

葛培, 赵佳玉, 张弥, 等. 淡水养殖池塘CO₂通量多时间尺度变化特征及其影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(1): 190–201.
GE P, ZHAO J Y, ZHANG M, et al. Variation characteristics of CO₂ flux and their impact on freshwater aquaculture pond at multi-temporal scales[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(1): 190–201.



开放科学 OSID

淡水养殖池塘CO₂通量多时间尺度变化特征及其影响要素

葛培^{1,2}, 赵佳玉^{3*}, 张弥^{1,2*}, 肖薇^{1,2}, 邱吉丽^{1,2}, 贾磊^{1,2}, 包恒鑫^{1,2}, 石婕⁴, 赵若男⁵

(1. 南京信息工程大学大气环境中心, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044; 3. 广东海洋大学海洋与气象学院, 广东 湛江 524088; 4. 贵州省黔南州平塘县气象局, 贵州 黔南 558000; 5. 河北省气象与生态环境重点实验室, 石家庄 050021)

摘要:为探讨淡水养殖CO₂通量的多时间尺度变化特征及其影响因子,本研究以我国长江三角洲区域典型淡水养殖池塘为研究对象,基于涡度相关法(Eddy covariance, EC)测定的2016—2021年高频连续CO₂通量数据,对CO₂通量的多时间尺度变化特征及其环境、人为影响要素进行分析。结果表明:养殖池塘CO₂通量(以C计)存在明显的日变化、季节变化和年际变化特征,其年尺度交换量的变化范围为-671~1 005 kg·hm⁻²·a⁻¹,年均值为(-74±688)kg·hm⁻²·a⁻¹,表现为CO₂的弱汇。CO₂通量在不同时间尺度的主控因子存在明显差异,其中在0.5 h尺度上,太阳辐射和气温分别是白天和夜晚CO₂通量的主要影响因子;日尺度和月尺度的CO₂通量则分别受太阳辐射和归一化植被指数(NDVI)调控,且CO₂通量与上述要素均呈显著负相关;年际尺度上,养殖池塘CO₂通量受饲料投入量与NDVI的共同作用,二者建立的回归方程可以解释64%的CO₂年总通量变化,其中CO₂排放量随饲料投入量的增加呈线性增加($R^2=0.55, P<0.05$)。根据本研究结果,建议在未来可将提高饲料利用率作为控制养殖水体温室气体排放、改善水体生态环境、实现水产养殖业可持续发展的重要途径。

关键词:淡水养殖池塘; 涡度相关法; CO₂通量; 多时间尺度; 影响因子

中图分类号: X714; X16 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2024)01-0190-12 doi:10.11654/jaes.2023-0229

Variation characteristics of CO₂ flux and their impact on freshwater aquaculture pond at multi-temporal scales

GE Pei^{1,2}, ZHAO Jiayu^{3*}, ZHANG Mi^{1,2*}, XIAO Wei^{1,2}, QIU Jili^{1,2}, JIA Lei^{1,2}, BAO Hengxin^{1,2}, SHI Jie⁴, ZHAO Ruonan⁵

(1. NUIST Center on Atmospheric Environment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. College of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 4. Meteorological Bureau of Pingtang County, Qiannan Prefecture, Guizhou Province, Qiannan 558000, China; 5. Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: In order to investigate variation characteristics of CO₂ fluxes at multi-temporal scales and identify their impact factors, high-frequency CO₂ flux was continuously measured by the eddy covariance method from 2016 to 2021 in typical freshwater aquaculture ponds in the Yangtze River Delta, China. By using these data, the multi-temporal variation characteristics of CO₂ flux and its environmental and anthropogenic factors were analyzed. The results clearly showed daily, seasonal and interannual variations in CO₂ flux. The annual amount of CO₂ flux (calculated in C) ranged from -671 kg·hm⁻²·a⁻¹ to 1 005 kg·hm⁻²·a⁻¹ with an average value of (-74±688) kg·hm⁻²·a⁻¹,

收稿日期: 2023-03-28 录用日期: 2023-06-12

作者简介: 葛培(1998—),男,安徽宿州人,硕士研究生,从事内陆水体温室气体交换研究。E-mail: 20211208004@nuist.edu.cn

*通信作者: 张弥 E-mail: zhangm.80@nuist.edu.cn; 赵佳玉 E-mail: jiaiyuzhao@gdou.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFA0607501, 2019YFA0607202); 国家自然科学基金项目(41575147, 41975143)

Project supported: National Key Research and Development Program of China (2020YFA0607501, 2019YFA0607202); National Natural Science Foundation of China(41575147, 41975143)

indicating that the ponds were a weak CO₂ sink. The main impact factors of CO₂ flux at different temporal scales were not the same. At the half-hourly scale, solar radiation and air temperature controlled daytime and nighttime CO₂ flux, respectively. At the daily and monthly scales, CO₂ flux were regulated by solar radiation and normalized vegetation index (NDVI), respectively. Moreover, CO₂ fluxes were negatively and significantly correlated with these factors. At the annual scale, the CO₂ flux was influenced by both the amount of feed inputs and NDVI. The regression equation established by the two factors could explain 64% of the total annual CO₂ flux variation. Furthermore, CO₂ emissions increased linearly with the increase in feed inputs ($R^2=0.55, P<0.05$). Based on this study, improving feed utilization efficiency is suggested as an important way to control greenhouse gas emissions from aquaculture ponds, improve the ecological environment of water bodies, and sustainably develop the aquaculture industry in the future.

Keywords: freshwater aquaculture pond; eddy covariance method; CO₂ flux; multi-temporal scale; impact factor

大气温室气体浓度增加引发的全球变暖是当前全球面临的重大生态环境问题之一。淡水养殖作为世界人口食物蛋白质的主要来源,贡献了约77%的全球养殖水产品^[1],同时其在全球碳循环中也发挥着重要作用。池塘养殖是淡水养殖的主要生产方式,其较小的面积、较浅的水深以及大量外源饲料和肥料的输入,为CO₂的产生和传输创造了有利条件^[2-3],特别是底泥累积的残余饲料和肥料可显著提升CO₂生成速率,使养殖池塘可能成为CO₂排放的热点区域^[4-5]。近年来,为满足人口对蛋白质日益增长的需求,全球淡水养殖面积及其饲料投入量以高速率不断增加,从而可能会使淡水养殖的CO₂排放量进一步增强。我国是世界上淡水养殖产量最高的国家,为全球提供了约60%的淡水养殖水产品^[1]。因此,准确评估养殖池塘CO₂交换量,明确其控制要素,已成为区域碳收支核算以及制定减排战略等相关研究的焦点问题之一。

当前研究中淡水养殖池塘CO₂年交换量(以C计)估算仍存在较大不确定性,变化范围为-2 263~112 kg·hm⁻²·a⁻¹,最高相差约20倍^[2-6],其中高频连续碳通量观测数据的缺失是引起上述差异的主要原因之一。受多种环境因子和人为管理措施的叠加影响,养殖池塘CO₂通量存在较强的时间变化^[6-8]。目前已有研究中约90%采用静态箱法和传输系数法对池塘CO₂通量进行测定^[9-10]。这些方法虽原理简单、操作方便,但考虑到人力物力,较难实现时间上的高频连续测定,采样频率多为每月2~3次^[11-12],且主要集中在白天进行观测,这样无法准确捕捉CO₂通量的时间动态信息,进而将其观测误差传递到年总量的估算中。例如,若仅采用秋季湖泊混合期间观测值代表瑞典富营养化小型湖泊CO₂年平均速率,则年总量将被低估约86%^[9]。涡度相关法(Eddy covariance, EC)具有观测频率高、时间连续、稳定性好且对观测环境无干扰等优势^[13-14],同时其观测结果可代表研究区域内的平均通

量,并且该方法在小型水体碳通量观测中的适用性也已得到验证^[5-7],可为获取多年高频连续准确碳通量观测数据提供重要技术支撑。但目前EC法在养殖池塘等小型水体CO₂通量观测中的应用还相对有限,特别是多年(>3 a)连续观测还未见报道^[5-6,15]。

养殖池塘CO₂通量多时间尺度变化特征的影响要素,特别是人为措施的影响目前还尚不明确^[16]。人为管理措施如晒塘、曝气、饲料投入等可通过改变养殖水体和底泥中的生物、物理、化学过程等,进而影响CO₂交换^[5,17-18]。当前研究已对部分措施如排水、晒塘和曝气的影响研究较为明确,例如:研究发现,养殖池塘在排水期间会由CO₂吸收汇 $[-0.006\pm 0.001]\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 转变为CO₂排放源 $[(0.009\pm 0.002)\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}]$ ^[17];曝气可通过增加水体中的溶解氧浓度,促进CH₄氧化进而增加CO₂的排放^[8,10,18]。然而,饲料投入作为淡水养殖池塘的重要措施,目前针对该措施的研究还较为薄弱^[2]。饲料和肥料的输入一方面可以为底泥CO₂有机分解提供充足底物,显著提升CO₂的产生速率^[19-20];但过量饲料和肥料的输入也会加剧水体富营养化,可能进一步增强水体中浮游植物的光合固碳速率^[21]。在年尺度上,饲料投入量如何影响养殖池塘CO₂交换量?影响程度有多大?以上问题还亟需基于多年观测进一步分析与探讨。

长江三角洲地区水网密布,是我国重要的水产养殖基地,该地区淡水养殖池塘面积约为 $6.2\times 10^9\text{m}^2$,占全国淡水养殖池塘总面积的24%^[22],具有较好的代表性。因此,本研究选取我国长三角区域一处典型淡水养殖池塘为研究对象,采用EC法定了2016—2021年6a的CO₂通量数据,旨在明晰CO₂通量的多时间尺度特别是年际变化特征,并结合环境要素及饲料投入量等数据,阐明CO₂通量多时间尺度的影响要素。研究结果可为准确评估区域碳排放量及制定减排政策等提供数据支撑和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

本研究观测地点位于安徽省滁州市全椒县官渡村(31°58' N, 118°15' E, 图1)。研究区域养殖池塘平均面积约为7 000 m², 平均水深会根据养殖类型不同而变化。该区域属于亚热带季风气候, 年平均气温和降雨量分别为16.1 °C和1 090 mm(数据来源: <http://data.cma.cn/>)。

本研究的观测时间为2016年1月至2021年12月。该研究区域主要包括两种养殖模式, 其中2016年的A塘、D塘以及2017年的B塘采用小龙虾-四大家鱼(青鱼、草鱼、鲢鱼、鳙鱼等)混养模式, 其他时间段池塘均采取鱼-蚌混养模式。关键养殖措施如下: 对于小龙虾-四大家鱼混养池塘, 1—5月池塘处于晒塘阶段, 其中4月初管理者开始在池塘中心种植黑麦草和稗子, 种植面积约为池塘的30%, 为小龙虾提供食物和栖息地; 随后在5月初投入虾苗, 并且于每日8:00与18:00通过自动投食机投放饲料, 饲料包括大豆和人工配合饲料; 在6月中旬小龙虾全部捕获之后, 投入鱼苗, 饲料投放时间与之前相似, 养殖期间平均水深约1.5 m。对于鱼-河蚌混养池塘, 养殖品种包括四大家鱼和河蚌; 饲料投入以人工饲料为主, 投入时间分别为9:30、12:30和18:00; 同时为促进浮游植物生长, 为河蚌提供养分, 管理者会在每年2月和11月底投入鸡粪。鱼-河蚌混养池塘除捕捞期间处于

晒塘阶段(大概持续7 d), 其他时间段均处于淹水阶段, 平均水深约1.8 m。

基于前期文献调研结果^[23-25], 本研究养殖管理模式与长三角其他地区养殖措施基本相同, 均包括晒塘、曝气、饲料投入等关键人工管理措施, 且实施时间和方法较为一致, 但饲料投入量的时间和总量依据不同区域的实际情况存在差异。综上, 本研究的淡水养殖池塘在长三角地区具有一定的代表性。

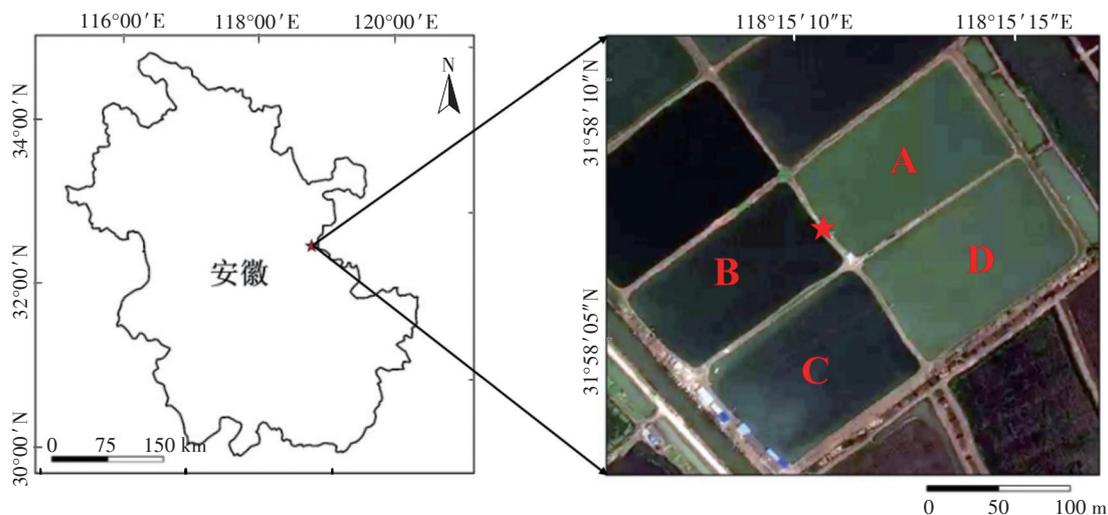
1.2 观测方法

1.2.1 涡度相关观测系统

本研究基于开放式涡度相关观测系统对目标池塘CO₂通量进行高频、原位、连续观测。该系统安装高度距离地面约为1.5 m, 仪器组成及测量分量如下: 开放式红外CO₂/H₂O气体分析仪(型号: EC150, Campbell Scientific Inc.)测量大气中CO₂和H₂O密度, 三维超声风速仪(型号: CSAT3A, Campbell Scientific Inc.)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(型号: CR3000, Campbell Scientific Inc.)储存原始10 Hz数据, 用于后续离线通量计算。

1.2.2 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: HMP155, Vaisala Inc.)测量大气温度和湿度; 风速风向传感器(型号: 05103, R M Young Inc.)测量大气风速和风向; 自动翻筒式雨量计(型号: TR-525M, Texas Electronics Inc.)



右图红星为涡度相关系统仪器架设置
Right panel: EC measurement location is marked by the red star

图1 研究地点及养殖池塘示意图

Figure 1 Location of the study site and aquaculture ponds

测量降雨量。其中风速风向传感器和自动翻筒式雨量计架设高度为2.5 m,温湿传感器架设高度为1.5 m。本研究同时采用四分量辐射计(型号:CNR4, Kipp & Zonen B.V.)测定辐射四分量。以上观测数据均由数据采集器采集(型号:CR3000, Campbell Scientific Inc.),在线计算为30 min数据并进行存储。

本研究利用归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)刻画养殖池塘浮游植被的生长动态。遥感数据源自Sentinel-2系列卫星,该系列卫星包含2A和2B两颗卫星,卫星的重访周期为10 d。卫星搭载的多光谱成像仪(Multispectral Imager, MSI)覆盖可见光到近红外共13个波段,其中用于计算NDVI的近红外(B8)和红光(B4)波段的分辨率为10 m。基于谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)云平台,在线筛选云量低于20%的遥感数据,用于计算养殖池塘2016—2021年月尺度NDVI的时间序列。

1.3 涡度相关数据处理方法

本研究采用EddyPro软件(Version 6.2.1, LI-COR Inc.)处理10 Hz数据,并计算30 min通量,主要步骤如下:首先,对原始数据进行统计检验剔除异常值,包括振幅分辨率、缺失值以及偏度和峰度等;其次,对数据进行两次坐标旋转,使平均侧风速度和平均垂直风速度为0,以此消除由于仪器倾斜所造成的误差^[26];再次,采用空气密度效应校正(Webb-Pearman-Leuning correction, WPL校正)消除湿度和温度波动对仪器测量的影响^[27];考虑到养殖池塘内EC较低的观测高度可能会引起频谱损失,因此本研究同时开通Eddypro频谱分析校正模块,消除滤波效应^[28];最后,基于大气平稳性检验和总体湍流特征检验等质量控制,软件将通量数据划分为3个等级,分别为0(质量较好)、1(质量中等)、2(质量较差)。为保证观测结果的准确性,仅采用质量等级为0和1的数据进行后续分析。此外,本研究基于夜间摩擦风速阈值,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^[29],其中摩擦风速阈值根据REddyProC程序包获取^[30],变化范围从0.078 m·s⁻¹(2016年)到0.130 m·s⁻¹(2021年)。

在完成上述质量控制和数据筛选后,2016—2021年基于0.5 h尺度的CO₂通量有效数据量各年分别为38.02%、52.69%、53.24%、44.47%、34.41%和39.09%。造成数据缺失的原因主要来源于电力及仪器故障、恶劣天气状况以及数据质量控制等原因。本研究为进一步准确评估养殖池塘CO₂年尺度交换量,使用随机

森林(Random forest, RF)、人工神经网络(Artificial neural networks, ANN)、REddyProC程序包以及非线性回归(Non-Linear Regression, NLR)4种方法对基于0.5 h尺度的CO₂通量数据进行了插补^[31]。

RF和ANN插补步骤如下:首先,将全年数据分为养殖期(4—10月)和非养殖期(11月至次年3月),并将不同期间数据根据太阳辐射(R_s)进一步细分为白天(太阳辐射>0)和夜间(太阳辐射=0);其次,基于前期环境要素与CO₂通量之间相关关系研究结果,确定输入变量组合,具体包括感热通量、气温、太阳辐射、风速、相对湿度、气压、水汽压以及摩擦风速;同时为避免塘内如藻类等植物不同生长周期对模型的影响,在组合内加入了日序和太阳高度角数据来反映日变化和季节变化信息。RF和ANN模型采用了相同的输入变量组合;再次,本研究将输入变量数据集随机分为70%训练集(用于训练模型)与30%验证集(用于验证模型);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插补缺失数据,其中判断最优模型的方法参考邱吉丽等^[31]的研究。非线性回归插补法是利用一定时间内CO₂通量与相关环境要素建立的非线性回归经验模型,可对CO₂通量缺失数据进行插补,本研究白天采用光合有效辐射与CO₂通量建立的光响应曲线(非直角双曲线模型),夜晚模型为气温与CO₂通量建立的呼吸指数模型。除上述插补方法,本研究同时采用了REddyProC程序包确定夜间摩擦风速阈值并对CO₂通量进行插补,插补过程的输入数据包括日序、CO₂通量、潜热通量、感热通量、太阳辐射、气温、相对湿度、饱和水汽压差和摩擦风速;插补方法包括查表法、平均日变化法与边界层法,具体插补流程可参考文献[30]。上述所有插补方法均基于0.5 h时间尺度。

1.4 通量贡献区计算

本研究采用Kljun等^[32]提出的二维通量足迹模型(Flux footprint prediction, FFP)量化年尺度EC气候学源区的范围,并计算目标池塘对EC实测通量的贡献。模型的输入变量包括测量高度、粗糙度、摩擦风速、奥布霍夫长度、侧风方向的标准差、风向、平均风速和边界层高度。边界层高度数据来自美国国家海洋和大气管理局的全球数据同化系统,其他参数均由EC系统提供。

1.5 数据分析与统计方法

研究采用Matlab(R2021b)软件进行数据后处理及绘图。利用SPSS 26.0统计软件中Duncan方差分

析法检验不同年份之间的环境要素差异性。CO₂通量与各环境因子间的相关关系使用SPSS 26.0统计软件中Pearson相关分析法进行判断($P<0.05$:显著相关; $P<0.01$:极显著相关);本研究同时采用多元逐步回归模型对数据进行检验,进一步选取对CO₂通量变化贡献最显著的环境人为因子。

2 结果与分析

2.1 EC观测结果的空间代表性评价

本研究为验证EC观测信号的空间代表性,采用FFP模型模拟了观测期间年尺度的EC气候学源区范围,并计算了EC观测系统周围池塘对EC观测信号的贡献率。结果显示(图2),不同年份之间的源区范围较为一致,其中EC观测塔周围的4个池塘为主要的信号贡献源,6 a的贡献率平均值为73%。该结果表明EC观测数据可以作为养殖区域碳通量交换信号的代表。此外,由于EC观测通量信号代表的是通量源区内不同位置地表源强度的加权平均,因此为获取与CO₂通量信号匹配的饲料输入量大小,本研究基于不同池塘的通量贡献权重和每个池塘总饲料输入量,计算了2016—2020年在气候学源区范围内的饲料投入年总量,分别为4 200、7 300、8 570、9 940、7 870 kg·hm⁻²和5 400 kg·hm⁻²(以C计)。

2.2 CO₂通量的多时间尺度变化特征

观测期间各季节CO₂通量的日变化特征如图3所示。CO₂通量在各季节均表现出相似的日变化趋势,即白天为大气CO₂的汇,吸收峰值出现在正午12:00至午后14:00期间;夜晚为大气CO₂的源,排放峰值在3:00或21:00左右。CO₂日变化幅度(吸收峰值与排放峰值之差)在不同季节间存在差异,其中春季和夏季CO₂通量日变化幅度相对较高,分别为4.11 μmol·m⁻²·s⁻¹(-2.41~1.70 μmol·m⁻²·s⁻¹)和5.11 μmol·m⁻²·s⁻¹(-2.53~2.58 μmol·m⁻²·s⁻¹),显著高于秋季日变化幅度1.4~2.0倍($P<0.05$);冬季吸收与排放信号均最弱,CO₂通量的日变化幅度仅为0.96 μmol·m⁻²·s⁻¹(-0.75~0.21 μmol·m⁻²·s⁻¹)。

图4展示了观测期间养殖池塘CO₂通量的季节变化特征。养殖期内(4—10月)CO₂的吸收与排放信号均较强,非养殖期(11月至次年3月)CO₂的吸收与排放信号均较弱(图4a)。观测期内日尺度上CO₂通量的吸收与排放峰值均出现在夏季(6—8月:-2.96~3.77 μmol·m⁻²·s⁻¹),并且与日变化特征类似,冬季(12月至次年2月:-1.79~1.56 μmol·m⁻²·s⁻¹)的

吸收与排放信号相对较弱。从季节平均的角度,各年份CO₂通量季节变化趋势差异较大(图4b),其中CO₂吸收量和排放量的峰值分别出现在2016年和2019年的夏季。

为进一步明确年尺度养殖池塘CO₂的源汇特征及变化趋势,本研究首先采用4种方法对0.5 h尺度CO₂通量进行了插补,以此获取CO₂通量完整的时间序列并计算CO₂交换总量。观测期间各方法插补的年总量结果如表1所示。结果表明:多数年份不同方法之间的插补结果都较为接近,且不存在显著差异($P=0.81$)。本研究为进一步降低年尺度CO₂总量估算的不确定性,采用4种方法插补结果的平均值和标准差分别代表各年份的CO₂交换总量及其不确定性(表1)。由表1可知,养殖池塘CO₂通量(以C计)存在显著的年际变化特征($P<0.01$),整体变化范围为-671~1 005 kg·hm⁻²·a⁻¹,2018年和2019年表现为CO₂排放源,其他年份均为CO₂汇,多年均值为(-74±688)kg·hm⁻²·a⁻¹,呈现为弱碳汇。

表1 基于不同插补方法计算的养殖池塘各年CO₂总通量(kg·hm⁻²·a⁻¹,以C计)

Table 1 Total annual CO₂ flux of aquaculture ponds calculated based on the data filled by different interpolation methods(kg·hm⁻²·a⁻¹, calculated in C)

年份 Year	随机森林 RF	人工神经网络 ANN	REddyProC 程序包 REddyProC	非线性回归 NLR	交换总量 Annual exchange
2016	-748	-524	-555	-571	-600±100d
2017	56	-132	-317	-152	-136±153c
2018	513	450	598	466	507±66b
2019	1 050	1 087	950	932	1 005±75a
2020	-569	-761	-696	-658	-671±80d
2021	-368	-632	-683	-516	-550±140d

注:同列不同小写字母表示年份间差异极显著($P<0.01$)。

Note: Different lowercase letters in a column indicate significant differences among years at $P<0.01$ levels, respectively.

2.3 CO₂通量多时间尺度影响因子分析

观测期间CO₂通量与环境要素在不同时间尺度的相关关系如表2所示。结果表明,CO₂通量在不同时间尺度的影响要素存在明显差异。在0.5 h尺度上,白天CO₂的吸收速率主要受太阳辐射控制,相关系数为-0.24;夜间主要受温度影响,并且3种测量温度中,CO₂通量对空气温度($R=0.19$)的响应高于对水温($R=0.18$)和底泥温度($R=0.18$)的影响。日尺度分析结果与0.5 h尺度类似,太阳辐射是CO₂通量变化的

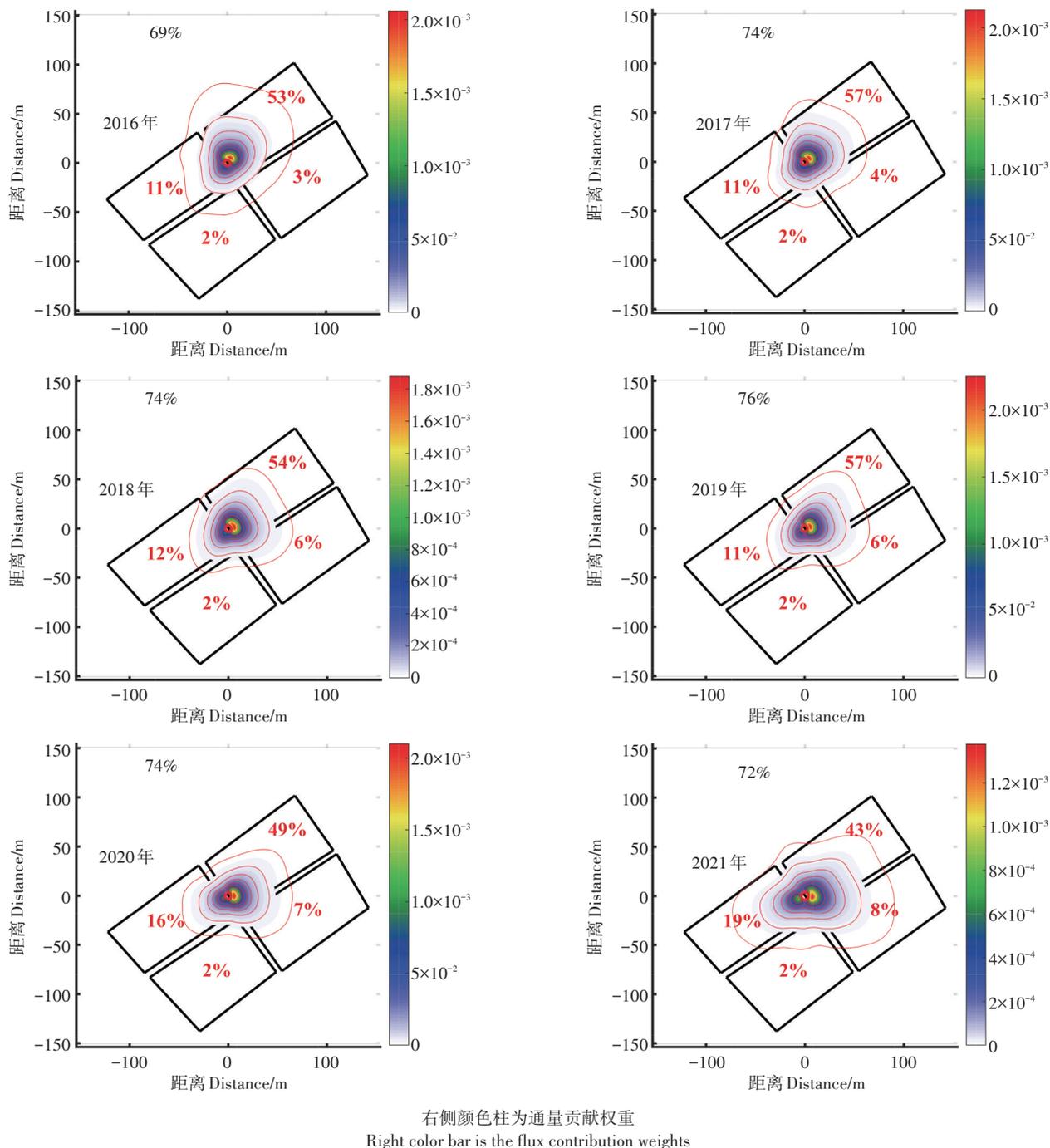


图2 观测期间(2016—2021年)年尺度EC通量气候学源区范围及各目标池塘的贡献率

Figure 2 Annual scale flux footprint for EC system and contribution rate of each target pond during the observation period (2016—2021)

主控因子,两者之间呈现显著的负相关,相关系数为-0.24。风速虽在上述时间尺度均与CO₂通量呈现显著的相关性,但相关系数均较小。月尺度的CO₂通量仅与NDVI呈现显著的负相关($P < 0.05$),相关系数为-0.27。

在上述相关关系分析的基础上,本研究进一步探讨了各时间尺度CO₂通量与主控因子的响应关系(图

5)。0.5 h尺度:白天CO₂通量随着太阳辐射的增强呈线性降低,并从弱源转变为弱汇(图5a);夜晚CO₂排放量随着空气温度的升高呈线性增加(图5b);日尺度CO₂通量随太阳辐射的变化趋势与0.5 h尺度类似,但线性递减速率(0.003)相对较高(图5c)。月尺度上,基于NDVI与CO₂通量的回归方程,利用NDVI变异可以解释68%的月尺度CO₂通量变化(图5d)。

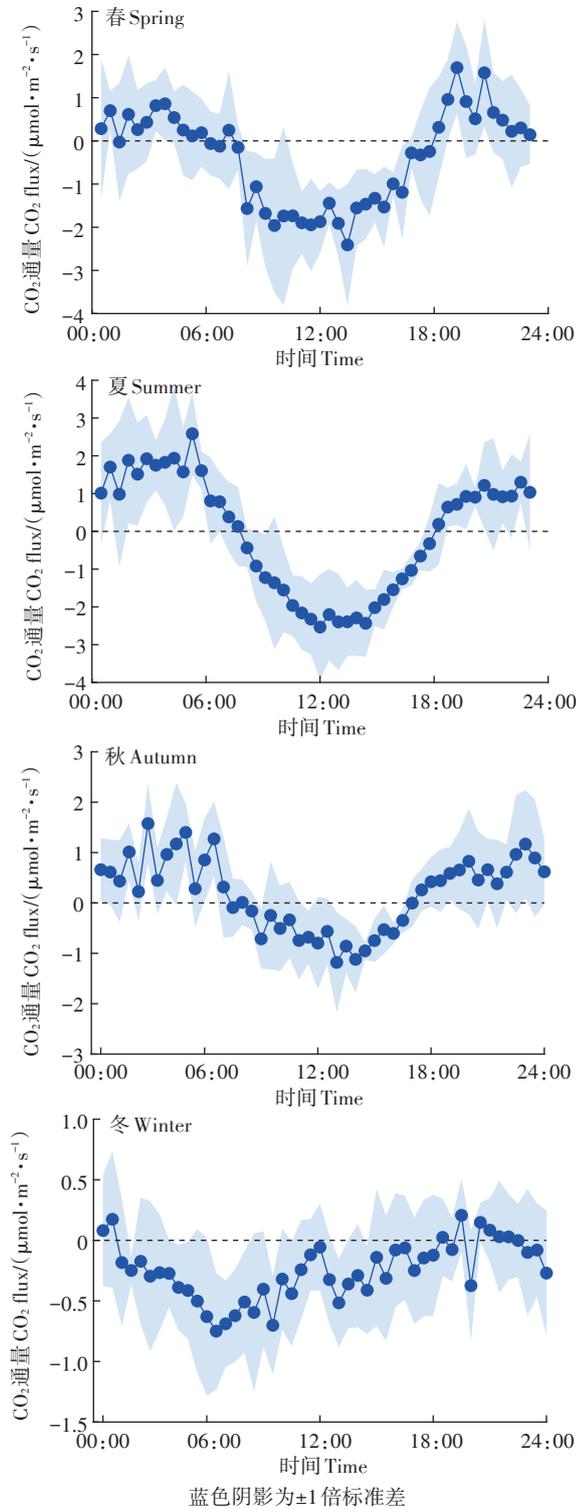
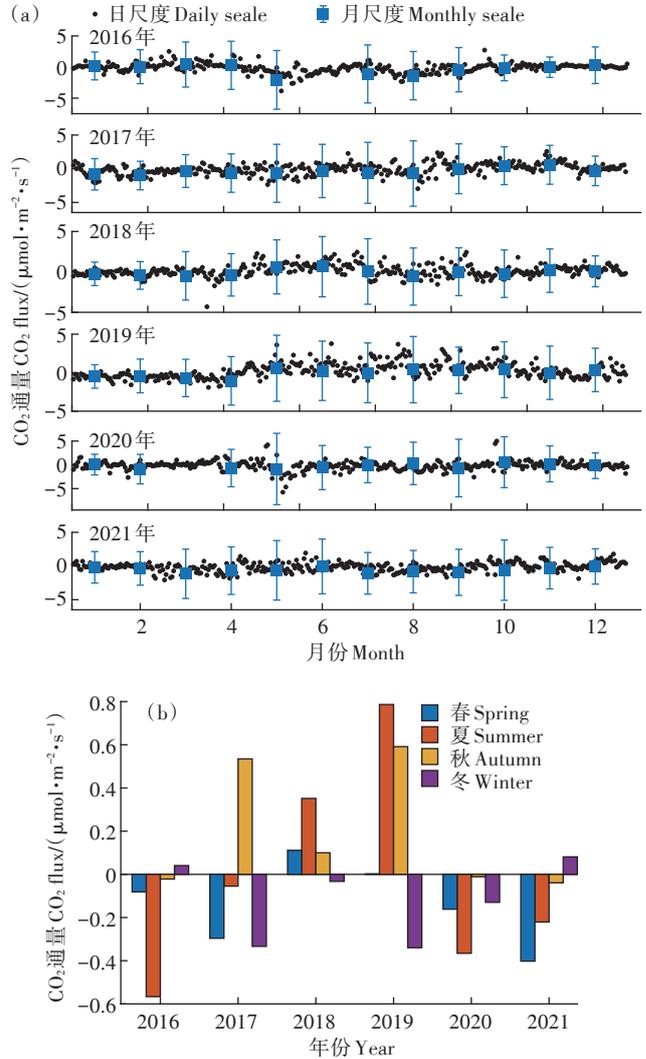


图3 2016—2021年各季节养殖池塘CO₂通量的日变化特征
Figure 3 Diurnal variation characteristics of CO₂ fluxes in aquaculture ponds from 2016 to 2021

养殖池塘不同于自然水体,其CO₂交换量除受环境要素影响外,还受到人为干扰。本研究重点明确饲料投入量在年尺度对CO₂总量的影响。前期研究结



a: 黑色点为插补后的日均值,蓝色方块为月均值; b: 不同颜色的柱子代表基于插补后数据的季节平均值
a: The black dot represents the daily average based on data filled gaps, and the blue square represents the monthly average; b: Bars of different colors represent seasonal average based on data filled gaps

图4 观测期间养殖池塘CO₂通量的季节变化特征
Figure 4 Seasonal variation characteristics of CO₂ fluxes in aquaculture ponds during the observation period

果显示各气象要素年均值在不同年份之间无显著性差异。基于年尺度CO₂交换总量与气候学源区范围内饲料投入量之间的相关分析结果,两者为线性正相关,即CO₂交换总量随饲料投入量的增加呈显著线性上升,相关系数为0.74($P < 0.05$,图6)。此外,本研究采用多元逐步回归方法,进一步明晰各环境要素与饲料投入量对CO₂年总量的协同影响,输入因子包括各时间尺度的主要影响要素,如温度、太阳辐射、NDVI与饲料投入量,其中仅NDVI(I_N)与饲料投入量(F)保留在最终的模型中(年总量=0.26F-355.93I_N-1 940.29),

饲料投入量与建立的回归方程可以解释64%的CO₂年总量的变化。

3 讨论

3.1 养殖池塘CO₂通量多时间尺度变化动态及影响因子

众多证据表明,养殖池塘CO₂交换在人为措施和环境要素的双重作用下,存在明显的时间变异性,包括日变化、季节变化等^[33-41]。本研究基于6 a EC高频连续观测数据进一步佐证并补充了上述研究结论。对于日变化特征:本研究结果与多数研究结果一致^[20,36-37],观测发现养殖池塘CO₂通量具有明显的日变化规律,且存在源汇转换,即白天表现为CO₂吸收汇,主控因子为太阳辐射,夜晚为CO₂排放源,CO₂通量受温度驱动,其中吸收峰值多出现在10:00—14:00;类似现象也出现在闽江口养殖池塘^[33]、瑞典的浅水池塘^[34]以及福建的贝藻类海水养殖池塘^[15]研究中。然而,也有研究观测的结果呈现了与上述CO₂日变化特征相反的现象,如山东省的鱼塘^[2]和虾塘^[20]、闽江口的虾塘^[4]以及九龙江河口的贝藻类养殖池塘^[35],这些研究均观测到白天CO₂较强的排放信号,且不同研究中CO₂通量的日变化幅度存在明显差异。引起上述研究结果差异的原因可能与观测时间段选取、池塘内浮游植物量、养殖类型和密度等要素有关。例如,对于观测时间段选取造成的差异,基于EC观测的贝藻类海水养殖池塘(缢蛏-虾蟹季节轮养)CO₂通量日变化特征,结果发现缢蛏养殖后半阶段具有“白天汇-夜间通量近0”的通量特征,且变化幅度高于养殖前半阶段16倍左右^[15];本研究也有类似的现象,在夏、春季淡水养殖池塘CO₂日变化幅度为冬季的4~5倍。上述分析表明,养殖池塘CO₂通量存在明显的时间变异性,以往基于白天非连续的采样无法准确代表CO₂交换量的真实特征,进而导致碳交换量的估算存在较大误差。

受观测手段的限制,当前对养殖池塘CO₂通量年际变化特征及其影响要素,特别是人为影响要素的研究较为薄弱^[2,6,10,12,40]。本研究发现6 a观测期内养殖池塘CO₂年总量存在显著差异($P<0.05$),从最初的CO₂吸收汇(2016年和2017年)转变为CO₂排放源(2018年和2019年),随后转为CO₂弱吸收汇(2020年和2021年)。基于年尺度CO₂交换量的影响要素分析表明,CO₂通量主要受到饲料投入量和NDVI的共同调控(图6)。然而,目前已有研究中针对上述因素特别是饲料投入量,对CO₂交换的影响机制还存在较大的争论。一方面,部分研究认为养殖池塘内饲料和肥料的投入过量,仅有4%~27%的饲料和肥料被养殖生物所利用^[2],残余饲料、肥料以及养殖动物的粪便会沉积在底泥,其为CO₂的产生提供了充足的有机质,因此可能会进一步促进CO₂产生及排放^[8]。本研究结果支持该观点,养殖池塘CO₂交换量随饲料投入量增加呈线性增加($R^2=0.55, P<0.05$),其中2018年和2019年养殖池塘为CO₂的强排放源,这可能与高饲料投入量有关,其饲料投入总量约为其他年份的1.4~1.6倍。但不同于上述观点,也有部分研究表明饲料投入在增加底泥有机质的同时,也会增加水体富营养化程度,因此可进一步增强浮游植物的光合固碳速率^[21]。例如,基于海水虾塘和海水虾-海参混养塘水-气界面CO₂通量的对比结果发现,有饲料输入的虾塘为CO₂的吸收汇($-5.69 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$),而无饲料输入的混养塘为CO₂的排放源($11.23 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$),产生该现象的原因是虾塘中饲料的投入增加了水体的叶绿素以及总氮、总磷浓度,进而提升了水体中浮游生物的初级生产力,加速了CO₂的光合吸收,因此表现为CO₂汇^[2]。

上述研究结果表明,饲料投入对CO₂通量交换的影响与饲料类型、投入量以及养殖类型等多因素有关。在本研究中,当过量饲料没有被及时摄取,残余的饲料可能更容易被分解成CO₂,其CO₂生成速率会

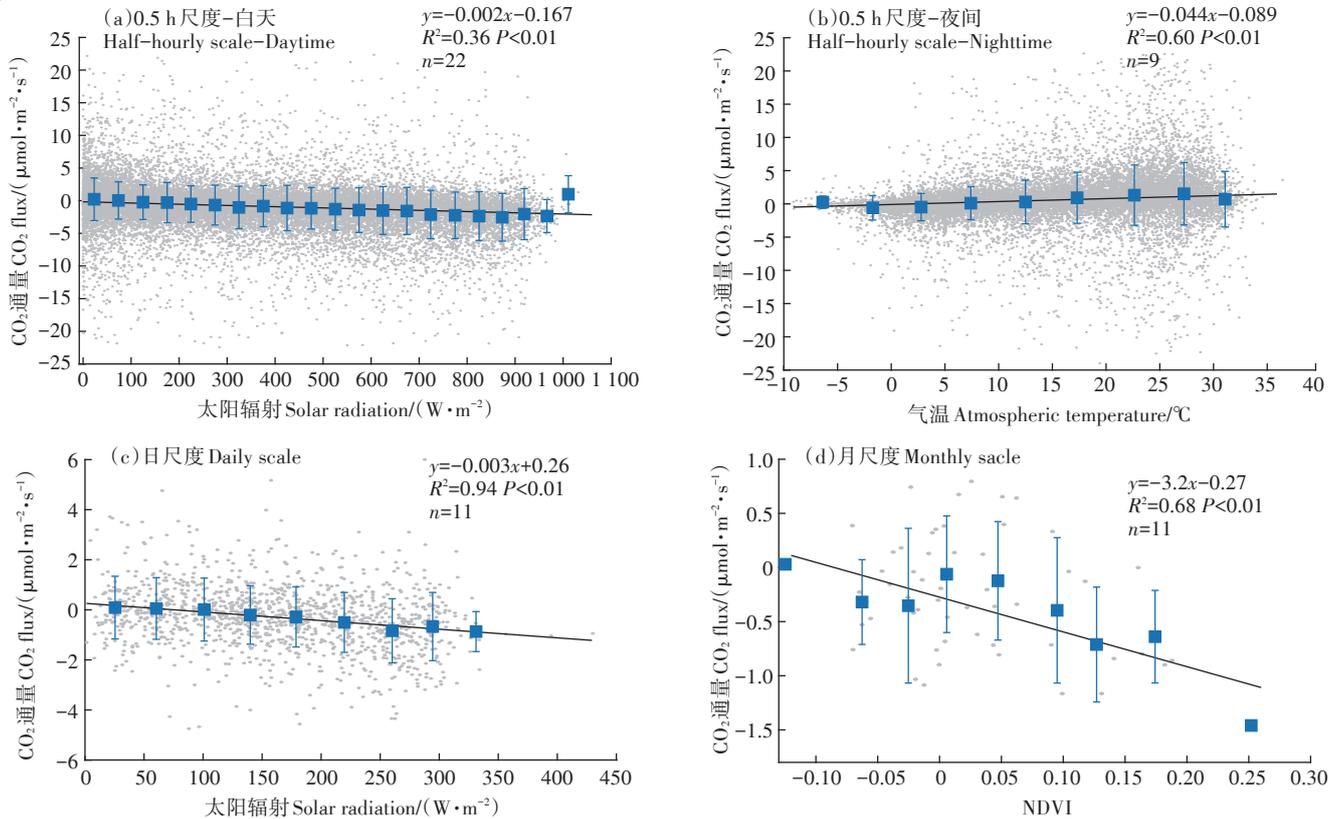
表2 观测期间不同时间尺度CO₂通量与各气象因子的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of CO₂ flux and meteorological factors at different temporal scales during the observation

时间尺度 Time scale	气温 Atmospheric temperature	太阳辐射 Solar radiation	风速 Wind speed	水温 Water temperature	底泥温度 Sediment temperature	降雨量 Precipitation	归一化植被 指数 NDVI
0.5 h尺度 白天	-0.12**	-0.24**	0.05**	-0.10**	-0.09**	—	—
0.5 h尺度 夜间	0.19**	—	-0.09**	0.18**	0.18**	—	—
日尺度	-0.07*	-0.24**	0.08**	-0.03	-0.03	—	—
月尺度	-0.19	-0.21	-0.14	-0.13	-0.12	-0.02	-0.27*
年尺度	0.56	0.40	-0.70	-0.12	-0.15	0.40	0.35

注:* $P<0.05$; ** $P<0.01$ 。

Note:* $P<0.05$; ** $P<0.01$ 。



图中灰色点为0.5 h尺度观测值;蓝色方块代表块平均值,误差线代表±1倍标准差;黑色线为基于块平均结果的拟合线,图中同时展示了拟合方程、决定系数、显著性水平以及样本数。

In the figure, the gray points represent half-hourly observation data; the blue squares represent the block mean value, and the error bars represent ± 1 time standard deviation; the black line is the fitted line based on the block average result, the fitted equation, the coefficient of determination, the significance level, and the number of samples show in the figures.

图5 CO₂通量在不同时间尺度随主控因子变化

Figure 5 Regression analysis of CO₂ flux and the main drives over multiple temporal scales

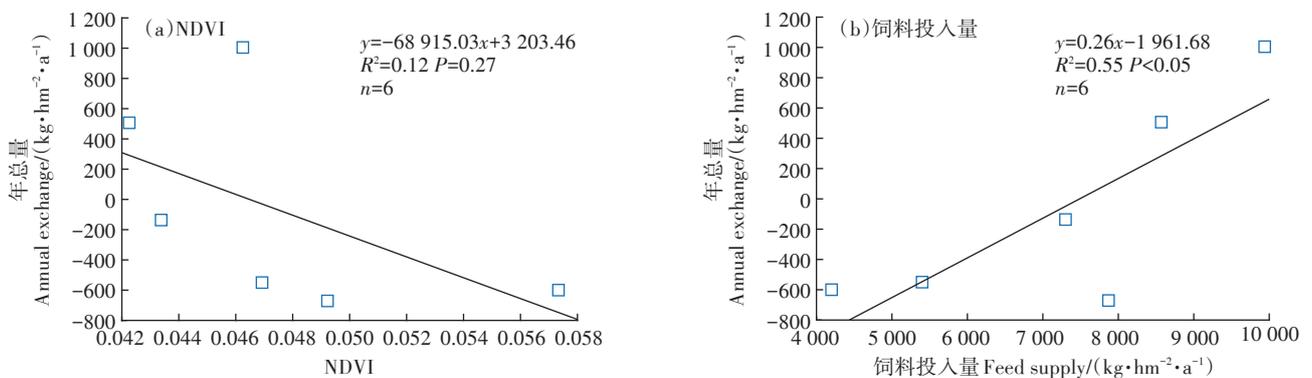


图6 年尺度上CO₂通量随NDVI和饲料投入量的变化

Figure 6 The changes in CO₂ flux with NDVI and feed supply on annual scale

高于由于水体富营养化引起的光合CO₂吸收速率,因此养殖池塘为CO₂的排放源;反之光合固碳占主导时养殖池塘则表现为CO₂的汇。此外,本研究2018年和2019年养殖水体中饲养的河蚌以浮游植物为食,可减轻水体富营养化程度,从而降低水体浮游植物对

CO₂的光合吸收速率。综上,为构建环境友好型养殖模型,未来养殖研究应着重于进一步提升饲料利用效率,在增加水产养殖效益的基础上,降低残余饲料氮沉积对水体环境的负荷,以此实现水产养殖业的可持续发展。

3.2 亚热带养殖池塘CO₂通量的交换水平

表3展示了本研究与其他水体类型如湖泊、水库以及其他地区养殖池塘CO₂年交换量的对比结果。本研究6 a观测期内养殖池塘CO₂年总量存在显著性差异,受饲料投入量及养殖品种的影响,各年份CO₂通量(以C计)呈“汇-源-汇”的交错分布特征,整体变化范围为-671~1 005 kg·hm⁻²·a⁻¹,多年均值为(-74±688)kg·hm⁻²·a⁻¹,呈现为弱碳汇。相比于其他地区研究结果,从表3可知,多数自然水体如湖泊、水库等常表现为CO₂排放源,而本研究养殖池塘在高饲料输入条件下的CO₂年排放量位于其中上范围内;对于不同区域的养殖系统,与自然水体相比,养殖池塘特有的人工管理措施和养殖模式,使CO₂通量的源汇特征及交换水平存在较大的不确定性。

观测时间、水质环境以及养殖品种差异等可能是造成不同研究区域养殖池塘碳交换量差异的主要原因。首先对于观测时间,以往多数研究采用白天CO₂通量观测结果代表日均值计算年总量。基于本研究观测结果,若仅采用白天观测值计算年总量,不仅会改变源汇特征,同时其量值估算误差不确定性可达591%,该结果说明完整的CO₂通量时间动态信息是未来碳交换量准确估算的前提。其次,水质要素如pH、盐度、叶绿素含量等可通过影响CO₂的产生和消耗速率进而改变碳交换,例如基于九龙江河口和闽江河口养虾塘CO₂通量的对比结果,其中闽江河口养殖池塘CO₂通量整体高于九龙江河口,这种差异主要是由于水体中的叶绿素含量差异导致的^[4]。最后,由于不同养殖品种的新陈代谢以及人工管理方式存在差

异,水-气界面的碳交换也会受到一定程度的影响,例如本研究在改变养殖模式后,CO₂的源汇特征也随之发生变化,养殖池塘由CO₂的汇[虾-鱼混养塘,(-600±100)kg·hm⁻²·a⁻¹(以C计)]转变为CO₂的源[鱼-河蚌混养塘,(507±66)kg·hm⁻²·a⁻¹(以C计)],其主要受虾类养殖种植黑麦草和稗子等植物的影响;其他研究地区也有类似的现象,通过对比虾-蟹混养塘和虾-蟹-竹蛭混养塘水-气界面CO₂通量,结果发现加入竹蛭之后养殖池塘由CO₂的汇[虾-蟹混养塘,-113 g·m⁻²(以CO₂计)]转变为CO₂的源[虾-蟹-竹蛭混养塘,154 g·m⁻²(以CO₂计)],这主要是由于竹蛭对浮游植物的滤食作用降低了光合固碳速率,同时竹蛭的呼吸也会增加水体中的CO₂浓度。综上,为准确评估区域以及国家尺度养殖水体的碳收支,在未来还需在更多地区的不同类型养殖水体开展高频连续碳通量观测,以提供坚实的数据支撑。

4 结论

(1)养殖池塘CO₂通量存在日变化、季节变化和年变化特征。日变化:白天表现为CO₂吸收汇,夜晚为CO₂排放源;季节变化:CO₂的排放或吸收峰值均出现在夏季,冬季CO₂通量交换均较弱;年变化:6 a观测期内各年份CO₂通量(以C计)呈“汇-源-汇”的交错分布特征,年总排放量整体变化范围为-671~1 005 kg·hm⁻²·a⁻¹,整体而言,多年均值为(-74±688)kg·hm⁻²·a⁻¹,养殖池塘呈现为弱碳汇。

(2)淡水养殖池塘CO₂通量的环境主要影响因子随时间尺度而发生改变:0.5 h尺度上,白天CO₂通量

表3 不同水体CO₂年总通量对比分析

Table 3 Comparative analysis of the annual total CO₂ flux of different aquatic ecosystems

水体类型 System	养殖类型 Type	观测时间 Period	观测方法 Method	年总量 Annual exchange/(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹ ,以C计)	参考文献 Reference
淡水养殖池塘	混养塘	2016—2021	EC法	-74±688(-671~1 005)	本研究
	鱼塘	2014-01—2014-11	传输系数法	28	[41]
	虾塘	2013-06—2014-04	静态箱法	-868	[39]
	蟹塘	2013—2014	静态箱法	35~543	[12]
海水养殖池塘	藻类-贝类养殖池塘	2020-01—2020-12	EC法	-2 263	[6]
	虾塘	2014-03—2015-03	静态箱法	-57	[2]
	海参-虾塘	2014-03—2015-03	静态箱法	112	[2]
	虾塘	2017-06—2018-05	静态箱法	-212	[40]
水库	—	2003-09—2006-08	传输系数法	1 025	[42]
	—	2010-01—2010-12	静态箱法	5 729	[43]
湖泊	—	2003-04—2004-03	静态箱法	325	[21]
	—	2012-07—2013-12	传输系数法	840	[44]

受太阳辐射控制,两者呈现显著的负相关,夜间CO₂排放量随温度升高呈线性增加($R=0.78, P<0.05$);月尺度上:归一化植被指数是CO₂交换量的主控因子,且两者之间呈显著负相关;年尺度上,饲料投入量和归一化植被指数共同调控CO₂年交换量,二者建立的回归方程可以解释64%的CO₂年总量变化。

参考文献:

- [1] FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2020[M]. Rome: FAO, 2020.
- [2] CHEN Y, DONG S, WANG F, et al. Carbon dioxide and methane fluxes from feeding and no-feeding mariculture ponds[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 212:489–497.
- [3] LIN G, LIN X. Bait input altered microbial community structure and increased greenhouse gases production in coastal wetland sediment[J]. *Water Research*, 2022, 218:118520.
- [4] YANG P, ZHANG Y, LAI D Y F, et al. Fluxes of carbon dioxide and methane across the water-atmosphere interface of aquaculture shrimp ponds in two subtropical estuaries: the effect of temperature, substrate, salinity and nitrate[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 635:1025–1035.
- [5] ZHAO J, ZHANG M, XIAO W, et al. Large methane emission from freshwater aquaculture ponds revealed by long-term eddy covariance observation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 308:108600.
- [6] ZHANG Y, QIN Z, LI T, et al. Carbon dioxide uptake overrides methane emission at the air-water interface of algae-shellfish mariculture ponds: evidence from eddy covariance observations[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 815:152867.
- [7] ZHAO J, ZHANG M, XIAO W, et al. An evaluation of the flux-gradient and the eddy covariance method to measure CH₄, CO₂, and H₂O fluxes from small ponds[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 275:255–264.
- [8] YANG P, LAI D Y F, YANG H, et al. Carbon dioxide dynamics from sediment, sediment-water interface and overlying water in the aquaculture shrimp ponds in subtropical estuaries, southeast China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 236:224–235.
- [9] RUDBERG D, DUC N T, SCHENK J, et al. Diel variability of CO₂ emissions from northern lakes[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, 126(10):e2021JG006246.
- [10] KOSTEN S, ALMEIDA R M, BARBOSA I, et al. Better assessments of greenhouse gas emissions from global fish ponds needed to adequately evaluate aquaculture footprint[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 748:141247.
- [11] ZHU L, CHE X, LIU H, et al. Greenhouse gas emissions and comprehensive greenhouse effect potential of *Megalobrama amblycephala* culture pond ecosystems in a 3-month growing season[J]. *Aquaculture International*, 2016, 24(4):893–902.
- [12] YUAN J, XIANG J, LIU D, et al. Rapid growth in greenhouse gas emissions from the adoption of industrial-scale aquaculture[J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9(4):318–322.
- [13] BALDOCCHI D, FALGE E, GU L, et al. FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82(11):2415–2434.
- [14] BALDOCCHI D. Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere: the state and future of the eddy covariance method[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(12):3600–3609.
- [15] ZHANG Y, GUO X, ZHU X. Strong diurnal variability of carbon dioxide flux over algae-shellfish aquaculture ponds revealed by eddy covariance measurements[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 348:108426.
- [16] MALYAN S K, SINGH O, KUMAR A, et al. Greenhouse gases trade-off from ponds: an overview of emission process and their driving factors[J]. *Water*, 2022, 14(6):970.
- [17] YANG P, LAI D Y F, HUANG J F, et al. Effect of drainage on CO₂, CH₄, and N₂O fluxes from aquaculture ponds during winter in a subtropical estuary of China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, 65:72–82.
- [18] YANG P, TANG K W, YANG H, et al. Contrasting effects of aeration on methane(CH₄) and nitrous oxide(N₂O) emissions from subtropical aquaculture ponds and implications for global warming mitigation[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 617:128876.
- [19] BURFORD M A, COSTANZO S D, DENNISON W C, et al. A synthesis of dominant ecological processes in intensive shrimp ponds and adjacent coastal environments in NE Australia[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, 46(11):1456–1469.
- [20] CHEN Y, DONG S, WANG Z, et al. Variations in CO₂ fluxes from grass carp *Ctenopharyngodon idella* aquaculture polyculture ponds[J]. *Aquaculture Environment Interactions*, 2015, 8:31–40.
- [21] XING Y, XIE P, YANG H, et al. Methane and carbon dioxide fluxes from a shallow hypereutrophic subtropical lake in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(30):5532–5540.
- [22] 中国渔业年鉴编辑委员会. 中国渔业统计年鉴2021[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021. China Fisheries Yearbook Editorial Committee. China fisheries statistics yearbook in 2021[M] Beijing: China Agricultural Press, 2021.
- [23] 朱林, 车轩, 刘晔, 等. 团头鲂池塘养殖生态系统晒塘阶段温室气体排放通量分析[J]. 农业工程学报, 2016 32(3):210–215. ZHU L, CHE X, LIU H, et al. Greenhouse gas emissions of *Megalobrama amblycephala* culture pond ecosystems during sun drying of pond[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(3):210–215.
- [24] LIU S, HU Z, WU S, et al. Methane and nitrous oxide emissions reduced following conversion of rice paddies to inland crab-fish aquaculture in southeast China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(2):633–642.
- [25] MA Y, SUN L, LIU C, et al. A comparison of methane and nitrous oxide emissions from inland mixed-fish and crab aquaculture ponds[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 637:517–523.
- [26] LEE X H, MASSMAN M, LAW B. Handbook of micrometeorology: a guide for surface flux measurement and analysis[M]. Vol.29. Springer

- Science & Business Media, 2004.
- [27] 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.
- [28] MCDERMITT D, BURBA G, XU L, et al. A new low-power, open-path instrument for measuring methane flux by eddy covariance[J]. *Applied Physics B*, 2011, 102:391-405.
- [29] 朱治林, 孙晓敏, 温学发, 等. 中国通量网(ChinaFLUX)夜间CO₂涡度相关通量数据处理方法研究[J]. 中国科学: D辑, 2006, 36(A01):34-44. ZHU Z L, SUN X M, WEN X F, et al. A study on the processing method of nighttime CO₂ eddy covariance flux data from ChinaFLUX[J]. *Science in China: Ser. D*, 2006, 36(A01):34-44.
- [30] WUTZLER T, LUCAS-MOFFAT A, MIGLIAVACCA M, et al. Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc[J]. *Biogeosciences*, 2018, 15(16):5015-5030.
- [31] 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 J L, ZHANG M, PU Y N, 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.
- [32] KIJUN N, CALANCA P, ROTACH M W, et al. A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP)[J]. *Geoscientific Model Development*, 2015, 8(11):3695-3713.
- [33] 杨平, 仝川, 何清华, 等. 闽江口养殖塘水-大气界面温室气体通量日进程特征[J]. 环境科学, 2012, 33(12):4194-4204. YANG P, TONG C, HE Q H, et al. Diurnal variations of greenhouse gas fluxes at the water-air interface of aquaculture ponds in the min river estuary [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(12):4194-4204.
- [34] NATCHIMUTHU S, PANNEER S B, BASTVIKEN D. Influence of weather variables on methane and carbon dioxide flux from a shallow pond[J]. *Biogeochemistry*, 2014, 119(1/2/3):403-413.
- [35] YE W, SUN H, LI Y, et al. Greenhouse gas emissions from fed mollusk mariculture: a case study of a *Sinonovacula constricta* farming system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 336:108029.
- [36] XIONG Y, WANG F, GUO X, et al. Carbon dioxide and methane fluxes across the sediment-water interface in different grass carp *Ctenopharyngodon idella* polyculture models[J]. *Aquaculture Environment Interactions*, 2017, 9:45-56.
- [37] 张东旭, 田相利, 董双林, 等. 不同许氏平鲉与栉孔扇贝养殖系统水-气界面CO₂通量及其主要影响因子[J]. 应用生态学报, 2019, 30(7):2447-2456. ZHANG D X, TIAN X L, DONG S L, et al. Carbon dioxide fluxes at the water-air interface and the main influencing factors from different aquaculture systems of *Sebastes schlegelii* and *Chlamys farreri*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(7):2447-2456.
- [38] ZHANG D, TIAN X, DONG S, et al. Carbon dioxide fluxes from two typical mariculture polyculture systems in coastal China[J]. *Aquaculture*, 2020, 521:735041.
- [39] 宋红丽, 刘兴土, 文波龙. 黄河三角洲养殖塘水-气界面CO₂、CH₄和N₂O通量特征[J]. 生态环境学报, 2017, 26(9):1554-1561. SONG H L, LIU X T, WEN B L. Greenhouse gases fluxes at water-air interface of aquaculture ponds in the Yellow River Estuary[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(9):1554-1561.
- [40] TONG C, BASTVIKEN D, TANG K W, et al. Annual CO₂ and CH₄ fluxes in coastal earthen ponds with *Litopenaeus vannamei* in southeastern China[J]. *Aquaculture*, 2021, 545:737229.
- [41] 兰晶. 养殖水体温室气体的溶存与排放及其影响因素研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2015. LAN J. Greenhouse gases concentration, emission and influence factors in farming waters[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.
- [42] DIEM T, KOCH S, SCHWARZENBACH S, et al. Greenhouse gas emissions (CO₂, CH₄ and N₂O) from perialpine and alpine hydropower reservoirs[J]. *Biogeosciences Discussions*, 2008, 5(5):3699-3736.
- [43] ZHAO Y, WU B F, ZENG Y. Spatial and temporal patterns of greenhouse gas emissions from Three Gorges Reservoir of China[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(2):1219-1230.
- [44] 肖启涛. 太湖水-气界面温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)通量研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2014. XIAO Q T. Study on greenhouse gases (CO₂, CH₄, and N₂O) fluxes of water-air interface in Lake Taihu [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2014.

(责任编辑:李丹)