

洱海湖滨农田生态系统的碳收支评估

彭娟^{1,2,3,4}, 徐安伦^{1,2,3,4*}, 李育^{1,2,3,4}, 杨澄^{1,2,3,4}, 张国涛^{1,2,3,4}, 杜群⁵

- 1 中国气象局横断山区（低纬高原）灾害性天气研究中心，云南昆明 650034；
- 2 大理国家气候观象台，云南大理 671003；
- 3 中国气象局大理山地气象野外科学试验基地，云南大理 671003；
- 4 大理山地气象云南省野外科学观测研究站，云南大理 671003；
- 5 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室，北京 100029

摘要 本研究旨在探讨洱海湖滨农田生态系统在水稻-蚕豆轮作模式下 CO₂ 通量的变化特征，明确轮作条件下农田生态系统碳源/汇功能的贡献，以期为该地区农田碳循环机制的评估、农业生产管理的优化及气候变化的应对策略提供科学依据。研究采用涡动相关技术对该农田生态系统进行长达 6 年的连续观测，同时收集相关气象数据，分析气象要素对 CO₂ 通量的潜在影响。研究发现：（1）水稻生长季与蚕豆生长季的气象条件存在明显差异。水稻生长季为高气温（Ta）和高相对湿度（RH），饱和水汽压差（VPD）初期下降后趋于平稳，太阳总辐射（Rg）波动显著，而风速（WS）和摩擦速度（u*）呈下降趋势。蚕豆生长季则表现为 Ta 先降后升，RH 逐渐下降，VPD 和 Rg 上升，WS 和 u* 则先升后降。（2）CO₂ 通量表现出显著的日变化和季节变化特征。日尺度上 CO₂ 通量呈典型的“U”型变化；季节尺度上呈“W”型变化。CO₂ 通量峰值出现在水稻的拔节和抽穗期，以及蚕豆的结荚至鼓粒期。（3）小时尺度上 CO₂ 通量变化的主控因子是 Rg，日尺度上的主控因子是 RH。（4）水稻-蚕豆轮作农田生态系统总体表现为碳汇，水稻生长季的固碳能力显著高于蚕豆生长季，约为蚕豆的 3.5 倍。水稻生长季因其较强的固碳能力，成为该生态系统碳汇功能的主要贡献者。

关键词 涡动相关技术 水稻 蚕豆 CO₂ 通量 碳收支 轮作

文章编号 2024072B

中图分类号 P404

文献标识码 A

Doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2409.24072

Carbon budget assessment of lakeside farmland ecosystem in Erhai Lake

PENG Juan^{1,2,3,4}, XU Anlun^{1,2,3,4*}, LI Yu^{1,2,3,4}, YANG Cheng^{1,2,3,4}, ZHANG Guotao^{1,2,3,4}, DU Qun⁵

1 Research Center for Disastrous Weather over Hengduan Mountains & Low-Latitude Plateau, China Meteorological Administration, Kunming 650034, Yunnan, China;

2 Dali National Climate Observatory, Dali 671003, Yunnan, China;

3 Dali Mountain Meteorological Field Experiment Base, China Meteorological Administration, Dali 671003, Yunnan, China;

收稿日期 2024-12-30; **网络预出版日期** - -

作者简介 彭娟（1994 年—），女，贵州罗甸人，助理工程师，主要从事天气预报服务及山地气象观测和研究。Email: 1127384075@qq.com

通信作者 徐安伦（1981 年—），男，云南宣威人，正研级高级工程师，主要从事复杂地形区大气边界层、大气湍流及陆面过程研究。Email: xualun@126.com

资助项目 云南省科技厅科技计划项目 202305AM070004, 云南基层台站气象科技创新与能力提升计划项目 STIAP202337, 中国气象局创新发展专项 CXFZ2023J047、CXFZ2023P053, 云南省“兴滇人才支持计划”青年人才专项, 云南省气象局创新团队项目 2022CX03、2022CX05、2022CX08、2022QN06, 大理州气象局创新团队项目 DLCX202302

4 Dali Mountain Meteorology Observation and Research Station of Yunnan Province, Dali 671003, Yunnan, China;

5 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry (LAPC), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract This study aims to explore the characteristics of CO₂ flux in the Erhai Lake coastal farmland ecosystem under rice-broad bean rotation mode, and to clarify the contribution of carbon source/sink function in the farmland ecosystem under the crop rotation condition, as well as in order to provide scientific basis for the assessment of the carbon cycle mechanism, optimization of agricultural production management and coping strategies with climate change in the region. The eddy covariance technology is used to continuously observe the farmland ecosystem for 6 years, and relevant meteorological data are collected to analyze the potential influence of meteorological elements on CO₂ flux. The results show that: (1) There are significant differences in climatic conditions between the rice growing season and the broad bean growing season. The rice growing season is characterized by high air temperature (Ta) and high relative humidity (RH), with the saturation vapor pressure deficit (VPD) initially decreasing and then stabilizing, the total solar radiation (Rg) fluctuating significantly, while wind speed (WS) and friction velocity (u*) show a declining trend. The broad bean growing season is characterized by a decrease and then an increase in Ta, a gradual decrease in RH, an increase in VPD and Rg, and first increase and then decrease in WS and u*. (2) The CO₂ flux display significant diurnal and seasonal variations. On a daily scale, the CO₂ flux shows a typical U-shaped change, and it shows a W-shaped change on a seasonal scale. The peak of CO₂ flux occurs during the jointing and earing stages of rice, and during the pod setting to the grain filling stage of broad bean. (3) On an hourly scale, the main controlling factor of CO₂ flux change is Rg, and on a daily scale, the main controlling factor is RH. (4) The rice-broad bean crop rotation farmland ecosystem is generally a carbon sink, with the carbon fixation capacity of the rice growing season significantly higher than that of the broad bean growing season, about 3.5 times that of broad bean. The rice growing season is the main contributor to the carbon sink function of the ecosystem because of its strong carbon fixation capacity.

Key words Eddy covariance technique, Rice, Broad bean, CO₂ flux, Carbon budget, Crop rotation

1 引言

全球气温变暖的趋势仍在继续，未来几十年的变暖速度可能会进一步加快（叶笃正等，2002；朱连奇，2011）。大气中二氧化碳的浓度显著增加，据资料统计，1750年二氧化碳的浓度为 $2.77 \times 10^{-8} \text{ mol mol}^{-1}$ ，到2010年二氧化碳浓度上升了约47%，达到 $4.07 \times 10^{-8} \text{ mol mol}^{-1}$ （王慧等，2015）。全球气候变暖对陆地生态系统产生显著影响，不同类型陆地生态系统对气候变化的响应速度和方式存在差异。一些研究表明，减少碳排放、增加碳汇有利于减缓气候变暖的趋势（康霞，2018），以低能耗、低污染、低排放为特征的低碳经济已经成为全球性的科学议题。陆地生态系统在碳平衡和碳循环中起着十分重要的作用，而农田生态系统是陆地生态系统的一个重要组成部分，也是受人类活动影响最强烈的生态系统，它对大气碳含量的影响是不可忽视的（赵荣钦和秦明周，2007）。因此农业碳中和不仅是一种创新的农业理念和模式，也将是工业生产二氧化碳用于农业生产的有效手段（王玉英等，2022），农田生态系统的碳通量研究也成为了学者们的研究热点之一。2020年国家自然科学基金委员会在大气科学学科申

请代码中设立了生态气象，在王雪梅等（2023）人的解读中就强调了生态气象受到科学家和政府的高度关注和重视，其中大气变化的生态效应这个方向就包含陆地生态系统的碳源/汇研究。定量了解不同区域农田生态系统的碳源/汇特征及其差异变化，是准确评估农田生态系统碳收支的首要前提（康霞，2018；潘竞虎等，2010）。基于观测开展农田生态系统的碳交换特征，不仅有助于我们深入理解农业生态系统碳循环的过程和机制，还有助于我们制定更合理有效的碳减排和碳增汇策略，以应对全球气候变化带来的挑战。

目前的研究中，对于陆地生态系统碳源汇功能的研究区域多集中在城市、森林、草地、荒漠等下垫面，且集中在沿海地区（徐敏等，2022）、山东省、江苏省、华北平原（吴东星等，2017a，2018）等地区；农田生态系统由于作物种类多样、生产管理方式不同，其碳交换特征存在显著差异。已经有很多学者开展了单一种植作物农田生态系统的研究，比如水稻农田（朱咏莉等，2007a，2007b；王尚明等，2011；杨智等，2013）、小麦农田（李双江等，2007；王雯，2013；郭强，2014；史桂芬等，2020）、玉米农田（郭建侠等，2007；梁涛等，2012；王晓娇，2021）等；这些研究结果表明，农田生态系统在生长季内碳通量一般呈单峰 U 型的日变化（宋涛等，2006；谢五三等，2009；俄有浩等，2020），各季的每日 CO₂ 通量总量总体趋势表现为春季>夏季>冬季>秋季（伍琼等，2009；韩云芳等，2013）。农田生态系统的影响因子也比较复杂，土壤温度（叶昊天等，2022）、空气温度（冯敏玉等，2008；曾凯等，2009）、水分和光照（张永强等，2002）对农田碳水通量具有重要影响，除了环境因素外，农作物本身特性（作物种类、品种、生长阶段等）、下垫面特征（土壤含水量、结构、质地等）和农艺管理措施（灌溉、施肥耕作等）等也是影响研究的重要因素（赵荣钦等，2004；Jans et al., 2010；Bai et al., 2015；Gao et al., 2017）。目前在农田生态系统开展碳通量观测常用的观测方法主要有涡动相关法、空气动力学法（梯度法）、静态（动态）气室—红外 CO₂ 分析仪法。涡动相关法是地—气能量和物质通量观测中应用最广泛也是最可靠的方法之一，它能直接测定地表与大气间的 CO₂ 通量，其优点还包括理论论证完善、观测精度高和连续稳定等（Smith et al., 2010）。

综上所述，研究农田生态系统的碳通量对于了解特定种植模式下的碳源/汇变化规律、评估种植模式对碳循环的影响以及预测未来气候变化具有重要意义，目前对于我国西南地区亚热带农田生态系统的研究较少，对轮作种植模式研究也较少。在杨怀钦等（2012）人的研究中，明确了水稻-蚕豆种植模式是洱海流域具有代表性的种植模式之一，因此，本研究对地处云南省大理市的洱海湖滨水稻-蚕豆轮作农田生态系统开展碳通量的长期连续观测，基于 2007-2012 年的观测数据分析水稻-蚕豆轮作农田生态系统不同时间尺度碳通量的变化特征，定量评估水稻和蚕豆农田固碳能力，明确影响水稻、蚕豆轮作模式下农田生态系统碳通量的主要影响因子，系统性地揭示该轮作模式下农田生态系统的 CO₂ 通量动态变化规律，对于理解农业活动对区域碳循环的影响至关重要。

2 数据与方法

2.1 数据来源和仪器介绍

文中使用数据来自大理国家气候观象台近地层通量观测系统。该系统观测铁塔高 20 m，在铁塔 5.08 m 处布设了涡动相关仪(由三维超声风速仪 CSAT3、开路式 H₂O/CO₂ 分析仪 LI-7500 组成)，测量高频 (10 Hz) 的三维风速、超声虚温、气压、H₂O 和 CO₂ 密度，利用涡动相关法计算 CO₂ 通量，其计算公式见式 (1)。该系统还包括 4 层 (铁塔 2、4、10 和 20 m 高度) 风温湿、5 层 (4、10、20、60 和 100 cm) 土壤温湿度、3 层 (4、10、20 cm) 土壤热通量、单层 (1.5 m 高度) 辐射四分量 and 红外温度等要素的观测。

$$F_c = \rho \overline{w'c'} \quad (1)$$

式中， F_c 为二氧化碳通量 ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)； ρ 为空气密度 (kg m^{-3})。

文中所使用的数据为 2007-2012 年水稻-蚕豆轮作时期观测得到 (图 1)，水稻移栽后生长期在 5-9 月，蚕豆生长期在 10 月-次年 4 月，2007-2012 年水稻和蚕豆各个生育期的平均日期如表 1 所示。



图 1 水稻 (a) 和蚕豆 (b) 轮作下近地层通量观测系统。

Fig. 1 Near-surface layer flux observation system under rice (a) and broad bean (b) rotation.

表 1 2007-2012 年洱海湖滨农田生态系统水稻和蚕豆的平均生育期日期 (月-日)

Table 1 Average growth dates from 2007 to 2012 of rice and broad bean in lakeside farmland ecosystem in Erhai Lake (month-day)

	移栽	返青	分蘖	拔节	孕穗	抽穗	乳熟	成熟
水稻	5-19	5-24	6-4	7-8	7-18	7-31	8-29	9-21
蚕豆	播种	出苗	三真叶	分枝	开花	结荚	鼓粒	成熟
	10-18	10-28	11-5	11-14	1-16	2-14	3-29	4-21

2.2 通量数据处理

在数据观测和采集的过程中，各种外部和内部因素往往会导致数据出现丢失或异常现象，这些因素包括但不限于天气状况、电力中断、仪器故障，以及人为维护的影响等，据统计，1年的观测数据中大约有 17%-50% 的数据会因为这些问题而缺失和被剔除（Falge et al., 2001; Desai et al., 2008）。因此对原始数据进行预处理成为数据处理流程中不可或缺的一环，是确保数据质量和可靠性的重要前提，通过预处理步骤识别和纠正数据中的错误、异常和缺失值，从而提高数据的完整性和准确性。

2.2.1 涡动相关通量数据处理

首先，采用美国 Campbell Scientific 公司开发的 Card Convert 工具，将 10 Hz 原始湍流数据分割成每 30 min 一个数据文件。然后，使用美国 LI-COR 公司开发的 EddyPro 软件进行数据质量控制、通量计算和质量评价，通量计算的平均时间为 30 min。在使用 EddyPro 软件时，选择高级模式，数据质量控制处理包括二次坐标轴旋转、时间延迟修正、WPL 修正（Webb et al., 1980）等，质量评价选择 Mauder 和 Foken（2004）提出的 0-1-2 评价方法，分别代表高、中、低三个质量等级。最后，根据降水资料，剔除有降水时段的 30 min 通量数据。通过以上数据处理和质量评价可知，2007-2012 年对洱海湖滨农田生态系统观测的 CO₂ 通量数据总体质量较好，质量为高、中两个等级的数据占比高达 83.6%。此外，利用 2007-2012 年期间的日平均感热、潜热、净辐射和土壤热通量数据计算了能量闭合率（图略），其值约为 0.87，表明观测的涡动相关通量数据可靠性较好。

2.2.2 空缺数据填补处理

采用美国 RStudio 公司开发的 RStudio 软件和德国马普研究所开发的 R 语言包 REddyProc 进行插补处理。REddyProc 包具有确定摩擦速度阈值、空缺数据插补和碳通量拆分功能。利用 REddyProc 包对空缺通量数据插补分 3 种条件：①仅通量数据空缺，气象数据完整；②气温（Ta）或饱和水汽压差（VPD）空缺，而太阳总辐射数据（R_g）完整；③所有气象数据空缺。针对第 1 种条件，选取 7 天时间窗口内相似气象条件（用太阳总辐射、气温和水汽压差来确定，其偏差不超过 50 W m⁻²，2.5 °C，5.0 hPa）来填补。如果 7 天时间窗口内气象条件不满足，选取 14 天时间窗口。针对第 2 种条件，选取 7 天时间窗口内太阳总辐射偏差小于 50 W m⁻² 的数据来填补。针对第 3 种条件，采用平均日变化法，选取相同时段的平均值来填补。时间窗口一般从 0.5 天开始。如果此步不成功，逐步扩大时间窗口来进行填补，直到插补完成。数据插补完成后，根据插补方法和时间窗口对数据给出了 4 个等级（“0, 1, 2, 3”），其中 0 为原始数据，1 为值得信赖数据，2 为中等数据，3 为可疑数据。

2.2.3 生态系统总初级生产力（GPP）和总呼吸（R_{eco}）的计算方法

净生态系统碳通量 *NEE*（Net Ecosystem Exchange）与 *GPP* 和 *R_{eco}* 三者的关系为：

$$NEE = R_{eco} - GPP \quad (2)$$

目前有两种方法实现碳通量的拆分，基于夜间的通量拆分（Reichstein et al., 2005）主要是假设夜间净生态系统碳通量仅由呼吸作用决定且总呼吸只与温度存在一定关系（式（3）），通过分析夜间净生态系统碳通量对温度的响应变化曲线，推出白天植被的呼吸作用变化，随后根据关系式（2）计算出总初级生产力；基于白天的通量拆分（Lasslop et al., 2009）较为复杂，白天净生态系统碳通量与太阳总辐射的关系是多种因素的综合影响，包括太阳总辐射与饱和水汽压差对总初级生产力的影响和温度对总呼吸的影响（式（4））。

$$R_{eco}(T) = R_{eco,ref} e^{E_0(1/(T_{ref}-T_0)-1/T-T_0)} \quad (3)$$

$$NEE = \alpha\beta Rg / (\alpha Rg + \beta) + R_b e^{E_0(1/T_{ref}-T_0-1/T-T_0)} \quad (4)$$

3 结果与分析

3.1 气象要素的变化特征

图 2 为 2007-2012 年洱海湖滨农田生态系统水稻和蚕豆两种作物生长期气象要素日平均的逐日变化特征，水稻生长季期间气温（ T_a ）和相对湿度（RH）整体较高，变化幅度小，饱和水汽压差（VPD）呈现前期下降后期较平稳的变化趋势，太阳总辐射（ R_g ）变化波动较为明显，风速（WS）和摩擦速度（ u^* ）整体呈弱的下降趋势；蚕豆生长季期间气象要素变化与水稻生长季差别较大，前期 T_a 和 RH 呈下降趋势，中后期 T_a 上升，RH 相对稳定，VPD 则呈现出上升趋势， R_g 波动也较为明显但呈现上升趋势，WS 和 u^* 整体较高，呈现先增强后减弱的趋势。表 2 为 2007-2012 年水稻和蚕豆生长季气象要素日平均的变化范围，水稻生长季气象要素的变化幅度相对于蚕豆生长季期间较小， T_a 、RH 和 R_g 均值高于蚕豆生长季，VPD、WS 和 u^* 均值低于蚕豆生长季。结合表 2 和图 2，对比水稻和蚕豆作物农田生态系统各气象要素，无论是变化范围还是变化特征都存在较大差异，考虑整个环境气象要素的变化趋势主要还是由季节变化等较大尺度影响因素主导。

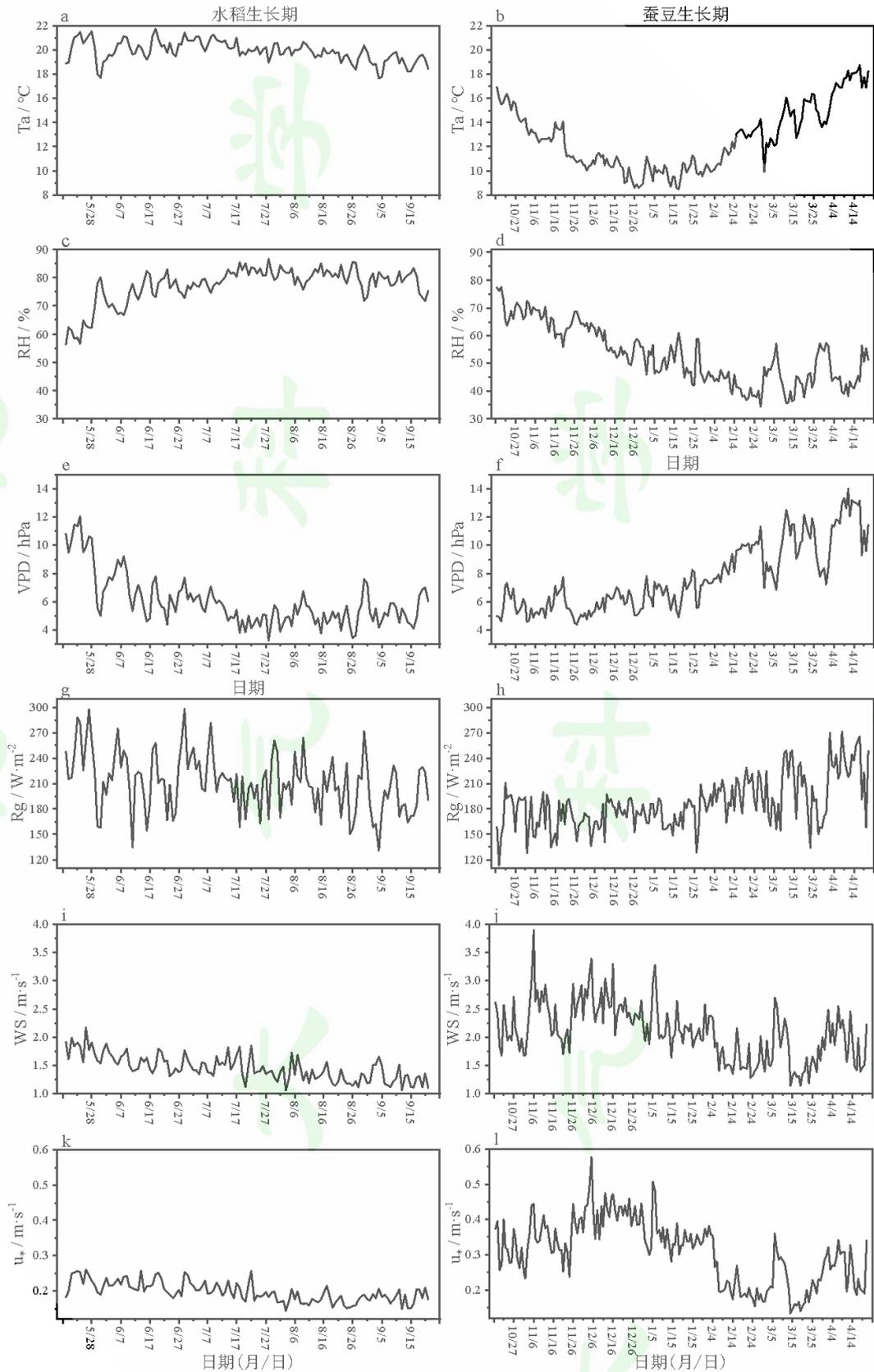


图 2 2007-2012 年洱海湖滨农田生态系统水稻和蚕豆生长季气象要素日平均的逐日变化。

Fig. 2 Daily average variation of meteorological elements in the growing season of rice and broad bean in the lakeside farmland ecosystem in Erhai Lake from 2007 to 2012.

表 2 2007-2012 年洱海湖滨农田生态系统水稻和蚕豆生长季气象要素日平均的变化范围

Table 2 Variation range of daily average meteorological elements in the growing season of rice and broad bean in the lakeside farmland ecosystem in Erhai Lake from 2007 to 2012

气象因子	水稻		蚕豆	
	变化范围	平均值	变化范围	平均值
气温 / $^{\circ}\text{C}$	17.7-21.8	19.9	8.5-18.7	12.7
相对湿度 /%	56.4-86.7	77.2	34.3-77.4	52.8
饱和水汽压差 /hPa	3.2-12.1	6.0	4.4-14.0	7.7
太阳总辐射 / W m^{-2}	130.6-298.5	211.7	113.1-271.1	186.8
风速 / m s^{-1}	1.06-2.17	1.46	1.14-3.89	2.09
摩擦速度 / m s^{-1}	0.14-0.26	0.20	0.13-0.58	0.31

3.2 洱海湖滨农田生态系统 CO_2 通量的变化

生态系统 CO_2 通量反映了土壤、植被和大气间二氧化碳的交换强度。当植被的光合作用强度大于土壤和植被的呼吸作用强度时，植被对 CO_2 起到了吸收作用，导致从土壤和植被向大气释放的 CO_2 减少，通量为负；反之土壤、植被的呼吸强度大于光合作用强度时，植被和土壤释放更多的 CO_2 到大气中，通量为正。

图 3 为 2007-2012 年洱海湖滨农田生态系统 CO_2 通量日平均值的逐日变化特征。可以看到，在水稻—蚕豆轮作农田生态系统 CO_2 通量的日变化存在显著的季节变化，呈现出明显的“单峰双谷”（W）型变化，这与徐敏等（2022）、文双雅等（2022）研究两熟农田生态系统结果一致，即两个主要吸收期和一个主要排放期。低谷为水稻和蚕豆的生长季，单峰则出现在水稻收获之后至蚕豆播种之前的茬口期，低谷主要是因为农作物通过光合作用固定了大量的 CO_2 。

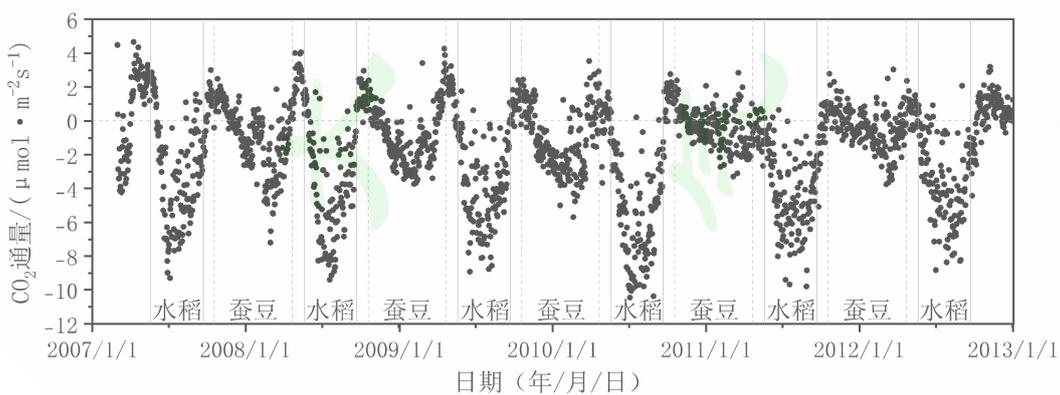


图 3 2007-2012 年洱海湖滨农田生态系统 CO_2 通量的逐日变化。

Fig. 3 Daily variations of CO_2 flux in the lakeside farmland ecosystem in Erhai Lake from 2007 to 2012.

图 4 展示了水稻和蚕豆生长季 CO_2 通量的逐日变化。可以发现两种作物生长季 CO_2 通量的变化整体呈“U”型分布，水稻生长季 CO_2 通量变化幅度在 $-7.8 \sim 0.7 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，平均值为 $-4.0 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，蚕豆生长季 CO_2 通量变化幅度在 $-3.2 \sim 1.8 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，平均值为 $-0.8 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。

相对蚕豆生长季，CO₂ 通量变化在水稻生长季较为显著；水稻生长季平均 CO₂ 通量为蚕豆的 5 倍。

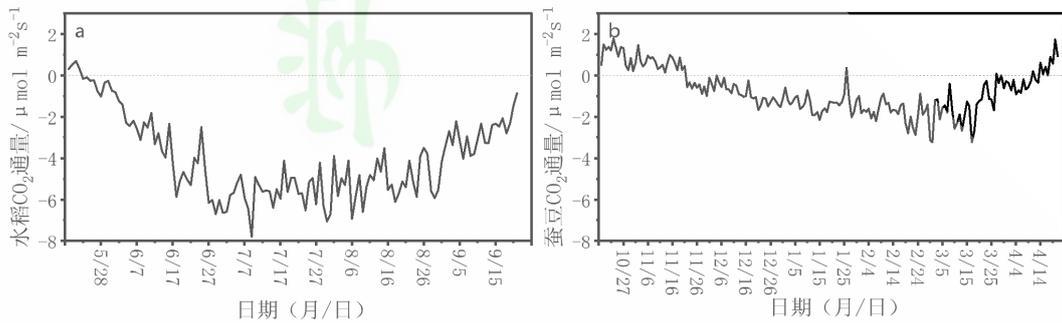


图 4 洱海湖滨农田生态系统 2007-2012 年水稻 (a) 和蚕豆 (b) 生长季日平均 CO₂ 通量的逐日变化。

Fig. 4 Daily mean CO₂ fluxes in rice (a) and broad bean (b) growing seasons in the lakeside farmland ecosystem in Erhai Lake from 2007 to 2012.

为进一步了解 CO₂ 通量在水稻和蚕豆不同生长时期的变化，绘制了两种作物生长季白天通量的 30 min 平均值时间序列变化，如图 5 所示。水稻移栽后，对 CO₂ 的吸收能力迅速增强，在分蘖-拔节期达到一个峰值，然后减弱，到孕穗-抽穗期又达到峰值，随后减弱；蚕豆农田生态系统出苗后，对 CO₂ 的吸收能力缓慢增强，在结荚-鼓粒期间达到最强，随后快速减弱。整体上看，水稻和蚕豆生长季 CO₂ 通量的变化趋势均是先增强后减弱，变化范围分别为-29.3~8.0 μmol m⁻²s⁻¹、-22.6~9.9 μmol m⁻²s⁻¹，平均值分别为-9.3 μmol m⁻²s⁻¹、-4.4 μmol m⁻²s⁻¹；两者对比发现，生长季期间水稻对 CO₂ 的吸收能力增强得比蚕豆快，且强度更强。

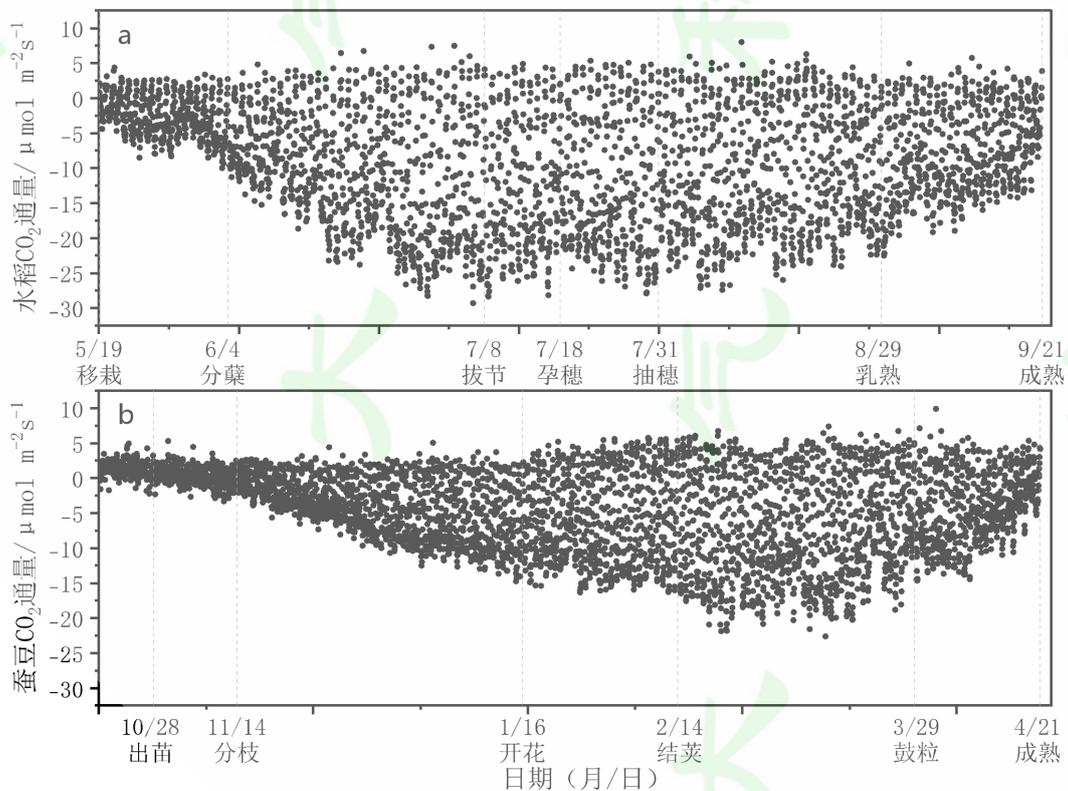


图 5 洱海湖滨农田生态系统 2007-2012 年水稻 (a) 和蚕豆 (b) 生长季白天日平均 CO₂ 通量的逐日变化。

Fig. 5 Daily variations of average daytime CO₂ fluxes during the growing season of rice (a) and broad bean (b) in the lakeside farmland ecosystem in Erhai Lake from 2007 to 2012.

3.3 气象要素对洱海湖滨农田生态系统CO₂通量的影响分析

随机森林 (Random Forest, RF) (杨凯等, 2015) 是一种强大且灵活的机器学习方法, 具有很强的抗噪声能力和很好的防止过拟合和欠拟合能力, 能够处理大量混合型数据, 提供变量重要性评分。文中用其来确定日尺度和小时尺度下气象要素 (Ta, RH, VPD, Rg, WS, u*) 中 CO₂ 通量的主要驱动因子。结果如图 6 所示, 从图中可以看出日尺度上 RH 是水稻-蚕豆农田生态系统中 CO₂ 通量变化的主要控制因子, Ta 次之; 小时尺度上 Rg 是水稻-蚕豆农田生态系统中 CO₂ 通量变化的主要控制因子, u* 次之。

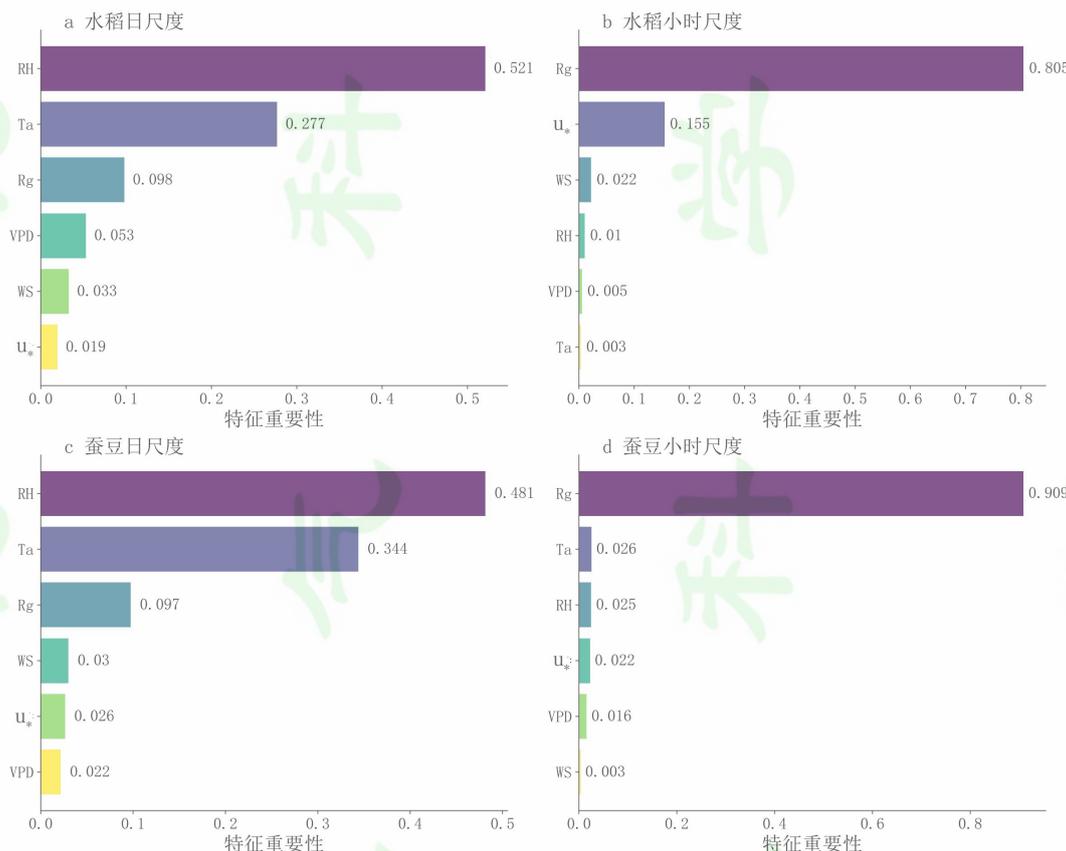


图 6 洱海湖滨农田生态系统影响 NEE 的气象要素特征重要性。

Fig. 6 Importance of meteorological elements affecting NEE in the lakeside farmland ecosystem in Erhai Lake.

日尺度和小时尺度气象要素的重要度排序有所不同, 为进一步分析水稻-蚕豆农田生态系统中气象要素对 CO₂ 通量的影响, 绘制了相关系数矩阵热力图 (图 7)。结果显示, 日尺度上主要控制因子 RH 与水稻 CO₂ 通量为负相关关系 (图 7a), 由于通量为正表示释放 CO₂, 为负表示吸收 CO₂, 所以这里当 RH 增大 CO₂ 通量减小时, 即吸收 CO₂ 的能力越来越强; 与蚕豆 CO₂ 通量为正相关关系 (图 7c), 当 RH 增大 CO₂ 通量增大时, 即排放 CO₂ 的能力越来越强; Ta 与水稻 CO₂ 通量为负相关, 与蚕豆 CO₂ 通量为正相关; VPD、WS 和 u* 与水稻 CO₂ 通量为正相关, 与蚕豆 CO₂ 通量为负相关; Rg 与水稻和蚕豆通量均为负相关。小时尺度上主要控制因子 Rg 与水稻 (图 7b)、蚕豆 (图 7d) CO₂ 通量均为负相关; Ta、VPD、WS 和 u* 与水稻和蚕豆 CO₂ 通量为负相关, RH 与水稻、蚕豆 CO₂ 通量为正相关。除 Rg 外, 其余与水稻 CO₂ 通

量的相关性均高于蚕豆。

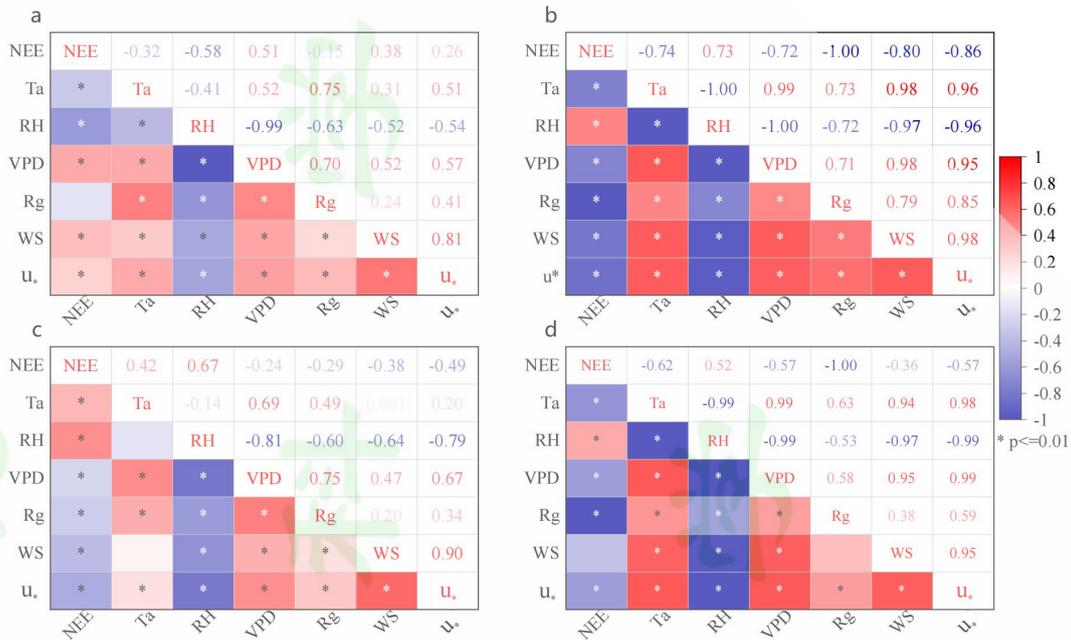


图 7 洱海湖滨农田水稻（第一行）和蚕豆（第二行）生态系统的（a, c）日尺度、（b, d）小时尺度 NEE 与气象要素的相关系数矩阵热力图。

Fig. 7 Correlation coefficient matrix heat maps of (a, c) daily scale and (b, d) hourly scale NEE and meteorological elements of rice (top line) and broad bean (second line) ecosystems in the lakeside farmland in Erhai Lake.

3.4 洱海湖滨农田生态系统水稻和蚕豆生长季碳收支评估

3.4.1 水稻和蚕豆生长季CO₂通量、GPP和R_{eco}的日变化

图 8 展示 2007-2012 年洱海湖滨农田生态系统水稻和蚕豆生长季日平均 CO₂ 通量、GPP 和 R_{eco} 的日变化。由图可以看出，两种作物农田生态系统 CO₂ 通量的日变化表现为“U”型分布，GPP 呈倒“U”型的分布，R_{eco} 较为稳定，与赵辉等（2021）在冬小麦和水稻生态系统的观测结果相一致。CO₂ 通量和 GPP 呈现的这种日变化与太阳辐射密切相关，日出后太阳辐射逐渐增强，植物的光合作用增强。总体上看，两种农田生态系统都显现出夜间 NEE 为正值，表现为碳源，GPP 值接近 0，07:00-07:30 日出后太阳辐射逐渐增强，植物的光合作用增强，GPP 值开始快速上升，NEE 转变为负值，成功转为碳汇且吸收能力不断增强，13:00-13:30 NEE 和 GPP 达到最大值后开始下降，至 19:00-20:00 NEE 由负值转变为正值，即由碳汇又转变为碳源，GPP 则趋近于 0；R_{eco} 白天略高于夜间，但差异并不明显。对比水稻和蚕豆两种农田生态系统，发现两者的 R_{eco} 值差异不明显，但也能看出来蚕豆的呼吸作用比水稻强；水稻生态系统的 GPP、NEE 比蚕豆生态系统要大很多，一天中水稻 GPP 最大值达到 20.3 μmol m⁻²s⁻¹，蚕豆 GPP 最大值为 12.7 μmol m⁻²s⁻¹，水稻 GPP 值约为蚕豆的 1.6 倍，表明水稻农田生态系统具有更强的生理活动，光合作用更强。夜间水稻农田生态系统 CO₂ 通量平均值为 3.2 μmol m⁻²s⁻¹，蚕豆农田生

态系统 CO₂ 通量平均值为 3.4 μmol m⁻²s⁻¹，排放能力相差不大；但白天水稻生长季期间 CO₂ 通量日变化最大值为-17.4 μmol m⁻²s⁻¹，约为蚕豆生长季期间日变化最大值的 1.8 倍，说明水稻农田生态系统对 CO₂ 的吸收能力强于蚕豆农田生态系统。

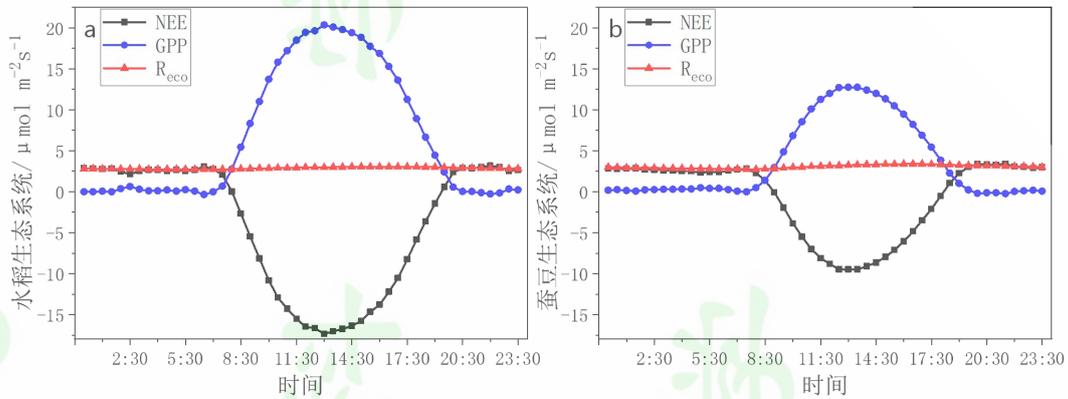


图 8 洱海湖滨农田生态系统 2007-2012 年水稻 (a) 和蚕豆 (b) 生长季平均 NEE、GPP、R_{eco} 的日变化。
Fig. 8 Diurnal variations of NEE, GPP and R_{eco} during the growing season of rice (a) and broad bean (b) in the lakeside farmland ecosystem in Erhai Lake from 2007 to 2012.

3.4.2 水稻和蚕豆生长季期间生态系统碳收支评估

图 9 为 2007-2012 年洱海湖滨农田生态系统水稻和蚕豆生长季日平均 CO₂ 通量、GPP 和 R_{eco} 的动态变化。可以发现，水稻农田生态系统 NEE、GPP 和 R_{eco} 都在生长初期和末期较低，生长期中期较高，原因可能是 T_a 和 R_g 较高，水稻又处于生命活动力较强的时候，所以对 CO₂ 的吸收能力较强；而蚕豆农田生态系统 NEE、GPP 和 R_{eco} 呈现出缓慢上升的趋势，到生长期末期达到最大值后开始下降。在生长季初期 R_g 较弱，使得蚕豆进行光合作用的能力偏弱，因此 GPP 和 R_{eco} 值较小，随着 R_g 的增大以及蚕豆的快速生长，NEE、GPP 和 R_{eco} 值都在逐渐上升，表明蚕豆农田生态系统的碳汇能力在不断上升，而在末期蚕豆的光合作用和呼吸能力开始下降，NEE 和 GPP 值出现明显下降，而 R_{eco} 值没有明显下降，与赵辉等（2021）研究中趋势一致，原因可能是由于末期温度处于最高水平，土壤呼吸作用贡献较大。

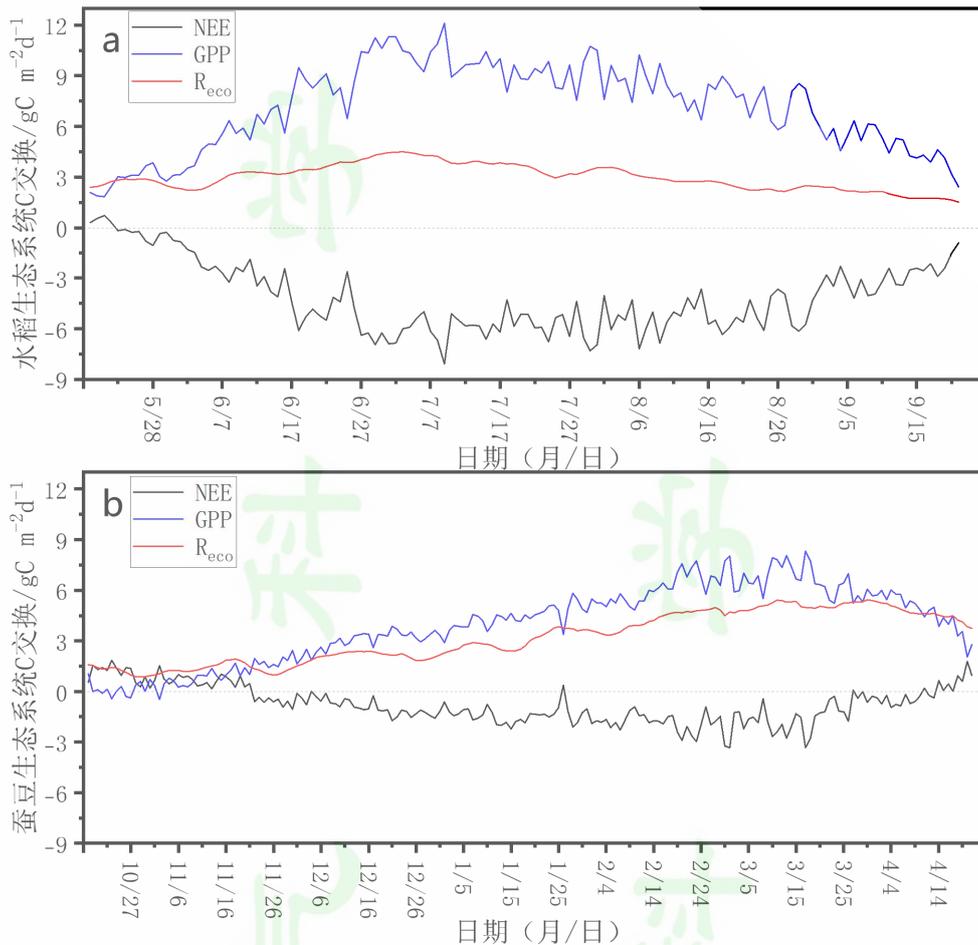


图9 洱海湖滨农田生态系统2007-2012年水稻(a)和蚕豆(b)生长季日平均NEE、GPP和 R_{eco} 的日变化。
 Fig. 9 Daily changes of NEE, GPP and R_{eco} during the growing season of rice (a) and broad bean (b) in the lakeside farmland ecosystem in Erhai Lake from 2007 to 2012.

图10展示了2007-2012年水稻和蚕豆两种农田生态系统生长季日平均NEE、GPP和 R_{eco} 的逐日累积状况，曲线斜率分别表示各自的每日累积速率。2007-2012年6年平均NEE、GPP、 R_{eco} 分别为-572.5、1621.9、1049.4 $gC m^{-2}$ 。图中可以看到水稻NEE、GPP和 R_{eco} 的累积速率在生长季前期中期均高于蚕豆生长季，后期蚕豆生长季GPP、 R_{eco} 的累积速率较高；蚕豆生长季从播种-分枝累积NEE仍为负值，表现为大气 CO_2 的源，蚕豆生长季后期呼吸作用迅速增强。水稻生态系统的 CO_2 净吸收量为503.8 $gC m^{-2}$ ，累计吸收量为866.6 $gC m^{-2}$ ，累计排放量为362.8 $gC m^{-2}$ ；蚕豆的 CO_2 净吸收量为143.5 $gC m^{-2}$ ，累计吸收量为716.2 $gC m^{-2}$ ，累计排放量为572.7 $gC m^{-2}$ 。总的来看，洱海湖滨农田水稻和蚕豆两种生态系统均表现为碳汇，而水稻总初级生产力比蚕豆强，呼吸作用排放 CO_2 能力又较其更弱，导致水稻农田生态系统的固碳能力明显强于蚕豆农田生态系统，约为蚕豆生态系统的3.5倍。

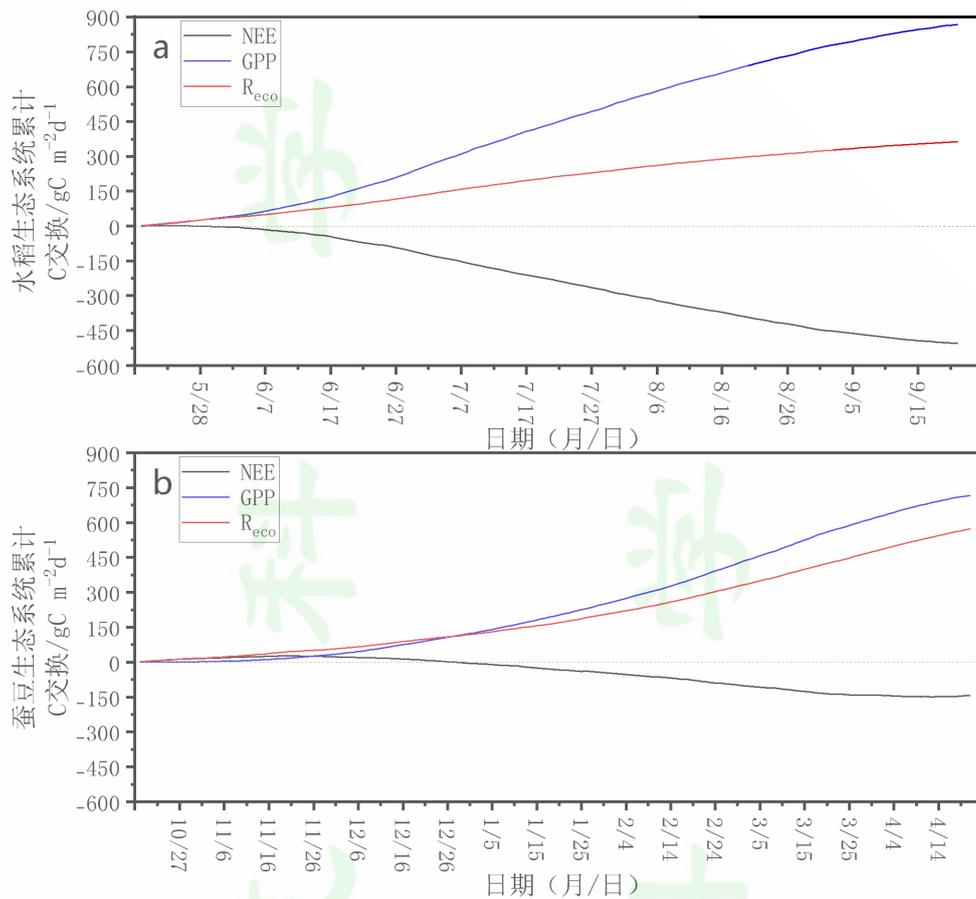


图 10 洱海湖滨农田生态系统 2007-2012 年水稻 (a) 和蚕豆 (b) 生长季日平均 NEE、GPP 和 R_{eco} 的逐日累积状况。

Fig. 10 Daily cumulative changes of averaged NEE, GPP and R_{eco} of rice (a) and broad bean (b) during the growing season in the lakeside farmland ecosystem in Erhai Lake from 2007 to 2012.

4 讨论

表 3 展示了不同作物轮作农田生态系统 CO_2 通量的观测结果。经过与现有研究数据的对比分析, 发现各轮作生态系统在日变化和季节变化上呈现出较高的一致性。具体而言, CO_2 通量的日变化曲线呈现出典型的 U 型特征, 而季节变化则表现为 W 型模式, 这两种变化模式分别与作物的生长季节相对应。此外, 所有轮作农田生态系统均表现为碳汇, 表明它们具备一定的固碳能力。在进一步对比不同轮作作物间的固碳量时, 也发现显著的差异普遍存在。其中, 水稻的固碳能力普遍优于其它作物, 这种差异可能源于年际间气候条件的差异、作物种类及长势等多种因素的综合影响。在地域差异方面, 对不同地区的轮作农田生态系统固碳能力进行了对比。结果显示, 江苏南通、长三角地区以及本研究区域的农田生态系统固碳能力位列前三, 分别为 1023.8、769.6、647.3 $gC m^{-2}$ 。值得注意的是, 本研究区域的水稻农田生态系统固碳能力仅次于江苏南通, 显示出较高的固碳潜力。

农田生态系统在太阳辐射的驱动下，呈现出复杂的生命活动过程，包括能量的流动、物质的合成与转移以及碳水化合物的循环等。这些过程并非孤立存在，而是受到多种因素的共同影响，如下垫面作物类型、生育期、季节以及昼夜变化等。这些因素不仅直接影响作物的生长和发育，还通过改变农田小气候环境（如温度和湿度）来间接影响作物的生命活动。当太阳净辐射能量进入农田生态系统后，其分配和转化过程变得极为复杂。这些过程不仅受到作物类型、生长状况以及环境条件的影响，还随着外界条件的变化而呈现出不同的分配和变化模式。正是这种差异性导致了不同地区农田生态系统在固碳能力上产生显著的差异（吴国星等，2017b）。

表 3 不同作物轮作农田生态系统 CO₂ 通量观测结果

Table 3 Observations of CO₂ fluxes in farmland ecosystems with different crop rotations

观测地区	作物类型	GPP /gC m ⁻²	R _{ceo} /gC m ⁻²	NEE /gC m ⁻²	生育期内 CO ₂ 通量极值	参考文献
华北平原	玉米	984.0	841.0	-143.0	-	王玉英等 (2022)
	小麦	1051.0	692.0	-359.0	-	
华东沿海 (江苏南京)	水稻	689.3	455.5	-233.8	开花期	赵辉等 (2021)
	小麦	459.1	270.9	-188.2	孕穗期	
华东沿海 (江苏南通)	水稻	-	-	-639.0	分蘖-乳熟期	徐敏等 (2022)
	小麦	-	-	-384.8	拔节-孕穗期	
长三角地区	水稻	-	-	-365.2	-	孙小祥等 (2015)
	小麦	-	-	-404.4	-	
湘中地区	水稻	年: 1173.9	年: 967.6	年: -206.3	-	文双雅等 (2022)
	油菜				-	
西南地区	水稻	866.6	362.8	-503.8	分蘖-拔节期 孕穗-抽穗期	本文
	蚕豆	716.2	572.7	-143.5	结荚-鼓粒期	

5 结论

本文使用 2007-2012 年水稻-蚕豆轮作农田生态系统的通量数据，分析两种作物下农田生态系统的气象要素变化及其对 CO₂ 通量变化的影响，对比水稻和蚕豆两种农田生态系统的碳收支情况。得到以下主要结论：

(1) 水稻生长季期间 Ta 和 RH 整体较高变化幅度小，VPD 呈现前期下降后期较平稳的变化趋势，R_g 变化波动较为明显；蚕豆生长季前期 Ta 和 RH 呈下降趋势，中后期 Ta 上升，RH 相对稳定，VPD 则呈现出上升趋势，R_g 波动也较为明显但呈现上升趋势，WS 和 u* 呈现先增强后减弱的趋势。水稻生长季各要素变化幅度相对于蚕豆生长季较小，Ta、RH 和 R_g 均值高于蚕豆生长季，VPD、WS 和 u* 均值低于蚕豆生长季。日尺度上 RH 是两种作物下 CO₂ 通

量变化的主控制因子, T_a 次之; RH 、 T_a 与 CO_2 通量的相关性较高, 但 RH 、 T_a 与水稻 CO_2 通量为负相关, 与蚕豆 CO_2 通量为正相关。小时尺度上 R_g 是两种作物下 CO_2 通量变化的主控制因子; R_g 、 WS 、 u^* 、 VPD 和 T_a 与水稻、蚕豆 CO_2 通量均为负相关; RH 与水稻、蚕豆 CO_2 通量为正相关。

(2) 水稻-蚕豆轮作农田生态系统的 CO_2 通量具有显著的季节变化, 呈“W”型。通量低谷出现在水稻和蚕豆生长季, 作物通过光合作用固定了大量 CO_2 ; 单峰则在两种作物之间的茬口期。水稻 CO_2 通量在生育期中期的分蘖-拔节和孕穗-抽穗达到最大值, 而蚕豆 CO_2 通量在生育期前期-中期变化较为平缓, 在中后期的结荚至鼓粒达到最大值。

(3) 水稻和蚕豆生长季的 CO_2 通量日变化特征均呈现为“U”型变化。夜间时段, 两种生态系统表现为弱的碳源, 而在白天则表现为强的碳汇。水稻生长季 CO_2 通量最大值为 $-17.4 \mu mol m^{-2} s^{-1}$, 约为蚕豆 CO_2 通量最大值的 1.8 倍, 说明水稻生态系统对 CO_2 的吸收能力强于蚕豆生态系统。

(4) 水稻-蚕豆农田生态系统均表现为碳汇, 水稻的固碳能力约为蚕豆的 3.5 倍。水稻和蚕豆两种生态系统的 CO_2 净吸收量分别为 503.8 、 $143.5 gC m^{-2}$, 累计吸收量分别为 866.6 、 $716.2 gC m^{-2}$, 累计排放量分别为 362.8 、 $572.7 gC m^{-2}$ 。

参考文献 (References)

- Bai J, Wang J, Chen X, et al. 2015. Seasonal and inter-annual variations in carbon fluxes and evapotranspiration over cotton field under drip irrigation with plastic mulch in an arid region of Northwest China [J]. *J. Arid Land*, 7(2): 272-284. doi: 10.1007/s40333-014-0012-x
- Desai A R, Richardson A D, Moffat A M, et al. 2008. Cross-site evaluation of eddy covariance GPP and RE decomposition techniques [J]. *Agric. For. Meteorol.*, 148(6-7): 821-838. doi: 10.1016/j.agrformet.2007.11.012
- 俄有浩, 霍治国, 赵花荣, 等. 2020. 华北平原农田 CO_2 浓度变化特征 [J]. *生态学报*, 40(18): 6613-6620. E
- Youhao, Huo Zhiguo, Zhao Haurong, et al. 2020. Variation characteristics of atmospheric CO_2 concentration in farmland of North China Plain [J]. *Acta Ecol. Sin. (in Chinese)*, 40(18): 6613-6620. doi: 10.5846/stxb201906201310
- Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. 2001. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange [J]. *Agric. For. Meteorol.*, 107(1): 43-69. doi: 10.1016/S0168-1923(00)00225-2
- Foken T, Göockede M, Mauder M, et al. 2004. Post-field data quality control[M]// *Handbook of micrometeorology: a guide for surface flux measurement and analysis*. Lee X, Massman W, Law B, Eds. Kluwer Academic Publishers.
- 冯敏玉, 宫松, 魏丽, 等. 2008. 稻田 CO_2 浓度和通量变化特征以及水分利用效率的研究 [J]. *江西农业大学学报*, 30(5): 927-932. Feng Minyu, Gong Song, Wei Li, et al. 2008. A study on the features of CO_2 concentration and flux changes and WUE in rice field [J]. *Acta Agric. Univ. Jiangxiensis (in Chinese)*, 30(5): 927-932.
- Gao X, Gu F, Hao W, et al. 2017. Carbon budget of a rainfed spring maize cropland with straw returning on the Loess Plateau, China [J]. *Sci. Total Environ.*, 586: 1193-1203. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.113
- 郭建侠, 卞林根, 戴永久. 2007. 在华北玉米生育期观测的 16 m 高度 CO_2 浓度及通量特征 [J]. *大气科学*,

- 31(4): 695-707. Guo Jianxia, Bian Lingen, Dai Yongjiu. 2007: Measured CO₂ concentration and flux at 16 m height during corn growing period on the North China Plain [J]. *Chin. J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 31(4): 695-707. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2007.04.14
- 郭强. 2014. 黄土高原旱作麦田 CO₂ 通量的研究 [D]. 西北农林科技大学博士学位论文. Guo Qiang. 2014. Research on carbon dioxide flux in rain-fed wheat field at the Loess Plateau [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Northwest A&F University.
- 韩云芳, 严平, 陈琛, 等. 2013. 淮河流域农田生态系统碳通量变化特征 [J]. *安徽农学通报*, 19(22): 82-83, 110. Han Yunfang, Yan Ping, Chen Chen, et al. 2013. The characteristics of the carbon flux variation in the Huaihe River farmland ecosystem [J]. *Anhui Agri. Sci. Bull.* (in Chinese), 19(22): 82-83, 110.
- Jans W W P, Jacobs C M J, Kruijt B, et al. 2010. Carbon exchange of a maize (*Zea mays* L.) crop: Influence of phenology [J]. *Agric., Ecosyst. Environ.*, 139(3): 316-324. doi: 10.1016/j.agee.2010.06.008
- 康霞. 2018. 甘肃省农田生态系统碳收支动态 [J]. *中国沙漠*, 38(6): 1237-1242. Kang Xia. 2018. Dynamics of carbon absorption and emission of crops in Gansu, China [J]. *J. Desert Res.* (in Chinese), 38(6), 1237-1242.
- Lasslop G, Reichstein M, Papale D, et al. 2009. Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: critical issues and global evaluation [J]. *Global Change Biol.*, 16(1): 187-208. doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.02041.x
- 李双江, 刘文兆, 高桥厚裕, 等. 2007. 黄土塬区麦田 CO₂ 通量季节变化 [J]. *生态学报*, 27(5): 1987-1992. Li Shuangjiang, Liu Wenzhao, Atsubiro Takahashi, et al. 2007. The seasonal variation of CO₂ flux in a wheat field of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecol. Sin.* (in Chinese), 27(5): 1987-1992.
- 梁涛, 李荣平, 吴航, 等. 2012. 玉米农田生态系统 CO₂ 通量的动态变化 [J]. *气象与环境学报*, 28(3): 49-53. Liang Tao, Li Rongping, Wu Hang, et al. 2012. Dynamics of carbon dioxide flux in a maize agroecosystem [J]. *J. Meteor. Environ.* (in Chinese), 28(3): 49-53.
- 潘竟虎, 郑凤娟, 石培基. 2010. 甘肃省县域粮食可持续生产能力空间分异分析 [J]. *农业现代化研究*, 31(4): 434-438. Pan Jinghu, Zheng Fengjuan, Shi Peiji. 2010. Analysis on spatial difference of grain sustainable production ability in Gansu Province [J]. *Res. Agric. Modern.* (in Chinese), 31(4): 434-438.
- 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 Biol.*, 11(9): 1424-1439. doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x
- Smith P, Lanigan G, Kutsch W L, et al. 2010. Measurements necessary for assessing the net ecosystem carbon budget of croplands [J]. *Agric., Ecosyst. Environ.*, 139(3): 302-315. doi: 10.1016/j.agee.2010.04.004
- 史桂芬, 成林, 张志红. 2020. 华北平原冬小麦灌浆期 CO₂ 通量特征及影响因素 [J]. *气象与环境科学*, 43(4): 65-71. Shi Guifen, Cheng Lin, Zhang Zhihong. 2020. Characteristics of CO₂ flux and its influence factors over the winter wheat filling stage in North China Plain [J]. *Meteor. Environ. Sci.* (in Chinese), 43(4): 65-71.
- 宋涛, 王跃思, 宋长春, 等. 2006. 三江平原稻田 CO₂ 通量及其环境响应特征 [J]. *中国环境科学*, 26(6): 657-661. Song Tao, Wang Yuesi, Song Changchun, et al. 2006. CO₂ flux from rice fields of Sanjiang plain and its environmental response factors [J]. *China Environ. Sci.* (in Chinese), 26(6): 657-661.
- 孙小祥, 常志州, 杨桂山, 等. 2015. 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* (中英文), 23(7): 803-811. Sun Xiaoxiang, Chang Zhizhou, Yang Guishan, et al. 2015. Characteristics of net ecosystem exchange and environmental factors of rice-wheat rotation system in the Yangtze River Delta of China [J]. *Chin. J. Eco-Agric.* (in Chinese), 23(7): 803-811. doi: 10.13930/j.cnki.cjea.150007
- Webb E K, Pearman G I, Leuning R. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 106(447): 85-100. doi: 10.1002/qj.49710644707

- 王慧, 王艳娟, 周春雨. 2015. 浅析温室气体与气候变化的影响 [J]. 统计与咨询, (3): 34-36. Wang Hui, Wang Yanjuan, Zhou Chunyu. 2015. Analysis on the influence of greenhouse gases and climate change [J]. Stat. Consult. (in Chinese), (3): 34-36.
- 王尚明, 胡继超, 吴高学, 等. 2011. 亚热带稻田生态系统 CO₂ 通量特征分析 [J]. 环境科学学报, 31(1): 217-224. Wang Shangming, Hu Jichao, Wu Gaoxue, et al. 2011. Characteristic analysis of CO₂ fluxes from a rice paddy ecosystem in a subtropical region [J]. Acta Sci. Circumst. (in Chinese), 31(1): 217-224.
- 王雯. 2013. 黄土高原旱作麦田生态系统 CO₂ 通量变化特征及环境响应机制 [D]. 西北农林科技大学博士学位论文. Wang Wen. 2013. Variations of CO₂ fluxes and the mechanisms of environmental response in the rain-fed wheat ecosystem of Chinese Loess Plateau [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Northwest A&F University.
- 王晓娇. 2021. 不同施肥措施下陇中黄土高原旱作玉米农田生态系统碳平衡及其土壤碳库稳定性研究 [D]. 甘肃农业大学博士学位论文. Wang Xiaojiao. 2021. Study on ecosystem carbon balance and stability of soil organic carbon pool in dryland corn farmland of the Loess Plateau of central Gansu Province under different fertilization measures [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Gansu Agricultural University.
- 王雪梅, 冯兆忠, 汲玉河, 等. 2023. 国家自然科学基金大气科学学科二级申请代码下设研究方向与关键词解读: D0507 生态气象 [J]. 大气科学, 47(1): 154-166. Wang Xuemei, Feng Zhaozhong, Ji Yuhe, et al. 2023. Research directions and keywords under the secondary application codes of the atmospheric sciences discipline of the national natural science foundation of China: D0507 Eco-meteorology [J]. Chin. J. Atmos. Sci. (in Chinese), 47(1): 154-166. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2212.22307
- 王玉英, 胡春胜, 董文旭, 等. 2022. 华北平原小麦-玉米轮作系统碳中和潜力及固碳措施 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 30(4): 651-657. Wang Yuying, Hu Chunsheng, Dong Wenxu, et al. 2022. Carbon neutralization potential and carbon sequestration efforts in a wheat-maize rotation system in the North China Plain [J]. Chin. J. Eco-Agric. (in Chinese), 30(4): 651-657.
- 文双雅, 高倩文, 高志强, 等. 2022. 稻油两熟农田生态系统净碳交换特征及其主要影响因子研究 [J]. 农业现代化研究, 43(1): 162-171. Wen Shuangya, Gao Qianwen, Gao Zhiqiang, et al. 2022. Characteristics of net carbon exchange and its main influencing factors of rice-oilseed rape double cropping farmland ecosystem [J]. Res. Agric. Modern. (in Chinese), 43(1): 162-171.
- 吴东星, 李国栋, 亢琼琼, 等. 2018. 华北平原冬小麦农田生态系统 CO₂ 通量特征及其影响因素 [J]. 应用生态学报, 29(3): 827-838. Wu Dongxing, Li Guodong, Kang Qiongqiong, et al. 2018. Characteristics of CO₂ flux and its influence factors over winter wheat agroecosystem in the North China Plain [J]. Chin. J. Appl. Ecol. (in Chinese), 29(3): 827-838. doi: 10.13287/j.1001-9332.201803.012
- 吴东星, 李国栋, 张茜. 2017a. 华北平原冬小麦农田生态系统通量贡献区 [J]. 应用生态学报, 28(11): 3663-3674. Wu Dongxing, Li Guodong, Zhang Xi. 2017a. Flux footprint of winter wheat farmland ecosystem in the North China Plain [J]. Chin. J. Appl. Ecol. (in Chinese), 28(11): 3663-3674. doi: 10.13287/j.1001-9332.201711.029
- 吴东星, 李国栋, 张茜. 2017b. 华北平原典型冬小麦农田生态系统能量平衡与闭合研究 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 25(10): 1413-1422. Wu Dongxing, Li Guodong, Zhang Qian. 2017b. Energy balance and closure of typical winter wheat farmland ecosystem in the North China Plain [J]. Chin. J. Eco-Agric. (in Chinese), 25(10): 1413-1422. doi: 10.13930/j.cnki.cjea.170150
- 伍琼, 田红, 严平, 等. 2009. 淮河流域农田 CO₂ 和热通量日、季节变化特征 [J]. 中国农学通报, 25(1): 211-216. Wu Qiong, Tian Hong, Yan Ping, et al. 2009. Seasonal and diurnal variations of CO₂ flux and heat flux over cropland in Huaihe River basin [J]. Chin. Agric. Sci. Bull. (in Chinese), 25(1): 211-216.

- 谢五三, 田红, 童应祥, 等. 2009. 基于淮河流域农田生态系统观测资料的通量研究 [J]. 气象科技, 37(5): 601-606. Xie Wusan, Tian Hong, Tong Yingxiang, et al. 2009. Flux of cropland ecosystem in Huaihe River basin [J]. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 37(5): 601-606.
- 徐敏, 徐敬争, 刘文菁, 等. 2022. 华东沿海稻麦轮作区生态系统能量闭合度和 CO₂ 通量特征研究 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 30(3): 367-379. Xu Min, Xu Jingzheng, Liu Wen Jing, et al. 2022. Characteristics of ecosystem energy closure and CO₂ flux in a rice-wheat rotation area along the coast of East China [J]. Chin. J. Eco-Agric. (in Chinese), 30(3): 367-379. doi: 10.12357/cjea.20210731
- 杨怀钦, 杨友仁, 倪喜云, 等. 2012. 洱海流域农田地表径流监测及作物种植结构调整初探 [J]. 农业环境与发展, 29(3): 109-110. Yang Huaiqin, Yang Youren, Ni Xiyun, et al. 2012. Preliminary study on farmland surface runoff monitoring and crop planting structure adjustment in Erhai lake basin [J]. Agric. Environ. Dev. (in Chinese), 29 (3): 109-110.
- 杨凯, 侯艳, 李康. 2015. 随机森林变量重要性评分及其研究进展 [J]. 中国科技论文在线. Yang Kai, Hou Yan, Li Kang. 2015. Variable importance measure of random forest and its progress [J]. China Sci. Technol. Pap. Online (in Chinese).
- 杨智, 孙绩华, 徐安伦. 2013. 稻田 CO₂ 和 CH₄ 通量特征及碳平衡研究 [J]. 云南大学学报(自然科学版), 35(S2): 291-295. Yang Zhi, Sun Jihua, Xu Anlun. 2013. Analyses of the characteristics of CO₂ and CH₄ fluxes and carbon balance over the rice field [J]. J. Yunnan Univ. (Nat. Sci. Edn.) (in Chinese), 35(S2): 291-295.
- 叶笃正, 符淙斌, 董文杰. 2002. 全球变化科学进展与未来趋势 [J]. 地球科学进展, 17(4): 467-469. Ye Duzheng, Fu Congbin, Dong Wenjie. 2002. Progress and future trends in global change science [J]. Adv. Earth Sci. (in Chinese), 17(4): 467-469.
- 叶昊天, 姜海梅, 李荣平. 2022. 中国东北地区玉米农田生态系统生长季碳交换研究 [J]. 玉米科学, 30(1): 77-85, 92. Ye Haotian, Jiang Haimei, Li Rongping. 2022. Study on carbon exchange of a maize agroecosystem during growing seasons in Northeast China [J]. J. Maize Sci. (in Chinese), 30(1): 77-85, 92.
- 曾凯, 王尚明, 张崇华, 等. 2009. 南方稻田生态系统产量形成期 CO₂ 通量的研究 [J]. 中国农学通报, 25(15): 219-222. Zeng Kai, Wang Shangming, Zhang Chonghua, et al. 2009. Study on CO₂ flux during the yield formation stage in a southern paddy rice ecosystem [J]. Chin. Agric. Sci. Bull. (in Chinese), 25(15): 219-222.
- 张永强, 沈彦俊, 刘昌明, 等. 2002. 华北平原典型农田水、热与 CO₂ 通量的测定 [J]. 地理学报, 57(3): 333-342. Zhang Yongqiang, Shen Yanjun, Liu Changming, et al. 2002. Measurement and analysis of water, heat and CO₂ flux from a farmland in the North China Plain [J]. Acta Geogr. Sin. (in Chinese), 57(3): 333-342.
- 赵辉, 朱盛强, 刘贞, 等. 2021. 基于涡度相关技术的农田生态系统碳收支评估 [J]. 环境科学学报, 41(11): 4731-4739. Zhao Hui, Zhu Shengqiang, Liu Zhen, et al. 2021. Evaluation of carbon budget for farmland ecosystem based on the eddy correlation technology [J]. Acta Sci. Circumst. (in Chinese), 41(11): 4731-4739.
- 赵荣钦, 黄爱民, 秦明周, 等. 2004. 中国农田生态系统碳增汇/减排技术研究进展 [J]. 河南大学学报(自然科学版), 34(1): 60-65. Zhao Rongqin, Huang Aimin, Qin Mingzhou, et al. 2004. Progress in the studies of techniques of adding carbon sinks and reducing carbon emissions in agroecosystems of China [J]. J. Henan Univ. (Nat. Sci. Edn.) (in Chinese), 34(1): 60-65.
- 赵荣钦, 秦明周. 2007. 中国沿海地区农田生态系统部分碳源/汇时空差异 [J]. 生态与农村环境学报, 23(2): 1-6, 11. Zhao Rongqin, Qin Mingzhou. 2007. Temporospacial variation of partial carbon source / sink of farmland ecosystem in coastal China [J]. J. Ecol. Rural Environ. (in Chinese), 23(2): 1-6, 11.
- 朱连奇. 2011. 全球气候变化对自然资源开发利用的影响 [J]. 河南大学学报(自然科学版), 41(2): 162-166. Zhu Lianqi. 2011. Impact of global climate change on development of natural resources [J]. J. Henan Univ. (Nat. Sci. Edn.) (in Chinese), 41(2): 162-166.

- 朱咏莉, 童成立, 吴金水, 等. 2007a. 亚热带稻田生态系统 CO₂ 通量的季节变化特征 [J]. 环境科学, 28(2): 283-288. Zhu Yongli, Tong Chengli, Wu Jinshui, et al. 2007a. Seasonal characteristics of CO₂ fluxes from the paddy ecosystem in subtropical region [J]. Environ. Sci. (in Chinese), 28(2): 283-288.
- 朱咏莉, 吴金水, 陈微微, 等. 2007b. 稻田生态系统 CO₂ 通量的日变化特征 [J]. 中国农学通报, 23(9): 603-606. Zhu Yongli, Wu Jinshui, Chen Weiwei, et al. 2007b. Diurnal characteristics of CO₂ fluxes in rice paddy ecosystem in China [J]. Chin. Agric. Sci. Bull. (in Chinese), 23(9): 603-606.

刊 科 学
待 气 科 刊
大 气 待
大 气 待