

引用格式:

文双雅, 高倩文, 卢俊玮, 高志强. 湘中地区中稻碳通量的变化特征[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(6): 616–621.

WEN S Y, GAO Q W, LU J W, GAO Z Q. Characterization of carbon flux of medium rice in central Hunan[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2021, 47(6): 616–621.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



湘中地区中稻碳通量的变化特征

文双雅, 高倩文, 卢俊玮*, 高志强*

(湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128)

摘 要: 采用涡度相关技术对湘中地区中稻大田生育期(2019 年 6—9 月)的碳通量进行了连续观测, 分析了稻田生态系统碳交换中的净碳交换量(NEE)、总初级生产力(GPP)和总呼吸(Reco)的变化特征。结果表明: 中稻大田生育期内碳通量具有明显的日变化和季节变化特征, 碳通量月平均日变化总体成“U”形单峰曲线变化, 不同月份的差异体现在“U”形的高度上; 中稻大田生育期内不同生育时期的固碳能力有所不同, 孕穗期、齐穗期、灌浆中期、分蘖盛期、成熟期的固碳能力依次减弱; NEE、GPP 和 Reco 的变化曲线分别呈现出“U”形、倒“U”形和偏锋特征; 中稻大田生育期内的 NEE 总和、GPP、Reco 分别为 -173.93 、 587.62 、 413.68 g/m^2 。研究发现, 湘中地区中稻大田生育期内表现出一定的碳汇功能, 这也正是产量形成的物质基础和产量潜力挖掘的研究方向。

关 键 词: 中稻; 碳通量; 涡度相关技术; 净碳交换; 湘中地区

中图分类号: S314

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2021)06-0616-06

Characterization of carbon flux of medium rice in central Hunan

WEN Shuangya, GAO Qianwen, LU Junwei*, GAO Zhiqiang*

(College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: In this study, we continuously observed the carbon flux during the rice growth period(June-September, 2019) in central Hunan using the eddy covariance technology, and analyzed change characteristics of the carbon exchange, including net carbon exchange amount(NEE), total primary productivity(GPP) and total breath(Reco). The results showed that the carbon flux during the growth period has obvious characteristics of diurnal and seasonal changes: the monthly average daily change of carbon flux was generally a “U”-shaped single-peak curve change, and the variation among the studied different months is reflected in the height of the “U”-shaped curve. In the medium rice field, the carbon sequestration capacity followed a weakening trend over the five stages, booting stage, full heading stage, middle filling stage, tillering stage, and mature stage. The change curves of NEE, GPP and Reco showed the features in “U”, inverted “U” and “bias” shapes respectively. The total NEE was, -173.93 g/m^2 , GPP 587.62 g/m^2 , and Reco 413.68 g/m^2 . The study found that the middle rice field in the central Hunan region exhibited a relatively strong carbon sink function, which was the material basis for yield formation and yield potential mining and probably presented the research future.

Keywords: medium rice; carbon flux; eddy covariance technology; net ecosystem exchange; central Hunan

生物圈碳循环的状态与过程及其对环境变化的影响以及农田生态系统的碳交换及其调控机制

等已成为全球共同关注的问题^[1]。农田生态系统是陆地生态系统重要的组成部分, 作为陆地生态系统

收稿日期: 2020-09-17

修回日期: 2020-12-13

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0301506)

作者简介: 文双雅(1997—), 女, 湖南株洲人, 硕士研究生, 主要从事作物信息学研究, 840305341@qq.com; *通信作者, 卢俊玮, 博士研究生, 高级实验师, 主要从事农业大数据研究, 345321@qq.com; *通信作者, 高志强, 博士, 教授, 主要从事作物信息学研究, 100640117@qq.com

碳循环过程中最活跃的碳库受人为因素的控制和干扰强烈^[2-4]。影响农田生态系统的碳循环与碳交换的因素很多, CO₂ 浓度是直接因素, 土壤因子、水分因子、气象因子、农艺措施等都可以通过光合作用或呼吸作用对净碳交换产生影响^[5]。传统的生态系统碳交换研究方法以箱式法为主, 但存在对下垫面植被扰动大、缺乏观测连续性以及时间分辨率低等缺点, 在估算生态系统净碳交换特征及其机理中存在较大的不确定性^[6]。近年来, 涡度相关技术实现了对生态系统尺度净碳交换的直接测定, 使得长期、连续的通量观测成为可能, 也是目前国际上公认的碳通量测定的标准方法^[1,4,7-11], 并在农田生态系统碳通量研究上得以应用^[12-14]。

水稻是中国重要的粮食作物, 湘中地区是水稻优势产区, 研究该区域中稻碳通量变化特征, 可为探索水稻高产形成机制提供依据。本研究中, 笔者利用 2019 年 6—9 月湘中地区中稻大田生育期内的涡度观测数据, 分析其碳通量变化特征, 旨在为水稻高产栽培提供理论依据。

1 试验区概况

试验在湖南农业大学浏阳教学科研综合基地进行。该基地(E113°84', N 28°30') 系湘中丘陵区小盆地, 属亚热带季风湿润气候, 年平均气温 17.3 °C, 1 月平均气温 5.4 °C, 7 月平均气温 28.7 °C, 年均降水量 1358.6 ~ 1552.5 mm。土壤为潯育性水稻土, 有机碳、全氮、全磷、全钾含量分别为 29.1、1.58、0.49、14.62 g/kg, pH 5.71。以涡度相关通量塔为中心, 南北长 100 m 的观测区内地势平坦, 且均为水稻田, 历年种植制度为稻—油两熟制。

2 材料与方法

2.1 供试材料及田间管理

供试水稻为本地大面积推广品种晶两优华占。2019 年 5 月 10 日播种育秧, 6 月 8 日移栽, 9 月 25 日收获。土壤耕作采用少耕技术, 灌水后直接旋耕碎土成泥。土壤耕作前按照 300 kg/hm² 施用生石灰, 以调节土壤 pH。水分管理和害虫防治按照大田常规管理。17—17—17 复合肥 40 kg/(667 m²) 和尿素 5 kg/(667 m²) 作基肥一次性施用, N、P、K 有效成分比为 8.1 : 6.8 : 6.8, 中后期补施叶面肥并结

合病害防治。

2.2 研究方法及数据采集

在中稻大田生育期(6 月 8 日至 9 月 25 日)采用涡动相关系统对其碳通量进行连续测量; 采用常规气象要素观测系统测定气象要素。涡度相关观测系统测定冠层上方的三维风速、超声虚温、水汽和 CO₂ 浓度。系统连续自动采集, 采样频率为 10 Hz, 每 30 min 输出 1 组平均通量以及 10 Hz 原始数据。气象要素包括光合有效辐射、空气温度、0.05 m 土壤温度和降水量等。以上各项测定值采样周期均为 30 min 的平均值。

2.3 数据处理及分析

采用 Eddypro7.0.1 对取得的原始数据进行 30 min 通量计算, 软件自动进行异常值处理和相关校正。主要处理步骤包括野点去除、超声虚温校正、坐标旋转校正、密度变化修正(WPL)和频率响应校正等^[15-17]。将获得的通量数据作进一步质量控制: 剔除降雨时刻以及前后 1 h 的数据值; 剔除夜间为负值的数据值; 剔除超出合理范围的数据值; 剔除摩擦风速 < 0.05 m/s 对应的通量数据值。

在通量数据观测过程中, 受仪器故障、天气状况和供电系统故障的影响, 往往会出现部分数据的异常和缺失, 且通过通量数据的质量控制采集数据也会造成数据的空缺; 因此, 要对原始数据进行插补修正。数据插补选择的方法主要为: 小于 2 h 的缺失数据, 采用线性内插法; 大于 2 h 且小于 1 d 的缺失数据, 采用平均日变化法(MDV), 白天选择 14 d 的时间窗口, 夜晚选择 7 d 的时间窗口; 大于 1 d 的数据, 采用通量数据和气象数据建立的经验拟合关系进行插补^[18-20]。对于观测期内缺失的白天数据, 采用米氏方程^[21]进行插补。

$$NEE = Rd - \frac{PAR \times P_{max}}{PAR + K_m} \quad (1)$$

$$\alpha = P_{max} / K_m \quad (2)$$

式中: NEE 为生态系统净碳交换量; PAR 为光合有效辐射; P_{max} 为最大光合速率; Rd 为生态系统呼吸速率; K_m 为拟合常数; α 为初始光能利用率。

对于观测期内缺失的夜间数据, 采用生态系统呼吸和土壤温度的指数关系模型^[22]进行插补, 计算公式见(3)。

$$Reco_n = ae^{bT} \quad (3)$$

式中: a 、 b 为拟合常数; Reco_n 为夜间生态系统的呼吸通量; T 为 5 cm 土壤的温度。

利用涡度相关技术观测得出的 NEE 仅为生态系统的净碳交换量。为了解生态系统总呼吸(Reco)和总初级生产力(GPP)的变化,需要将 NEE 进行拆分。由于夜间无光合作用,生态系统完全处于碳排放状态,所以夜间生态系统 Reco 值等于夜晚 NEE 值,而白天生态系统呼吸则是依据呼吸和土壤温度的拟合模型,再结合白天的土壤温度计算得出,三者关系^[23]如公式(4)。

$$\text{GPP} = \text{Reco} - \text{NEE} \quad (4)$$

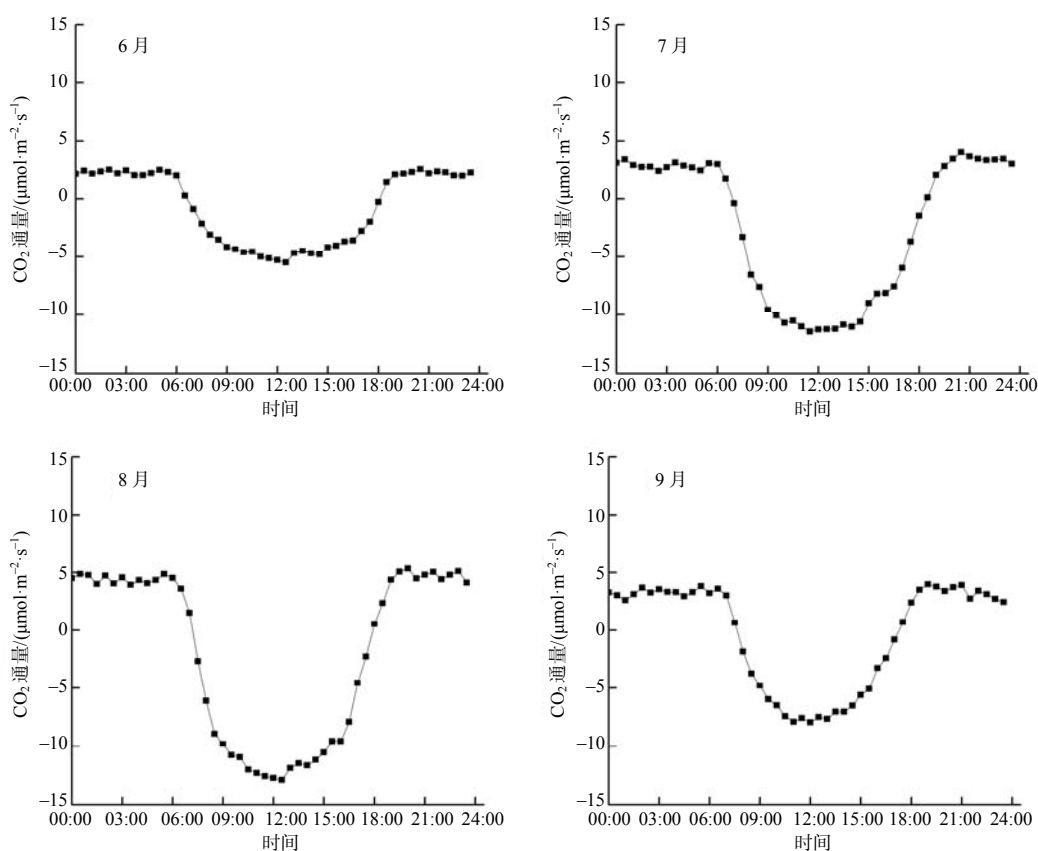


图 1 不同月份稻田碳通量的平均日变化

Fig.1 Diurnal variation of carbon flux in the four months in rice field

从月份梯度来分析,6 月份处于水稻分蘖期,叶面积指数低,光合作用总体水平不高,表现为夜间呼吸消耗水平较低,白天光合作用吸收 CO_2 也相对较少,碳通量最小值($F_{c\min}$)出现在 12:00,为 $-5.30 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,夜间 F_c 均值为 $2.17 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。7、8 月为水稻生长旺盛期,田间叶面积指数逐渐升高,光合作用的功能叶增加,表现出更强的光合能力, $F_{c\min}$ 分别出现在 11:30 和 12:30,分别为 -11.46 、 $-12.89 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,夜间 F_c 均值分别为 2.90 、 4.45

3 结果与分析

3.1 碳通量的日变化动态

分别对通过涡度观测系统测得的每月同一时刻 CO_2 通量数据进行平均,得到碳通量(F_c)的月平均日变化动态(图 1)。在 6—9 月大田生育期内, F_c 的月平均日变化均呈现为夜间高、白天低、正午达到最低谷的趋势,呈“U”形单峰曲线变化,即白天吸收 CO_2 积累光合产物,晚上呼吸消耗排放 CO_2 。白天水稻进行光合作用吸收 CO_2 ,吸收峰值约出现在正午时刻;夜间以呼吸作用为主排放 CO_2 ,夜间变化较平缓。中稻大田生育期内总体表现为碳汇。

$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。9 月水稻进入成熟期,叶片逐步老化,功能叶呈减少趋势,光合固碳能力也相应降低, CO_2 吸收能力减弱, $F_{c\min}$ 为 $-7.96 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,出现在 12:00,夜间 F_c 均值为 $3.32 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。 CO_2 通量日平均最大值出现在 7 月,为 $-2.48 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,日平均最小值出现在 9 月,为 $-0.36 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

3.2 不同生育时期的碳通量日变化动态

中稻大田生育期可以分为分蘖盛期(移栽后第

18 天)、孕穗期(移栽后第 45 天)、齐穗期(移栽后第 75 天)、灌浆中期(移栽后第 88 天)、成熟期(移栽后第 101 天)5 个主要生育时期。分别选取当天及前后各 3 d 的 CO_2 通量数据,并对同一时刻的数据进行平均,得到 CO_2 通量在不同生育期内的平均日变化曲线(图 2)。从图 2 可以看出,中稻不同生育期 CO_2 通量的日变化规律较为一致,均呈“U”形单峰曲线,夜晚通量值为正,白天通量值为负,白天 CO_2 通量值在 12:00 左右达到最低值。

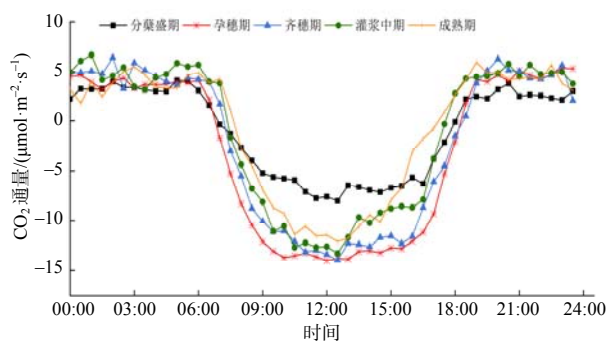


图 2 水稻不同生育期间 CO_2 通量的平均日变化

Fig.2 Average daily variation of carbon flux during the five growth periods of rice

在分蘖盛期时,水稻植株较小,光合能力相对较弱,碳吸收量较低。 CO_2 通量在 07:00 左右变为负值,在 18:30 左右变为正值,日最大吸收碳通量出现在 12:30,为 $-8.03 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。在孕穗期、齐穗期时,水稻进入生长旺盛期,植株光合能力增强, CO_2 通量增加,最高碳吸收量分别出现在 12:00 和 12:30,日最大吸收碳通量分别为 -14.00 、 $-13.93 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。在灌浆中期、成熟期时,水稻进入生育后期,叶片变黄并逐渐衰老,植株光合作用较中期减弱,碳通量相对降低,灌浆中期和成熟期日最

大吸收碳通量均出现在 12:30,分别为 -13.27 、 $-12.09 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。由图 3 可知,水稻不同生育期的固碳能力有所不同,孕穗期、齐穗期、灌浆中期、分蘖盛期、成熟期依次减弱,平均 CO_2 通量累积量分别为 -3.13 、 -2.22 、 -1.20 、 -0.95 、 $-0.81 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。孕穗期对干物质积累和产量贡献最大,其后依次为齐穗期、灌浆中期、分蘖盛期、成熟期。

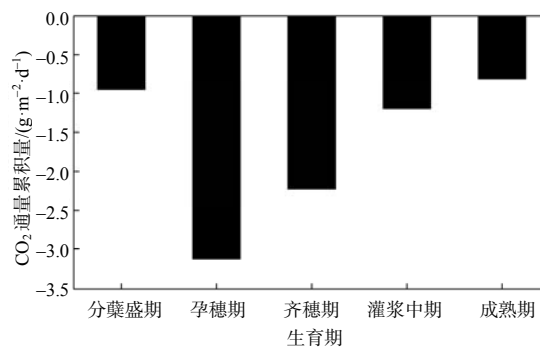


图 3 不同生育时期日平均碳通量累积量

Fig.3 Average daily carbon flux accumulation in different growth periods

3.3 NEE、GPP、Reco 的动态变化

分析 6 月 8 日至 9 月 25 日间的碳通量数据,发现水稻的 NEE、GPP 和 Reco 表现出明显的季节动态(图 4)。稻田 NEE 整体表现为碳吸收,除少数几天外,NEE 均为负值。NEE 总体呈“U”形曲线变化,存在 2 个明显的吸收峰,出现在水稻生长前期和生长后期。受叶片同化作用影响,水稻碳吸收能力较弱,到 7 月下旬达到最大值,为 $-3.89 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,之后逐渐降低。中稻大田生育期内 NEE 总量为 $-173.93 \text{ g}/\text{m}^2$ 。说明湘中地区中稻表现出较强的碳汇功能。

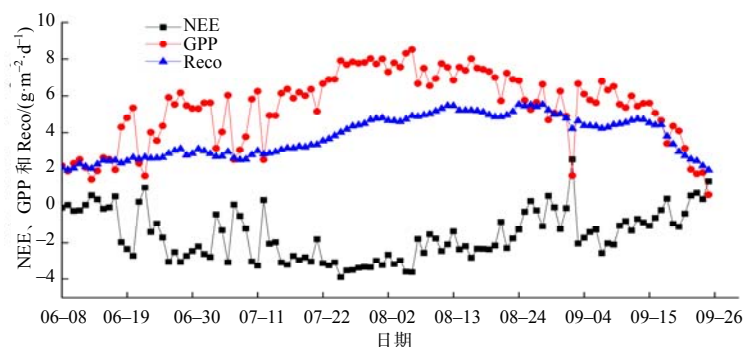


图 4 NEE、GPP 和 Reco 的动态变化

Fig.4 Dynamic changes of net ecosystem exchange, gross primary productivity and ecosystem respiration

GPP 的总体趋势呈倒“U”形曲线,与 NEE 的变化趋势相反。由于水稻的生长发育,植株不断增长,地上生物量不断增加,随着气温升高以及光合有效辐射的增强,GPP 逐渐上升,在 8 月 6 日达到最大值,为 $8.52 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,整个生育期的总初级生产力 GPP 为 $587.62 \text{ g}/\text{m}^2$ 。

Reco 变化曲线呈现偏锋特征。7—8 月温度高,呼吸量也高,Reco 最高值为 $5.47 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,出现在 8 月 12 日。整个水稻生长季内生态系统呼吸量为 $413.68 \text{ g}/\text{m}^2$ 。

4 结论与讨论

本研究中,采用涡度相关技术对湘中地区中稻农田生态系统的碳通量进行了连续观测,结果表明,中稻大田生育期碳通量变化具有明显的时间特征。在日尺度上,表现为夜间高、白天低、正午达到最低谷的趋势,即夜间表现为碳排放,白天表现为碳吸收,呈“U”形单峰曲线变化,差异主要体现在“U”形曲线的变化幅度。这与植物光合作用规律吻合,也与前人^[24-26]的研究成果一致。在月份尺度上, CO_2 通量日平均最大值出现在 7 月生长旺盛期,为 $-2.48 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, CO_2 通量日平均最小值出现在 9 月生长后期,为 $-0.36 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。在生育期尺度上,5 个主要生育期中稻生态系统均表现为碳吸收,不同生育期的固碳能力有所不同,孕穗期、齐穗期、灌浆中期、分蘖盛期、成熟期的平均 CO_2 通量累积量依次降低。不同生育阶段的日净碳交换量从分蘖期开始上升,孕穗期达到最高峰,之后逐渐下降,这与朱咏莉等^[14]、成小琳等^[27]的研究结果一致。 CO_2 通量日平均最大值为 $-3.13 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,出现在孕穗期, CO_2 通量日平均最小值为 $-0.81 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,出现在成熟期,说明孕穗期对产量贡献最大,成熟期对产量贡献较小,这与水稻生长的干物质积累的规律相吻合。中稻大田生育期内 NEE、GPP 和 Reco 的变化曲线分别呈现出“U”形、倒“U”形和偏锋特征,净碳交换为 $-173.93 \text{ g}/\text{m}^2$,总初级生产力为 $587.62 \text{ g}/\text{m}^2$,碳排放为 $413.68 \text{ g}/\text{m}^2$ 。但低于李琪等^[28]对中稻生长期的观测结果,也低于宋涛等^[29]对单季稻的观测结果。这可能是由于地域、气候、水稻品种、田间管理方式、数据采集方法等的不同带来的差异。学界

利用涡度相关技术对双季稻、稻麦两熟、小麦—玉米轮作等模式研究较多^[1,5-6],对稻—油两熟农田生态系统研究相对较少。但近年长江中下游地区中稻—油菜种植模式^[30]发展迅速,针对这一种植模式下的碳交换研究,对于实现农业可持续发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] 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[J].生态学报,2015,35(20): 6655–6665.
XU X B, YANG G S, SUN X X. Analysis of net ecosystem CO_2 exchange(NEE) in the rice-wheat rotation agroecosystem of the Lake Taihu Basin, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(20): 6655–6665.
- [2] 刘昱,陈敏鹏,陈吉宁.农田生态系统碳循环模型研究进展和展望[J].农业工程学报,2015,31(3): 1–9.
LIU Y, CHEN M P, CHEN J N. Progress and perspectives in studies on agro-ecosystem carbon cycle model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(3): 1–9.
- [3] 薛红喜,李峰,李琪,等.基于涡度相关法的中国农田生态系统碳通量研究进展[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2012,4(3): 226–232.
XUE H X, LI F, LI Q, et al. Research progress on carbon flux over agro-ecosystem based on the eddy covariance method in China[J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology(Natural Science Edition), 2012, 4(3): 226–232.
- [4] 杭晓宁,张健,胡留杰,等.2006—2015年重庆市农田生态系统碳足迹分析[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2018,44(5): 524–531.
HANG X N, ZHANG J, HU L J, et al. Analysis of carbon footprints in farmland ecosystem of Chongqing city 2006–2015[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2018, 44(5): 524–531.
- [5] 俄有浩,霍治国,赵花荣,等.华北平原农田 CO_2 浓度变化特征[J].生态学报,2020,40(18): 6613–6620.
E Y H, HUO Z G, ZHAO H R, et al. Variation characteristics of atmospheric CO_2 concentration in farmland of North China Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6613–6620.
- [6] 孙小祥,常志州,杨桂山,等.长三角地区稻麦轮作生态系统净碳交换及其环境影响因子[J].中国生态农业学报,2015,23(7): 803–811.
SUN X X, CHANG Z Z, YANG G S, et al. Characteristics of net ecosystem exchange and environmental factors of rice-wheat rotation system in the

- Yangtze River Delta of China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(7): 803–811.
- [7] 魏甲彬, 徐华勤, 周玲红, 等. “双季稻-冬闲田”生态系统碳交换动态变化及其影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(5): 1035–1044.
- WEI J B, XU H Q, ZHOU L H, et al. Seasonal variation in carbon exchange and its modulating factors of a double cropping rice ecosystem in Southern China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(5): 1035–1044.
- [8] 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏. 中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)的主要进展及发展展望[J]. 地理科学进展, 2014, 33(7): 903–917.
- YU G R, ZHANG L M, SUN X M. Progresses and prospects of Chinese terrestrial ecosystem flux observation and research network(ChinaFLUX)[J]. Progress in Geography, 2014, 33(7): 903–917.
- [9] 田容才, 文双雅, 阳会兵. 基于涡度相关法的农田生态系统碳通量研究进展[J]. 激光生物学报, 2019, 28(5): 415–420.
- TIAN R C, WEN S Y, YANG H B. Research progress on carbon flux in agro-ecosystem based on eddy covariance system[J]. Acta Laser Biology Sinica, 2019, 28(5): 415–420.
- [10] SAITO M, MIYATA A, NAGAI H, et al. Seasonal variation of carbon dioxide exchange in rice paddy field in Japan[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 135(1/2/3/4): 93–109.
- [11] VERMA S B, DOBERMANN A, CASSMAN K G, et al. Annual carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize-based agroecosystems[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 131(1/2): 77–96.
- [12] MOUREAUX C, DEBACQ A, BODSON B, et al. Annual net ecosystem carbon exchange by a sugar beet crop[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 139(1/2): 25–39.
- [13] 张蕾, 孙睿, 乔晨, 等. 张掖灌区玉米农田生态系统 CO₂ 通量的变化规律和环境响应[J]. 生态学杂志, 2014, 33(7): 1722–1728.
- ZHANG L, SUN R, QIAO C, et al. Variation of CO₂ flux and its response to environmental factors in a maize agroecosystem in Zhangye irrigation area[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(7): 1722–1728.
- [14] 朱咏莉, 吴金水, 童成立, 等. 稻田 CO₂ 通量对光强和温度变化的响应特征[J]. 环境科学, 2008, 29(4): 1040–1044.
- ZHU Y L, WU J S, TONG C L, et al. Responses of CO₂ fluxes to light intensity and temperature in rice paddy field[J]. Environmental Science, 2008, 29(4): 1040–1044.
- [15] WILCZAK J M, ONCLEY S P, STAGE S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms[J]. Boundary-layer Meteorology, 2001, 99: 127–150.
- [16] KAIMAL J C, GAYNOR J E. Another look at sonic thermometry[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1991, 56(4): 401–410.
- [17] MOORE C J. Frequency response corrections for eddy correlation systems[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1986, 37(1/2): 17–35.
- [18] LI J, YU Q, SUN X M, et al. Carbon dioxide exchange and the mechanism of environmental control in a farmland ecosystem in North China Plain[J]. Science in China(Series D: Earth Sciences), 2006, 49(S2): 226–240.
- [19] 张弥, 温学发, 于贵瑞, 等. 二氧化碳储存通量对森林生态系统碳收支的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1201–1209.
- ZHANG M, WEN X F, YU G R, et al. Effects of CO₂ storage flux on carbon budget of forest ecosystem[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(5): 1201–1209.
- [20] 陈云飞, 江洪, 周国模, 等. 人工高效经营雷竹林 CO₂ 通量估算及季节变化特征[J]. 生态学报, 2013, 33(11): 3434–3444.
- CHEN Y F, JIANG H, ZHOU G M, et al. Estimation of CO₂ fluxes and its seasonal variations from the effective management Lei bamboo(*Phyllostachys violascens*)[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(11): 3434–3444.
- [21] 孙成, 江洪, 周国模, 等. 我国亚热带毛竹林 CO₂ 通量的变异特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(10): 2717–2724.
- SUN C, JIANG H, ZHOU G M, et al. Variation characteristics of CO₂ flux in *Phyllostachys edulis* forest ecosystem in subtropical region of China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(10): 2717–2724.
- [22] KATUL G, LAI C T, SCHÄFER K, et al. Multiscale analysis of vegetation surface fluxes: from seconds to years[J]. Advances in Water Resources, 2001, 24(9/10): 1119–1132.
- [23] MASSMAN W J, LEE X. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2002, 113(1): 121–144.
- [24] 王进, 白洁, 陈曦, 等. 新疆绿洲覆膜滴灌棉田碳通量特征研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 70–78.
- WANG J, BAI J, CHEN X, et al. Carbon fluxes in cotton field with plastic mulched drip irrigation in Xinjiang oasis[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 70–78.

- tional Journal of Molecular Sciences, 2016, 17(11): 1798.
- [20] 王云霞, 张萍, 葛蓓蕾, 等. 不同生育期卷丹百合的多酚积累特性及其抗氧化活性[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2020, 46(5): 565–573.
WANG Y X, ZHANG P, GE P L, et al. Polyphenol accumulation characteristics and antioxidant activity of *Lilium lancifolium* at different growth stages[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2020, 46(5): 565–573.
- [21] OZCARIZ-FERMOSELLE M V, FRAILE-FABERO R, GIBBÉS-JUAN T, et al. Use of lignocellulosic wastes of pecan(*Carya illinoensis*) in the cultivation of *Ganoderma lucidum*[J]. Revista Iberoamericana de Micología, 2018, 35(2): 103–109.
- [22] 刘冬, 李世敏, 许柏球, 等. 灵芝菌丝体深层液体发酵培养基研究[J]. 微生物学杂志, 2001, 21(2): 15–17.
- LIU D, LI S M, XU B Q, et al. Study on submerged liquid fermentation medium of *Ganoderma lucidum* mycelium [J]. Journal of Microbiology, 2001, 21(2): 15–17.
- [23] 潘继红, 曹霞, 李峰, 等. 灵芝液体培养营养需求的探讨[J]. 食用菌学报, 1997, 4(1): 31–34.
PAN J H, CAO X, LI F, et al. Discussion on the nutritional requirements of *Ganoderma lucidum* liquid culture[J]. Acta Edulis Fungi, 1997, 4(1): 31–34.
- [24] 孙培龙, 陶文扬, 何晋浙. 灵芝中三萜类化合物的研究进展[J]. 食药菌, 2016, 24(2): 76–81.
SUN P L, TAO W Y, HE J Z. Research progress of triterpenoids in *Ganoderma lucidum*[J]. Edible and Medicinal Mushrooms, 2016, 24(2): 76–81.
- 责任编辑: 毛友纯
英文编辑: 柳 正

(上接第 621 页)

- [25] 曹元元, 王娟, 王建林. 玉米农田生态系统水碳通量日变化特征研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(9): 137–141.
CAO Y Y, WANG J, WANG J L. Diurnal change characteristics of H₂O and CO₂ flux of corn farmland ecosystem[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(9): 137–141.
- [26] 蔡旭, 张风华, 杨海昌. 新疆高产棉田生态系统 NEE 变化及其影响因素[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(7): 59–64.
CAI X, ZHANG F H, YANG H C. Net ecosystem exchange changes of agricultural ecosystem and its influencing factors in Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(7): 59–64.
- [27] 成小琳, 唐先亮, 魏甲彬, 等. 不同耕作模式下稻-油系统 CO₂ 和 CH₄ 净交换量动态变化研究[J]. 作物研究, 2017, 31(2): 110–114.
CHENG X L, TANG X L, WEI J B, et al. Effects of different tillage methods on CO₂ and CH₄ net exchange in rice-oilseed rape cropping system[J]. Crop Research, 2017, 31(2): 110–114.
- [28] 李琪, 胡正华, 薛红喜, 等. 淮河流域典型农田生态系统碳通量变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2545–2550.
- LI Q, HU Z H, XUE H X, et al. Variation of net ecosystem carbon flux over typical agro-ecosystem in Huaihe River Basin[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(12): 2545–2550.
- [29] 宋涛, 王跃思, 宋长春, 等. 三江平原稻田 CO₂ 通量及其环境响应特征[J]. 中国环境科学, 2006, 26(6): 657–661.
SONG T, WANG Y S, SONG C C, et al. CO₂ fluxes from rice fields of Sanjiang plain and its environmental response factors[J]. China Environmental Science, 2006, 26(6): 657–661.
- [30] 彭志芸, 丁峰, 湛洁, 等. 麦油稻轮作秸秆还田与施氮对水稻光合特性及产量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2020, 46(3): 253–261.
PENG Z Y, DING F, SHEN J, et al. Effects of straw mulching and nitrogen management on photosynthetic characteristics and yield of direct seeding rice under wheat rape rice rotation[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2020, 46(3): 253–261.
- 责任编辑: 毛友纯
英文编辑: 柳 正