířová P, Navrátil M, Zitová M, Kozlová K, Pokorný R, Šprtová M, Tomášková I, Špunda V, Grace J. Impact of clear and cloudy sky conditions on the vertical distribution of photosynthetic CO₂ uptake within a spruce canopy. *Functional Ecology*, 2012, 26(1): 46-55.
- [35] Cheng S J, Bohrer G, Steiner A L, Hollinger D Y, Suyker A, Phillips R P, Nadelhoffer K J. Variations in the influence of diffuse light on gross primary productivity in temperate ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 201: 98-110.
- [36] 吴志祥, 陶忠良, 兰国玉, 王纪坤, 谢贵水, 周兆德. 海南岛橡胶林生态系统碳通量及其影响因子研究. *热带作物学报*, 2014, 35(11): 2099-2108.
- [37] Du Y G, Pei W W, Zhou H K, Li J M, Wang Y Y, Chen K L. Net ecosystem exchange of carbon dioxide fluxes and its driving mechanism in the forests on the Tibetan Plateau. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2022, 103: 104451.
- [38] Reichstein M, Falge E, Baldocchi D, Papale D, Aubinet M, Berbigier P, Bernhofer C, Buchmann N, Gilmanov T, Granier A, Grünwald T, Havráňková 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.
- [39] Veenendaal E M, Kolle O, Lloyd J. Seasonal variation in energy fluxes and carbon dioxide exchange for a broad-leaved semi-arid savanna (Mopane woodland) in Southern Africa. *Global Change Biology*, 2004, 10(3): 318-328.
- [40] 解欢欢, 马文瑛, 赵传燕, 乔雨, 赵宇豪, 王方圆. 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. *生态学杂志*, 2016, 35(11): 2875-2882.