

张丽君, 胡凝, 刘珊珊, 等. 水稻生长季CO₂通量的时间动态和影响因子研究[J]. 环境科学与技术, 2024, 47(3): 27–36. Zhang Lijun, Hu Ning, Liu Shanshan, et al. Temporal dynamics and influencing factors of CO₂ fluxes during rice growing season[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 47(3): 27–36.

水稻生长季CO₂通量的时间动态和影响因子研究

张丽君¹, 胡凝^{1*}, 刘珊珊^{1,3}, 徐敏^{2*},
王伟¹, 邵久¹, 葛培¹

(1. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 气象灾害预报预警与评估协同创新中心,
中国气象局生态系统碳源汇重点开放实验室, 江苏省农业气象重点实验室, 江苏 南京 210044;
2. 江苏省气候中心, 江苏 南京 210019;
3. 衡水市气象局, 河北 衡水 053000)

摘要: 为了明确长三角地区稻麦轮作生态系统中水稻生长季CO₂通量的多时间尺度变化特征, 量化环境因子对农田CO₂通量变化的贡献度, 拆分环境因子的直接影响和间接影响, 该研究利用涡度相关观测系统进行了2年CO₂通量的连续观测, 分析了辐射类、温度类、水汽类和风速对CO₂通量的影响。结果表明: 稻麦轮作生态系统在水稻生长季是一个二氧化碳汇, 2020、2021年水稻生长季的总固碳量分别为396.3、491.9 g/m²(以C计); CO₂通量也有明显的日变化, 呈现出“U形”和“V型”的单峰曲线, 吸收峰值出现在第200~250天。在不同时间尺度上, 影响CO₂通量的主控因子始终是光合有效辐射; 但随时间尺度的增加, 各个因子贡献度的差异逐渐减小。饱和水汽压差也是影响CO₂通量的重要因子, 它与光合有效辐射的交互作用会抑制彼此对CO₂通量的直接贡献。

关键词: 稻麦轮作生态系统; CO₂通量; 贡献度; 交互作用; 涡度相关

中图分类号: X16 **文献标志码:** A **doi:** 10.19672/j.cnki.1003-6504.0076.24.338 **文章编号:** 1003-6504(2024)03-0027-10

Temporal Dynamics and Influencing Factors of CO₂ Fluxes During Rice Growing Season

ZHANG Lijun¹, HU Ning^{1*}, LIU Shanshan^{1,3}, XU Min^{2*},
WANG Wei¹, TAI Jiu¹, GE Pei¹

(1. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology,
Key Laboratory of Ecosystem Carbon Source and Sink, China Meteorological Administration (ECSS-CMA),
Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD),
Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME), Nanjing University of Information Science & Technology,
Nanjing 210044, China;
2. Climate Center of Jiangsu Province, Nanjing 210019, China;
3. Hengshui Municipal Meteorological Bureau, Hengshui 053000, China)

Abstract: This study conducted continuous 2-years observation of CO₂ fluxes by using eddy covariance method and analyzed the influences of radiation, temperature, water vapor, and wind speed on CO₂ fluxes, in order to clarify the multi-temporal variation characteristics of CO₂ flux during rice growing season in a wheat-rice rotation ecosystem in the Yangtze River Delta region, quantify the contribution of environmental factors to the variation of CO₂ flux during rice growing season, and split the direct and indirect impacts of environmental factors on CO₂ flux. The results showed that this ecosystem during the rice growing season was a carbon sink, with total carbon sequestration of 396.3 g/m² and 491.9 g/m² during the rice growing seasons in 2020 and 2021 respectively. The CO₂ flux also exhibited significant diurnal variations, with a single peak curve of “U” and “V” shape, and its absorption peaks were located from 200th to 250th day of year. At different

《环境科学与技术》编辑部: (网址) <http://hjks.chinajournal.net.cn> (电话) 027-87643502 (电子信箱) hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期: 2024-01-09; 修回 2024-02-13

基金项目: 江苏省“333人才”领军型人才团队(BRA2022023); 江苏省气象局揭榜挂帅科研项目(KZ202302); 江苏省农业气象重点实验室开放基金(JKLAM2305)

作者简介: 张丽君(1999-), 女, 硕士, 主要研究方向为农业气象服务, (电子信箱) 496844127@qq.com; *通讯作者, 胡凝, 副教授, 主要从事农业气象教学和科研工作, (电子信箱) huning@nuist.edu.cn; 徐敏, 正高级工程师, 主要从事农业气象研究和服务工作, (电子信箱) amin0506@163.com。

time-scale, photosynthetic photon flux density (PPFD) remained the main control factor of CO₂ flux. As the time scale was longer, the difference between the contributions of environmental factors was reduced. Vapor pressure deficit (VPD) was also an important factor on CO₂ flux, but the interaction between PPFD and VPD would inhibit the direct contribution of these two factors on CO₂ flux.

Key words: rice-wheat rotation ecosystem; CO₂ flux; contribution; interaction; eddy covariance

农田生态系统的碳交换十分活跃,在全球及区域碳循环中占据重要地位^[1]。我国作为农业大国,2010 年全球耕地有机碳储量相对于 1901 年增加了 125%,但仍远未达到饱和状态,具有一定的固碳减排潜力^[2]。不同农田生态系统,碳水循环机制虽然具有相似性,但对气候变化敏感度不同,表现出显著的空间变异性^[3]。在气候变化背景下,不同的气候敏感度会对农田生态系统与大气圈之间的碳交换造成不同的影响^[4]。因此,深入研究农田生态系统中 CO₂ 通量的变化特征及其与环境因素之间的关系,对于制定合理的农业管理措施、提高农田生态系统的固碳功能具有重大意义。

不同地区、不同类型农田生态系统的综合固碳量差别较大,稻田生态系统大多表现为明显的碳汇。湖南省稻油两熟农田生态系统全年的净碳交换累积总量为 206.26 g/m²(以 C 计,下同)^[5],长三角地区稻麦轮作生态系统年固碳量为 769.61 g/(m²·a)^[6],淮河流域稻麦主要生育期的固碳量为 626.92 g/(m²·a)^[7],中亚热带地区稻田为 675.2 g/(m²·a)^[8],华北平原小麦-玉米轮作农田的固碳量为 197.60~317.90 g/(m²·a)^[9]。上述研究显示,不同农田系统的固碳量差异接近 4 倍,研究不同区域不同下垫面的农田碳交换,可以更好地了解和研究作物生产对于气候变化的响应情况,明确农田生态系统碳循环的机理和过程。

长三角地区作为我国典型的稻麦轮作区和主要的粮食生产区,稻麦播种面积占全国的 20.1%,稻麦粮食产量达到全国的 22.1%,其农田生态系统对区域碳收支具有重要影响^[10]。因此,研究地区农田生态系统碳交换的特征及其环境影响因子对区域碳平衡估算具有重要的意义。本研究选取该区域内江苏海安雅周镇一处典型稻麦轮作农田体系,基于涡度相关法对该地进行连续观测,在明确 CO₂ 通量时间变化特征的基础上,结合气象环境因子的观测,以期量化气象环境因子对稻麦轮作农田中多时间尺度 CO₂ 通量变化的贡献。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

本研究区位于江苏省南通市,属于海洋性气候,

1981-2010 年平均气温 15.3 ℃,年日照时数 2 000 h,年降水量 1 015.1 mm(海安站:58254,国家气象科学数据中心 <http://data.cma.cn/>)。以通量观测站点为中心的 250 m 半径范围内均为农田,地势平坦,地下 10~100 cm 的土壤类型为细沙土,属于海安市雅周镇“万亩良田”工程农田生态系统,是典型的长三角区域稻(5-10 月)麦(11 月-翌年 5 月)轮作高产区。表 1 为 2020、2021 年水稻生育期的划分,播种-分蘖期为生长初期、分蘖-拔节期为快速增长期、拔节-抽穗期为缓慢增长期、抽穗-成熟期为生长后期。

表 1 水稻生育期的划分

Table 1 Division of rice fertility period

生长阶段	生育期	2020 年	2021 年
生长初期	播种—出苗	0608-0615	0612-0619
	出苗—三叶	0616-0629	0620-0629
	三叶—分蘖	0630-0709	0630-0711
快速增长期	分蘖—拔节	0710-0809	0712-0809
缓慢增长期	拔节—孕穗	0810-0829	0810-0825
	孕穗—抽穗	0830-0906	0826-0902
生长后期	抽穗—乳熟	0907-0927	0903-0919
	乳熟—成熟	0928-1018	0920-1016

1.2 观测方法

1.2.1 涡度相关观测系统

本研究基于开路式涡度相关观测系统对目标农田 CO₂ 通量进行高频、原位、连续观测。该系统安装高度约为 2.5 m,仪器组成及测量分量如下:开路式红外 CO₂/H₂O 智能分析仪(LI-7500DS,美国 LI-COR 公司)测量大气中 CO₂ 和 H₂O 密度;三维超声风速仪(windmaster pro,英国 Gill 公司)测量三维风速和超声虚温,上述仪器采样频率均为 10 Hz。通过数据采集器(CR6 美国 Campbell 公司)储存原始 10 Hz 数据,用于后续离线通量计算。

1.2.2 小气候辅助观测

本研究采用小气候观测系统获取气象要素观测数据。具体包括:温湿传感器(型号:DHC2,架设高度为 2 m 和 3 m),太阳净辐射观测(型号:FS-J1,架设高度为 2 m),5 路光合有效辐射观测(型号:FS-PR,1 路架设高度为 2 m,其他四路均架设在 0.5 m 高度处),3 路土壤热通量观测(型号:HFP01-05,架设深度为 0.05 m),雨量传感器(型号:SL3-1,架设高度为 1.5 m),5 路土壤温湿度传感器(型号:5TE,架设深度分别为

0.05、0.1、0.2、0.4 和 0.6 m)。这些要素传感器连接 CR6 通量数据采集器,每半小时输出一组数据。

1.3 涡度相关数据处理方法

1.3.1 数据质量控制

本研究使用 EddyPro 软件(version 6.2.1, 美国 LI-COR 公司)进行 10 Hz 数据的处理并计算得到 30 min 通量,处理过程主要包括:通过统计检验剔除异常值,包括野点剔除、振幅分辨率、缺失值、绝对值限制以及偏峰度检验等;进行 2 次坐标旋转以消除仪器倾斜所造成的误差^[11];采用空气密度效应校正(Webb-Pearman-Leuning correction, WPL 校正)从而消除温湿度波动对仪器测量的影响^[12];最后,基于大气平稳性检验和总体湍流特征检验等方法,将通量数据划分为 3 个等级:0(质量较好)、1(质量中等)、2(质量较差),本研究仅采用质量等级为 0 和 1 的数据进行后续分析。首先剔除夜间出现负值的 CO₂ 通量数据,再者,剔除观测值超出仪器正常观测范围的异常值以及降水前后半小时对应的通量数据,剔除每 5 个数据中标准分数绝对值大于 1.672 的数据,又基于夜间 CO₂ 通量与摩擦风速(u^*)的变化关系确定 u^* 的临界值,进一步删除了夜间大气湍流交换不充分时段的 CO₂ 通量数据,最后进行了光谱矫正。在完成上述数据处理和质量控制之后,2020、2021 年水稻生育期基于半小时尺度的 CO₂ 通量有效数据量分别为 57.18%、63.89%。

1.3.2 通量数据的插补方法

电力及仪器故障、极端天气条件、不充分湍流混合以及数据质量控制等是造成数据缺失的主要原因。本研究为进一步准确评估农田生态系统 CO₂ 通量多尺度交换量,首先对 2 h 内缺失的数据进行线性插值,其次选用模拟效果较好的随机森林(random forest, RF)对基于半小时尺度的 CO₂ 通量数据进行插补^[13]。

RF 插补步骤如下:首先,基于前期各环境要素与 CO₂ 通量之间的相关关系,确定输入变量组合,包括日序(DOY)、昼夜(DAYTIME, 0 代表夜间数据,1 代表白天数据)、降水(PRE)、土壤含水量(SWC)、风速(U)、饱和水汽压差(VPD)、空气温度(TA)、光合有效辐射(PPFD),其中,DOY 和 DAYTIME 用来反映时间变化信息,避免水稻不同生育期对模型的影响;其次,将输入变量数据集以 7:3 随机分为训练集与验证集;最后,通过多次训练与验证,从中挑选训练与验证效果均较优的模型用于缺失数据的插补。

1.4 数据分析与统计方法

本文所选的影响因子主要分为 4 类,一是辐射类:

2 m 高度光合有效辐射(PPFD)、PPFD 截获率(IR);二是温度类:2 m 空气温度(TA);三是水汽类:降水量(PRE)、10 cm 土壤含水量(SWC)、饱和水汽压差(VPD);四是平均风速(U)。其中 IR 为 1 减去 0.5 m 与 2 m 高度上光合有效辐射之比,它在一定程度上反映了水稻生长期间叶面积指数的变化。

1.4.1 非线性回归

夜间温度通常被认为是控制生态系统呼吸的首要环境因子。生态系统呼吸(R_{eco})对温度的响应特征有多种描述,本文使用 Lloyd & Taylor 方程^[14,15]:

$$R_{eco} = R_{eco,ref} e^{(E_0(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_k} - \frac{1}{T_0}))} \quad (1)$$

式中, R_{eco} 是生态系统呼吸,相当于夜间 CO₂ 通量; E_0 反映了生态系统呼吸的温度敏感性,这里设置为 309 K^[15]; T_{ref} 是参考温度,取 298.16 K; $R_{eco,ref}$ 是 T_{ref} 下的生态系统呼吸; T_0 是生态系统呼吸为 0 时的温度(K); T_k 为空气或土壤温度(K)。其中,参数 $R_{eco,ref}$ 和 T_0 用观测数据拟合得到。

白天,绿色植物通过光合作用吸收 CO₂,在生长季可用 Michaelis-Menten 模型^[16]拟合数据:

$$F_c = -\alpha A_{max} PPFD / (A_{max} + \alpha PPFD) + R_{eco,day} \quad (2)$$

式中, F_c 为白天 CO₂ 通量,PPFD 为光合有效辐射, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; α 为表观初始光能利用率,%; A_{max} 为生态系统最大光合速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; $R_{eco,day}$ 为白天生态系统呼吸, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

1.4.2 相关性分析

本文选用皮尔逊相关系数来反映 CO₂ 通量与气象环境因子之间的相关程度,系数越接近于正负 1,相关性越强;系数越接近于 0,相关性越弱。

$$r(X, Y) = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{Var}[X] \text{Var}[Y]}} \quad (3)$$

式中, X 为气象环境因子, Y 为 CO₂ 通量, $\text{Cov}(X, Y)$ 为二者的协方差, $\text{Var}[X]$ 、 $\text{Var}[Y]$ 分别为气象环境因子和 CO₂ 通量的方差。本文使用 SPSS 27.0 中“分析-相关-双变量”得出各个研究变量与 CO₂ 通量的相关系数。

1.4.3 优势分析

优势分析是一种确定多元回归方程中影响因子相对重要性的方法,该方法平均了变量的直接效应、总效应和部分效应,全面比较了所有子模型中各因子对因变量的相对重要性^[17,18]。

首先,考虑到各因子的量纲不同,先对所有因子进行归一化处理,使其在 0~1 之间变化。其次,建立因变量(CO₂ 通量)与因子之间的多元回归方程。最后,使用优势分析量化每个因子对因变量的相对贡献。假设全模型中有 p 个预测变量,则可以得到 $2^p - 1$

个子模型,通过多元回归得到各个预测变量被加入到不含变量 x_i 自身的子模型后带来的 R^2 改变量,计算公式如下^[19,20]:

$$C_{x_i}^{(k)} = \sum \Delta R_{y_{x_i x_h}}^2 / \binom{p-1}{k} \quad (4)$$

$$C_{x_i} = \sum_{k=0}^{p-1} C_{x_i}^{(k)} / p \quad (5)$$

式中, $C_{x_i}^{(k)}$ 表示当变量 x_i 加入到含有 k 个($k=0,1,\dots, p-1$)预测变量组成的 $\binom{p-1}{k}$ 个子模型中贡献的平均增量; $\Delta R_{y_{x_i x_h}}^2$ 为 R^2 改变量; x_h 为排除了变量 x_i 后,子模型中的 k 个预测变量;通过平均所有 p 个子模型的 $C_{x_i}^{(k)}$ 得到 C_{x_i} 。

1.4.4 途径分析

途径分析是简单相关分析的继续,可以将因果变量之间的相关系数(相互影响)分解为直接途径系数(直接作用效果)和间接途径系数(间接作用效果),以此研究因果关系的数据结构^[21]。

假设有 n 个随机变量 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 和一个因变量 y ,则因子 x_i 与 y 的相关系数为直接途径系数与间接途径系数之和,即^[22]:

$$r_{iy} = P_{iy} + \sum_{j=i+1}^n r_{ij} \times P_{jy}, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中, r_{iy} 是因子 x_i 与因变量 y 的相关系数, P_{iy} 是因子 x_i 到 y 的直接途径系数, r_{ij} 是任意两个因子之间的相关系数, $r_{ij} \times P_{jy}$ 是因子 x_i 通过因子 x_j 到 y 的间接途径系数。

2 结果与分析

2.1 CO₂通量的多时间尺度变化特征

2.1.1 小时尺度的变化特征分析

图1是2020和2021年各个生育期内CO₂通量的日变化特征。结果表明,CO₂通量在各个生育期的日变化明显且变化趋势相似,大多呈“U形”的单峰曲线;白天为负值,此时作物的光合作用强于呼吸作用,表现为CO₂的净吸收,其吸收峰值主要出现在正午时间段,12时左右受到高温胁迫,部分时段出现短暂升高;夜间为正值,此时光合作用停止,植株与土壤呼吸释放CO₂,是CO₂的源,变化较为平稳。

小时尺度上,同一生育期在不同年份CO₂通量的日变化差异不大,而在不同生育期之间差异明显。在生长初期(播种—分蘖),植株生长发育缓慢,CO₂通量吸收与排放信号弱,2020年与2021年CO₂通量的日变化幅度分别为12.276 0 μmol/(m²·s)(-7.395 8~4.880 2 μmol/(m²·s))和8.499 4 μmol/(m²·s)(-5.278 4~3.221 0 μmol/(m²·s))。随着水稻的发育,缓慢增长期(拔节—抽穗)也正值水稻的生长旺盛期,CO₂通量日变化幅度明显高于其他时期,此时水稻田对CO₂的吸收

能力最强,2020、2021年分别为40.392 0 μmol/(m²·s)(-32.257 4~8.134 6 μmol/(m²·s))和37.284 2 μmol/(m²·s)(-31.610 3~5.673 9 μmol/(m²·s));其次为快速增长期(分蘖—拔节)和生长后期(抽穗—成熟),2020年分别为32.247 0 μmol/(m²·s)(-25.104 9~7.142 1 μmol/(m²·s))和31.340 0 μmol/(m²·s)(-24.638 4~6.701 6 μmol/(m²·s)),2021年分别为38.723 6 μmol/(m²·s)(-31.071 7~7.651 9 μmol/(m²·s))和32.357 2 μmol/(m²·s)(-26.498 3~5.858 9 μmol/(m²·s))。其中,2021年缓慢增长期的CO₂通量与其他年份、其他季节略有不同,日变化更接近于“V型”。

2.1.2 日以上尺度的变化特征分析

水稻生长季总体上呈现二氧化碳汇,2020年水稻全生育期的总固碳量为396.3 g/m²,而2021年总固碳量为491.9 g/m²,年际波动较大。在日尺度上(图2),CO₂通量整体为先下降后上升的趋势,其吸收峰值主要出现在第200~250天,此时正处于水稻的生长旺盛期;2020年与2021年分别有106 d、104 d表现为碳吸收,在第240~270天期间CO₂通量吸收均有明显的减弱。

CO₂通量在作物的不同生育期也有明显差异。2020、2021年水稻生育期CO₂通量的吸收峰值分别出现在孕穗—抽穗(-6.82 μmol/(m²·s))和拔节—孕穗期间(-6.36 μmol/(m²·s)),此时太阳辐射强、温度高,水稻生长旺盛,对水分和养分需求较大,光合作用强烈。在播种—出苗期间,土壤和作物的呼吸作用占主导,新叶光合弱,稻田整体表现为二氧化碳源;缓慢增长后期,植株逐渐成熟,叶子开始枯黄,此时光合强度逐渐减弱,干物质积累量减少,CO₂通量逐渐增大。但是,2020年CO₂通量的吸收明显弱于2021年,以抽穗—乳熟期差别最大,其次为孕穗—抽穗期;且CO₂通量在2020年抽穗—乳熟期吸收骤减,这些差异尚需要进一步分析环境要素的影响。

2.2 多时间尺度CO₂通量的影响因子分析

2.2.1 小时尺度的影响因子分析

以往的研究表明,白天光合有效辐射对CO₂通量的变化起主要作用^[5,23];在夜间,温度是CO₂通量主要影响因子^[6]。因此,分别以PPFD和TA为输入值,用光响应方程和呼吸方程模拟白天和夜间CO₂通量。应用非线性方程对2020和2021年的数据进行拟合,结果如图3所示。表观初始光能利用率 α 为5%,生态系统最大光合速率 $A_{\max}$ 为55.15~64.15 μmol/(m²·s),参考温度下的生态系统呼吸 $R_{\text{eco,ref}}$ 为6.82~6.87 μmol/(m²·s),生态系统呼吸为0时的温度 T_0 为238.41~248.19 K。与其他研究相比^[5,23],本研究的 $A_{\max}$ 明显偏高, α 处于中等偏上水平,这也印证了该农田是高标准农田,产量

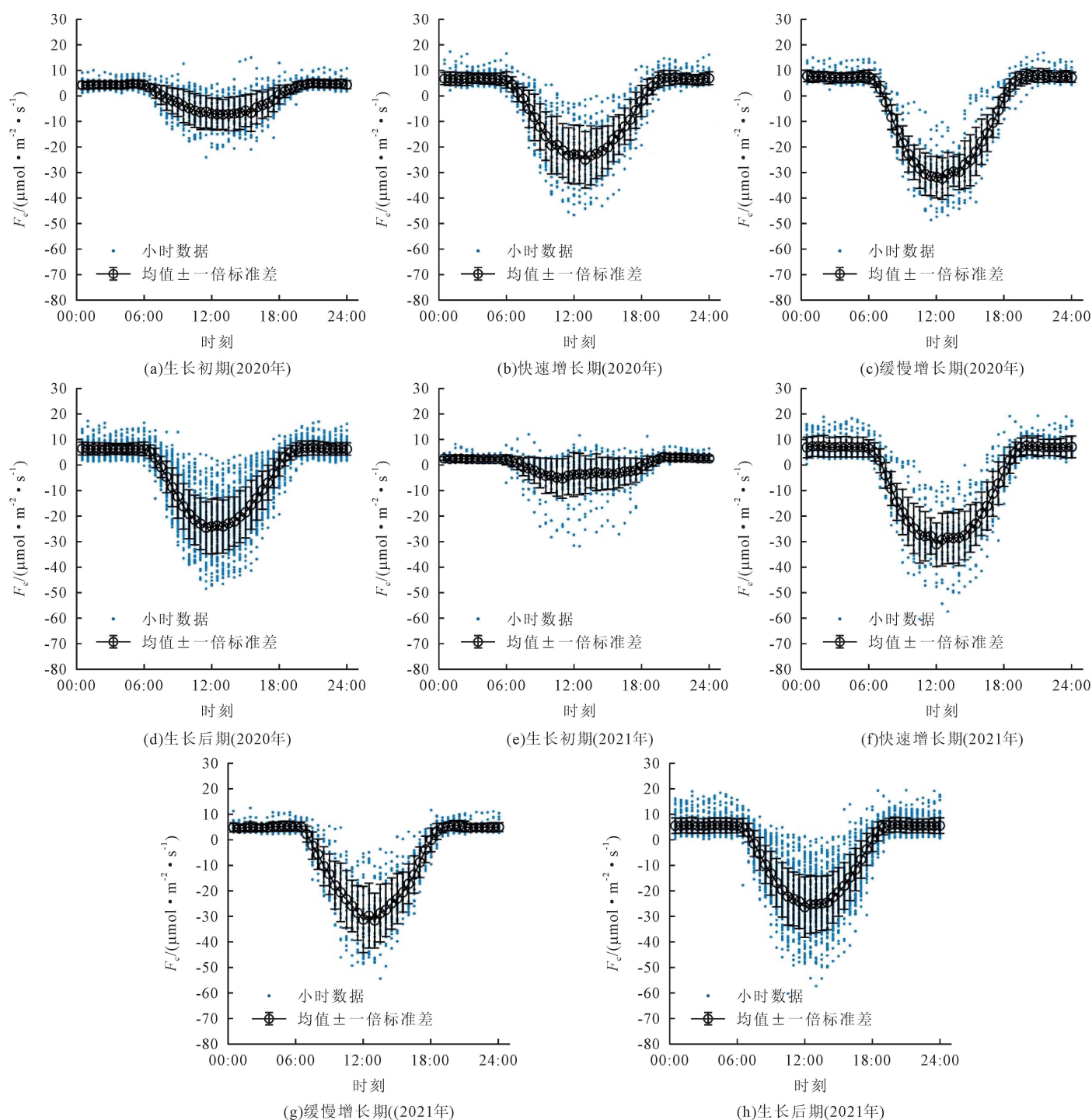


图1 2020、2021年水稻生长季小时尺度CO₂通量的日变化
Fig.1 Diurnal variation of hourly-scale CO₂ fluxes in rice growing season in 2020 and 2021

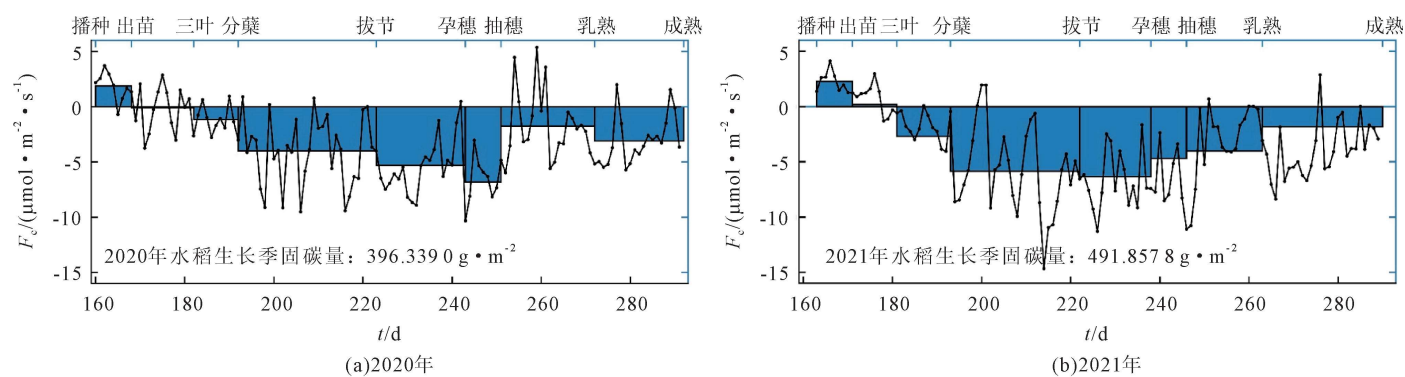


图2 2020、2021年水稻生长季CO₂通量变化特征
Fig.2 Characteristics of CO₂ flux changes in rice growing season in 2020 and 2021

高、固碳能力强。同时,在不同生育期,光响应方程的拟合参数有很大差别。随着生育期的发展,两年间表现初始光能利用率和最大光合速率均出现先上升后下降的趋势,在缓慢增长期达到最高,此时作物可以更有效地利用光能进行光合作用,快速将光能转化为

化学能,推动作物的生长和发育过程,这与朱咏莉等^[23]的结论一致。

但是,白天PPFD并不是影响CO₂通量的唯一因素。随着PPFD的增大,CO₂通量的分布逐渐离散,表明了它还受到其他环境因子的影响,PPFD愈强,其他因子的

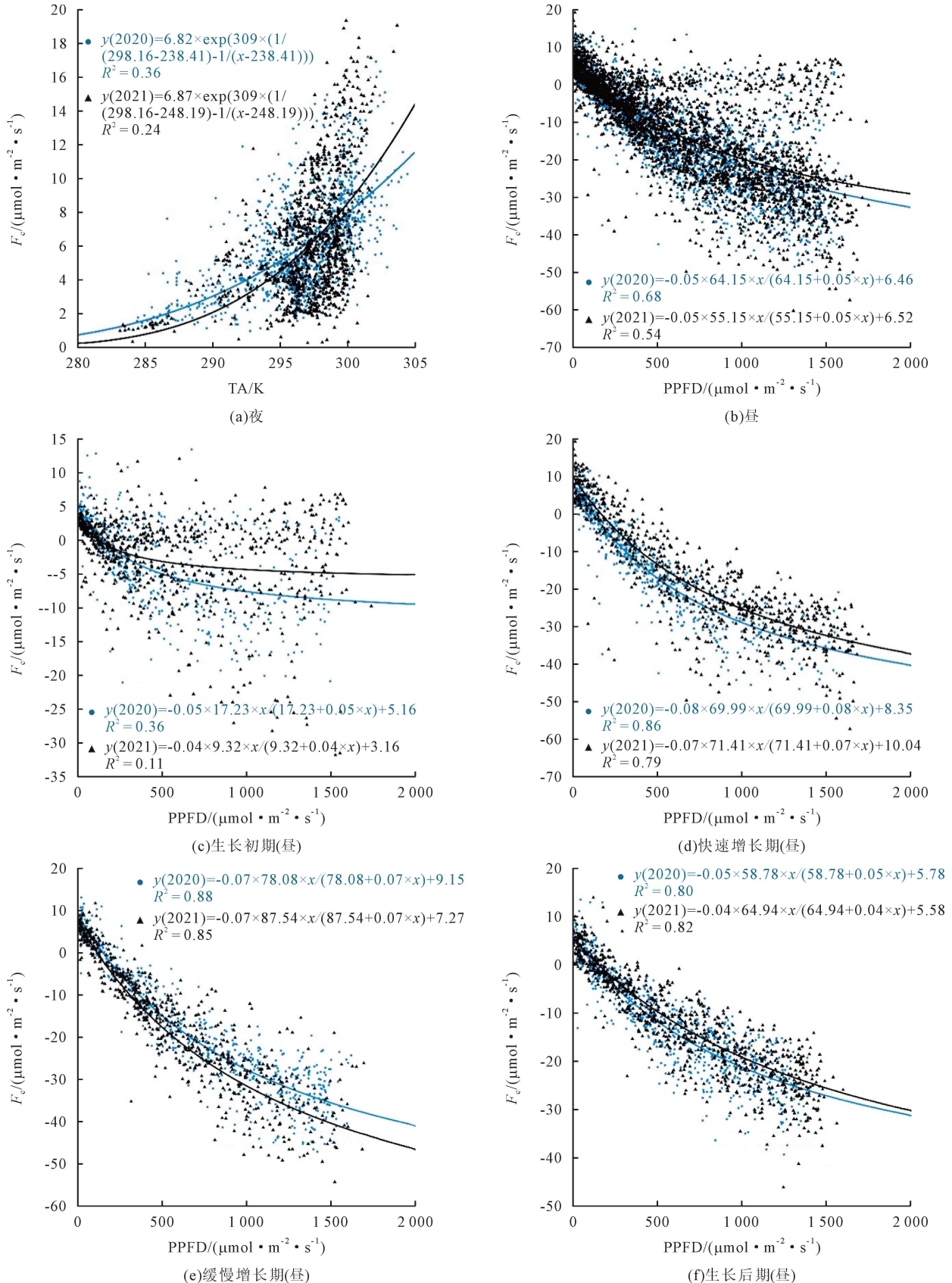


图3 2020、2021年水稻生长季小时尺度CO₂通量的非线性回归分析

Fig.3 Nonlinear regression analysis of hourly-scale CO₂ fluxes in rice growing season in 2020 and 2021

影响也愈大。夜间,TA对于CO₂通量的影响也是类似的。为此,接下来利用优势分析量化各个环境因素对CO₂通量的贡献率。结果如图4所示,白天PPFD是CO₂通量绝对的主控因子,两年的贡献度均在73%左右。夜间CO₂

通量的主要贡献来自于TA(70.0%),SWC是仅次于温度的重要影响因素,贡献度为24.3%。但不同年份差异较大,夜间2021年TA贡献度为50.5%,比2020年减少了24.9个百分点,而SWC正好相反,增加了37.3个百分点。

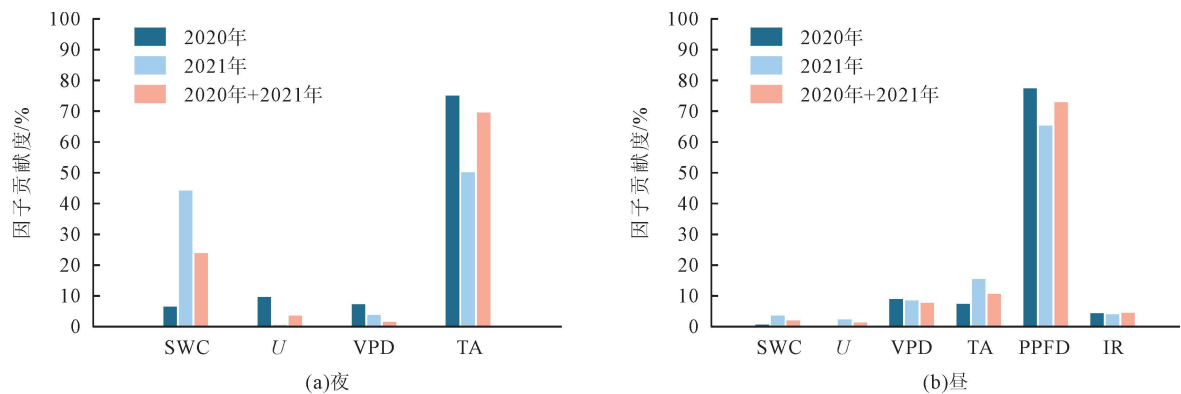


图4 2020、2021年水稻生长季小时尺度CO₂通量的优势分析
Fig.4 Dominance analysis method of hourly-scale CO₂ fluxes in rice growing season in 2020 and 2021

为了进一步分析主控因子之间的相互影响,本研究应用通径分析拆分PPFD、TA、VPD等因子对CO₂通量的直接贡献与间接贡献(表2)。结果表明,白天对CO₂通量直接贡献最大的因子是PPFD,其次是VPD和TA,它们的直接通径系数分别为-0.827、0.379和-0.269,表现为CO₂通量随着PPFD和TA的增大而减小,促进CO₂吸收;而VPD正好相反,CO₂通量因VPD的增大而增大,抑制CO₂吸收。在夜间,直接贡献最大的因子是TA,直接通径系数为0.473,其次是SWC(-0.213),显然TA和SWC对CO₂的直接贡献正好相反,TA升高促进CO₂排放,而SWC的升高则会抑制CO₂排放。

值得注意的是,VPD无论是白天还是夜间都表现出了强烈的间接贡献。在白天,VPD主要通过PPFD和TA间接作用于CO₂通量,两者的间接通径系数分别为-0.472和-0.170,说明了VPD通过TA和PPFD间接促进了碳吸收,这种间接效应和直接效应会相互影响、相互制约。在夜间,SWC对CO₂通量也有着较强的间接作用,间接通径系数为-0.127,在很大程度上是通过TA作用于CO₂通量的,SWC的增加导致TA的减小从而促进了碳吸收,间接效应与直接效应会相互影响、相互促进。可见,在影响CO₂通量的因子间,既有相互制约的关系,又有相互促进的关系。

表2 水稻生长季小时尺度昼夜CO₂通量的通径分析
Table 2 Flux analysis of hourly-scale diurnal CO₂ fluxes in rice growing season

自变量	相关系数	直接通径系数	间接通径系数						合计
			SWC	U	VPD	TA	PPFD	IR	
昼	SWC	-0.141**	-0.089	0.004	0.008	0.046	-0.043	-0.066	-0.051
	U	-0.132**	-0.041	0.008	0.027	-0.025	-0.138	0.037	-0.091
	VPD	-0.276**	0.379	-0.002	-0.003	-0.170	-0.472	-0.008	-0.655
	TA	-0.361**	-0.269	0.015	-0.004	0.240	-0.375	0.031	-0.093
	PPFD	-0.751**	-0.827	-0.005	-0.007	0.217	-0.122	-0.007	0.077
	IR	-0.176**	-0.183	-0.032	0.008	0.017	0.045	-0.032	0.006
夜	SWC	-0.339**	-0.213	0.008	0.002	-0.137			-0.127
	U	-0.092**	-0.124	0.014	-0.003	0.021			0.032
	VPD	0.098**	-0.048	0.008	-0.008	0.147			0.147
	TA	0.514**	0.473	0.061	-0.005	-0.015			0.041

注:**在 0.01 级别(双尾),相关性显著。

2.2.2 日以上尺度的影响因子分析

为了研究环境因子对日尺度和生育期尺度CO₂通量的影响,采用优势分析量化各个因子的贡献度,如图5所示。在日尺度上,对CO₂通量的影响仍以PPFD为主,是影响CO₂通量的主控因子,该结论与朱咏莉等^[30]的研究结果相同。但与小时尺度的贡献度相比已有所降低,日尺度上PPFD的平均贡献度为54.0%。

与朱咏莉等^[30]的研究结果不同的是,本研究的第二主控因子是VPD,平均贡献度为15.4%;TA的贡献度为12.1%,位居第三。在生育期尺度上,IR对CO₂通量的贡献度明显增加(28.0%),与PPFD(贡献度为32.7%)和VPD(贡献度为14.1%)作为CO₂通量的主控因子。与小时尺度和日尺度相比,水汽类因子、平均风速类因子的贡献度有所增强,各个因子的贡献度趋于平均。

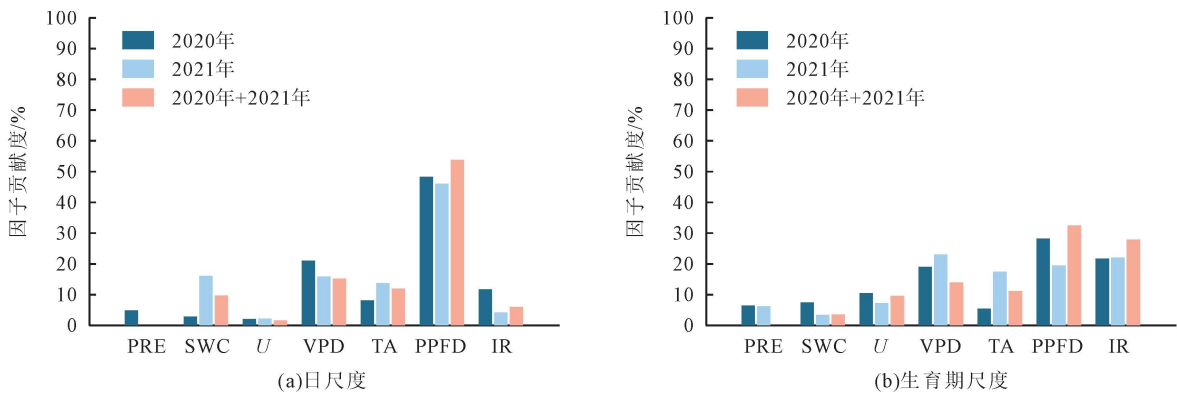


图5 2020、2021年水稻生长季日尺度与生育期尺度CO₂通量的优势分析
Fig.5 Dominance analysis method of daily-scale and fertility-scale CO₂ fluxes in rice growing season in 2020 and 2021

为了进一步分析各因子之间的相互影响,本文应用通径分析拆分各因子对 CO₂通量的直接贡献和间接贡献,结果如表3所示。从日尺度来看,对 CO₂通量的直接贡献最大的依然是PPFD,其次为 VPD。其中,PPFD 的直接通径系数为-0.928,说明它的直接贡献是促进 CO₂吸收,而 VPD 的直接贡献对 CO₂吸收是抑制作用。PRE 和 U 对 CO₂通量的直接贡献非常小,可以忽略。在众多间接通径系数中,VPD 通过 PPFD 和 PPFD 通过 VPD 影响 CO₂通量的间接通径系数分别为-0.751 和 0.490,这表明了 VPD 和 PPFD 之间的交互作用是显著影响稻田碳吸收的重要因素。将直接通径系数和间接通径系数相比,VPD 的间接贡献最大,间接通径系

数为-0.855,甚至超过了直接贡献,使得最终 VPD 的增加对 CO₂吸收起到促进作用。其次是 PPFD,它的间接通径系数为0.368,对碳吸收具有抑制作用,但 PPFD 的间接通径系数远小于直接通径系数,说明 PPFD 对 CO₂通量的影响仍以直接作用为主。与日尺度类似,在生育期尺度上 CO₂通量的直接贡献仍以 PPFD 和 VPD 为主,直接通径系数分别为-0.796 和 0.617,两者对 CO₂通量的作用正好相反。但是,由于 VPD 通过 PPFD 对 CO₂通量的间接通径系数为-0.562,抵消了它的直接贡献,因而 VPD 对 CO₂通量的总效应并不显著。同时,PPFD 通过 VPD 产生的间接贡献也部分抵消了 PPFD 的直接效应,降低了 PPFD 对 CO₂通量的贡献率。

表 3 水稻生长季日及以上尺度 CO₂通量的通径分析
Table 3 Path analysis method of CO₂ fluxes in rice growing season at daily and above scales

	自变量	相关系数	直接通径系数	间接通径系数							合计
				PRE	SWC	<i>U</i>	VPD	TA	PPFD	IR	
日尺度	PRE	0.104	0.031		0.002	0.002	-0.180	0.002	0.246	0.003	0.074
	SWC	-0.243**	-0.229	0.000		-0.004	0.004	0.055	-0.013	-0.056	-0.014
	<i>U</i>	0.157*	0.030	0.002	0.033		-0.061	-0.026	0.126	0.054	0.127
	VPD	-0.249**	0.606	-0.009	-0.001	-0.003		-0.085	-0.751	-0.005	-0.855
	TA	-0.295**	-0.224	0.000	0.056	0.003	0.231		-0.401	0.040	-0.071
	PPFD	-0.561**	-0.928	-0.008	-0.003	-0.004	0.490	-0.097		-0.011	0.368
	IR	-0.225**	-0.132	-0.001	-0.097	-0.012	0.025	0.068	-0.077		-0.093
生育期尺度	PRE	-0.016	-0.031		-0.047	-0.005	-0.082	-0.026	0.093	0.081	0.015
	SWC	-0.210	0.168	0.009		-0.032	0.112	0.040	-0.186	-0.320	-0.377
	<i>U</i>	0.393	0.068	0.002	-0.079		-0.025	-0.046	0.085	0.388	0.325
	VPD	-0.019	0.617	0.004	0.031	-0.003		-0.046	-0.562	-0.059	-0.636
	TA	-0.283	-0.154	-0.005	-0.044	0.020	0.186		-0.436	0.150	-0.129
	PPFD	-0.582*	-0.796	0.004	0.039	-0.007	0.436	-0.084		-0.174	0.214
	IR	-0.588*	-0.488	0.005	0.110	-0.054	0.075	0.047	-0.283		-0.100

注:**在 0.01 级别(双尾),相关性显著;*在 0.05 级别(双尾),相关性显著。

3 结论

长三角地区是我国典型的稻麦轮作区和主要的粮食生产区,本研究以江苏海安雅周镇一处典型稻麦轮作农田生态系统为研究对象,利用涡度相关法进行了 CO₂通量的连续观测,结合环境因子的观测,应用回归分析、相关分析、优势分析和通径分析,研究了

稻麦轮作生态系统水稻生长季多尺度 CO₂通量的时间变化特征,量化了环境因子对 CO₂通量变化的贡献。结果表明:(1)在小时尺度上,CO₂通量具有明显的日变化,呈“U形”或“V型”单峰曲线;在日尺度上,CO₂通量的吸收峰值主要出现在第 200~250 天,此时正处于生长发育的快速生长期;但是 CO₂通量在不同生育期差异明显、年际间波动较大,2020 年水稻全

生育期的总固碳量为396.3 g/m²,而2021年总固碳量为491.9 g/m²。(2)在小时尺度上,白天PPFD是CO₂通量绝对的主控因子,贡献度在73%左右,而夜间的主要贡献来自于TA。在不同时间尺度上,影响CO₂通量的主控因子始终是光合有效辐射;但随时间尺度的增加,各个因子贡献度的差异逐渐减小。在日尺度上,除了PPFD,VPD和TA也是影响CO₂通量的重要因子;在生育期尺度上,IR和VPD对CO₂通量的贡献度仅次于PPFD。(3)PPFD和VPD是对CO₂通量直接贡献最大的环境因子,其中PPFD表现为CO₂通量随着PPFD的增大而减小,表现为促进CO₂吸收;而VPD正好相反,CO₂通量因VPD的增大而增加,表现为抑制CO₂吸收;但PPFD和VPD的交互作用所产生的间接效应可起到制约作用,降低PPFD和VPD的直接贡献。

[参考文献]

- [1] 刘曼,李国栋,任晓娟. 农田生态系统碳水通量研究进展[J]. 河南大学学报:自然科学版, 2021,51(3):253-267.
Liu Man, Li Guodong, Ren Xiaojuan. Advances in research on carbon and water flux in farmland ecosystem[J]. Journal of Henan University: Natural Science Edition, 2021, 51(3): 253-267.
- [2] 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 Xibao, Yang Guishan, Sun Xiaoxiang. Analysis of net ecosystem CO₂ exchange (NEE) in the rice-wheat rotation agroecosystem of the Lake Taihu Basin, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(20):6655-6665.
- [3] He H L, Wang S Q, Zhang L, et al. Altered trends in carbon uptake in China's terrestrial ecosystems under the enhanced summer monsoon and warming hiatus[J]. National Science Review, 2019,6(3):505-514.
- [4] WMO Greenhouse Gas Bulletin. The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2022[R]. Geneva: World Meteorological Organization, 2023.
- [5] 文双雅,高倩文,高志强,等. 稻油两熟农田生态系统净碳交换特征及其主要影响因素研究[J]. 农业现代化研究, 2022, 43(1):162-171.
Wen Shuangya, Gao Qianwen, Gao Zhiqiang, et al. Characteristics of net carbon exchange and its main influencing factors in rice-oilseed rape double cropping farmland ecosystem[J]. Research of Agricultural Modernization, 2022, 43(1): 162-171.
- [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 Xiaoxiang, Chang Zhizhou, Yang Guishan, 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] 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 Qi, Hu Zhenghua, Xue Hongxi, 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.
- [8] 朱咏莉,童成立,吴金水,等. 亚热带稻田生态系统CO₂通量的季节变化特征[J]. 环境科学, 2007,28(2):283-288.
Zhu Yongli, Tong Chengli, Wu Jinshui, et al. Seasonal characteristics of CO₂ fluxes from the paddy ecosystem in subtropical region[J]. Environmental Science, 2007, 28(2):283-288.
- [9] 李俊,于强,孙晓敏,等. 华北平原农田生态系统碳交换及其环境调控机制[J]. 中国科学 D辑:地球科学, 2006,36(S1):210-223.
Li Jun, Yu Qiang, Sun Xiaomin, et al. Carbon exchange in North China Plain's agro-ecosystems and its environmental mechanisms[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2006, 36(S1):210-223.
- [10] Zhu L Q, Hu N J, Yang M F, et al. Effects of different tillage and straw return on soil organic carbon in a rice-wheat rotation system[J]. PLoS One, 2014,9(2):e88900.
- [11] Lee X, Massman W J, Law B E. Handbook of Micrometeorology: a Guide for Surface Flux Measurement and Analysis [M]. Dordrecht: Kluwer Academic, 2004.
- [12] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1980,106(447):85-100.
- [13] 邱吉丽,张弥,蒲旖旎,等. 涡度相关观测的太湖CH₄通量数据插补方法评价[J]. 应用生态学报, 2022,33(10):2785-2795.
Qiu Jili, Zhang Mi, Pu Yini, et al. Evaluation of gap-filling methods for CH₄ flux data based on eddy covariance method in the Lake Taihu, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(10):2785-2795.
- [14] 许琰,周石砾,晋绿生,等. 新疆北部覆膜滴灌棉田的碳交换日、生长季变化特征[J]. 干旱区地理, 2013,36(3):441-449.
Xu Yan, Zhou Shiqiao, Jin Lyusheng, et al. Diurnal and seasonal variation of carbon dioxide exchange over a film-mulched cotton field under drip irrigation in northern Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(3):441-449.

- [15] 王春林,周国逸,王旭,等. 鼎湖山针阔叶混交林冠层下方CO₂通量及其环境响应[J]. 生态学报, 2007,27(3):846-854.
Wang Chunlin, Zhou Guoyi, Wang Xu, et al. Below-canopy CO₂ flux and its environmental response characteristics in a coniferous and broad-leaved mixed forest in Dinghushan, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007,27(3):846-854.
- [16] 吴东星,李国栋,亢琼琼,等. 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, 2018,29(3):827-838.
Wu Dongxing, Li Guodong, Kang Qiongqiong, et al. Characteristics of CO₂ flux and its influence factors over winter wheat agroecosystem in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018,29(3):827-838.
- [17] Budescu D V. Dominance analysis: a new approach to the problem of relative importance of predictors in multiple regression[J]. Psychological Bulletin, 1993,114(3):542-551.
- [18] Azen R, Budescu D V. The dominance analysis approach for comparing predictors in multiple regression[J]. Psychological Methods, 2003,8(2):129-148.
- [19] 谢宝国,龙立荣. 优势分析方法及其应用[J]. 心理科学, 2006,29(4):922-925.
Xie Baoguo, Long Lirong. Dominance analysis and its application[J]. Journal of Psychological Science, 2006,29(4):922-925.
- [20] 张忠,陈新军,余为. 基于优势分析法的中东大西洋渔获量国别和地区差异分析[J]. 渔业科学进展, 2023,44(6):18-29.
Zhang Zhong, Chen Xinjun, Yu Wei. Country and region based differences in fishing in the eastern central Atlantic Ocean using dominance analysis[J]. Progress in Fishery Sciences, 2023,44(6):18-29.
- [21] 杜家菊,陈志伟. 使用SPSS线性回归实现通径分析的方法[J]. 生物学通报, 2010,45(2):4-6.
Du Jiaju, Chen Zhiwei. Method of path analysis with SPSS linear regression[J]. Bulletin of Biology, 2010,45(2):4-6.
- [22] 张雪松,闫艺兰,胡正华. 不同时间尺度农田蒸散影响因子的通径分析[J]. 中国农业气象, 2017,38(4):201-210.
Zhang Xuesong, Yan Yilan, Hu Zhenghua. Using path analysis to identify impacting factors of evapotranspiration at different time scales in farmland[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017,38(4):201-210.
- [23] 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 Yongli, Wu Jinshui, Tong Chengli, et al. Responses of CO₂ fluxes to light intensity and temperature in rice paddy field[J]. Environmental Science, 2008,29(4):1040-1044.