

平水年鄱阳湖洲滩湿地 CO₂ 通量的昼夜差异及主控因素*

李琦^{1,2,3}, 陶亮亮¹, 王容^{2,3}, 吴心渠^{2,3}, 戚君燕^{2,4}, 刘元波^{2,3*}

(1: 南京信息工程大学地理科学学院, 南京 210044)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 211135)

(3: 中国科学院大学, 北京 100049)

(4: 河海大学水文水资源学院, 南京 210098)

摘要: 湿地是陆地生态系统的重要碳库之一。它既可以是碳源, 也可以是碳汇, 具有复杂的碳循环过程。然而湿地 CO₂ 通量的昼夜变化规律尚不明晰, 这为准确评估湿地固碳能力带来了不确定性。本研究在季节性淹没的鄱阳湖进行研究, 基于 2021 年(平水年) 涡度相关系统观测数据, 分析鄱阳湖洲滩湿地 CO₂ 通量的昼夜差异, 并使用偏相关分析与多元回归分析方法, 分析昼间与夜间 CO₂ 通量的主控因素。研究表明: (1) 日尺度上, 裸露期(1-4 月和 11-12 月) 的 CO₂ 通量表现为昼间为碳汇、夜间为碳源, 呈现典型的“U”型变化特征。相比之下, 淹没期(5-10 月) 的 CO₂ 通量基本稳定在接近“0”的范围内波动, 然而在淹没后期(9-10 月), CO₂ 通量在昼夜交替阶段的波动幅度显著增加。(2) 月尺度上, 昼夜间 CO₂ 通量在裸露期差异显著, 而在淹没期差异减小, 这种动态变化与湿地碳源-碳汇功能的转换密切相关。(3) 在年内尺度上, 洲滩湿地 CO₂ 通量呈现显著的昼夜差异性, 年均夜间通量较昼间高 25.50%, 且裸露期昼夜差异最为显著, 平均通量差值达 10.22 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹。(4) 不同时期 CO₂ 通量昼夜差异的主控因素存在明显差异。在裸露期, 昼间 CO₂ 通量变化主要受入射短波辐射和土壤含水量控制, 而夜间主控因素为土壤温度; 在淹没期, 昼间通量主要受降水和土壤含水量影响, 而夜间则由土壤含水量、湖泊水位和土壤温度共同调控。(5) 不同时期导致昼夜差异的根本原因有所不同, 在裸露期昼夜 CO₂ 通量的差异的根本原因是生物的光合作用与呼吸作用的昼夜差异性, 其中昼间以光合作用为主导, 表现为 CO₂ 的汇, 夜间以呼吸作用为主导, 表现为 CO₂ 的源。在淹没期, 水体的覆盖抑制了植物与微生物的活动, CO₂ 通量的昼夜差异趋于平缓。本研究揭示了洲滩湿地 CO₂ 通量的昼夜变化机制与主控因素, 为湿地碳水资源管理和生态保护提供了重要的科学依据。

关键词: 鄱阳湖; 湿地; CO₂ 通量; 昼夜差异; 主控因素

Diurnal variation and drivers of CO₂ fluxes in the Lake Poyang floodplain wetland during a normal flow year

Li Qi^{1,2,3}, Tao Liangliang¹, Wang Rong^{2,3}, Wu Xinqu^{2,3}, Qi Junyan^{2,4} & Liu Yuanbo^{2,3**}

(1 School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, P. R. china)

(2 Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 211135, P. R. china)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 211135, P. R. china)

(4 College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, P. R. china)

Abstract: Wetlands are critical carbon reservoirs in terrestrial ecosystems, yet the diurnal variation of CO₂ fluxes—key to quantifying their net carbon sequestration potential—remains inadequately characterized. This study employed eddy covariance

* 2025-01-06 收稿; 2025-08-27 收修改稿。

江西省水利厅重点项目基金(202325ZDKT15)和国家自然科学基金项目(42230112, 51879255)联合资助。

**通信作者; E-mail: ybliu@niglas.ac.cn

measurements with partial correlation and multiple regression analyses to investigate the temporal dynamics and controlling factors of CO₂ fluxes in Lake Poyang floodplain wetland during a normal flow year (2021), examining both exposed (January-April and November-December) and inundation (May-October) periods. Results revealed that during exposed periods, CO₂ flux exhibited a characteristic "U"-shaped diurnal pattern, functioning as a carbon sink during daylight hours and a carbon source at night, with an average diurnal difference of 10.22 μmol CO₂·m⁻²·s⁻¹. In contrast, inundation periods showed negligible fluxes except during late inundation (September-October) when notable day-night fluctuations emerged. Annually, nighttime flux exceeded daytime flux by 25.50%. Controlling factors varied seasonally: during exposed periods, daytime flux was primarily regulated by incident shortwave radiation and soil moisture, while nighttime flux was dominated by soil temperature; during inundation, daytime flux responded mainly to precipitation and soil moisture, while nighttime flux was jointly influenced by soil moisture, lake water level, and soil temperature. These diurnal differences were driven by biological processes (photosynthesis/respiration) during exposed periods, while water coverage suppressed these activities during inundation. These findings elucidate the diurnal mechanisms governing wetland CO₂ flux, providing valuable scientific basis for integrated carbon-water resource management and wetland ecological protection.

Keywords: Lake Poyang; floodplain wetland; CO₂ flux; Diurnal Variability; Primary Controlling Factors

湿地是陆地系统与水体系统相互作用而成的自然综合体，位于大气、陆地、水体系统的界面^[1]，不但具有抵御洪水、调节径流、改善气候等作用^[2]，还具有重要的固碳功能^[3]。全球湿地仅占陆地面积的 5-8%^[4]，但其碳总量占陆地生态系统碳总量的 12-24%^[5]，与森林、草地等生态系统相比，具有较高的固碳潜能^[6, 错误:未找到引用源。]，成为缓解全球气候变化的长期解决方案之一^[8]。

湿地是重要的碳汇，但也会转变为碳源^[9,10,11]，而碳源碳汇的转换则受到水文条件、温度、植被等因素的综合影响。例如，地下水位的下降会促使湿地从碳汇转变为碳源。在美国北卡罗莱纳州沿海淡水森林湿地发现地下水位的下降增加了 CO₂ 通量^[12]；在波兰东北部沼泽湿地的研究发现，地下水位的下降导致湿地从大气碳的汇变为源^[13]，而地下水位升高至接近地表则使地表重新湿润，可以有效地减少温室气体排放^[14, 15, 16]。最近研究发现，水位深度对湿地 CO₂ 通量也存在着较大的影响，导致湿地的碳源汇表现不同，且不同植物（如芦苇和柽柳）的 CO₂ 通量响应也不同^[17]。在季节性淹没湿地中发现，GPP（总初级生产力）和 ER（生态系统呼吸）随着水位的升高而下降，但是两者降幅不同，导致湿地变为碳源^[18]。除了受水位的影响，湿地碳源碳汇及其转换过程还受到温度等因素的作用。在美国威斯康星州的沼泽湿地中，利用地下水位变化与河流排放流量具有显著的相关性，研究了地下水位与温度对碳通量的影响，发现在月尺度上，气温与 ER、GPP、NEP（净生态系统生产力）具有正相关关系，虽然地下水位波动对 ER 有一定抑制作用，但对 GPP、NEP 的解释力有限，因此认为温度是影响湿地碳交换的主导因子^[19]。温度可改变各季节的特定生态过程，从而影响碳循环。一个季节的变暖会间接影响随后季节的生态过程，称为“遗留效应”^[20]。在北半球（>25°N），春季温度升高会导致碳吸收增加，夏季温度升高会导致碳吸收减少^[21]。气温升高可能会使得人工湿地与泥炭地转变为碳源，而降水变化可能导致光合作用超过呼吸作用，从而维持湿地的碳汇功能^[22]，降水能促进呼吸作用与光合作用，但呼吸作用的增长幅度与光合作用的增长幅度相比有所不同。在墨西哥的西北部热带干旱森林的季节性的研究中发现降水可以显著增强光合作用，使其超过呼吸作用。另外，不同湿地类型的碳循环过程各具特性，碳汇大小也有所不同^[24]。有学者对中国湿地的碳收支进行了研究，发现滨海湿地、湖泊湿地、河流湿地、沼泽湿地的 GPP 分别为 13.44±0.36 Mg C ha⁻¹/a、11.44±0.36 Mg C ha⁻¹ /a、9.81±0.65 Mg C ha⁻¹/a，ER 分别为 9.37±0.28 Mg C ha⁻¹ /a、8.94±0.27 Mg C ha⁻¹/a、7.15±0.66 Mg C ha⁻¹ /a、5.43±0.19 Mg C ha⁻¹ /a，与滨海湿地、沼泽湿地、河流湿地相比，湖泊湿地碳排放量少，而吸收量高，具有较高的固碳潜能^[25]。目前通常使用 CO₂ 分压（pCO₂）来估算湖泊的 CO₂ 通量，主要依靠昼间测量的结果^[27]。然而，关于夜间湖泊 CO₂ 通量的变化过程、变化强度、主控因素及驱动机制等，缺乏相关的报道和认知^[26]，这成为全面准确评估湿地固碳潜力的主要不确定性来源之一。而关于碳源碳汇的主控因素及转换机制的不完整认识，则成为当前湿地碳通量调控及生态管理的薄弱环节，特别需要加强湿地 CO₂ 通量昼夜变化的过程监测及相关驱动机制的研

究^[28, 29]。

针对这一现状，本文开展了鄱阳湖洲滩湿地 CO₂ 通量的昼夜变化规律研究。鄱阳湖是长江中游的两大通江湖泊之一，具有吞吐性和过水性，湖泊水位具有季节性的变化特征，表现为丰水期水位上升，枯水期水位回落的特征，水文节律突出，直接影响着湖泊洲滩湿地的变化。通过剖析鄱阳湖洲滩湿地 CO₂ 通量的昼夜变化过程及主要影响因素，可为鄱阳湖碳水资源的科学调控和生态环境保护等提供坚实的科学基础，为利用湖泊调控等手段助力实现我国“双碳”目标等提供可靠依据。

1 研究材料与方法

1.1 研究区概况

鄱阳湖地处亚热带季风气候区，年降水量丰富，但也经常出现旱涝交替现象^[30]。鄱阳湖是中国最大的淡水湖，季节性水文波动显著，年内水位变幅大(图 1)，多年平均的水位变幅达 9m^[31]。大幅度的周期性水位变化，引起湖区洲滩湿地的周期性淹没，直接影响到湿地植被、栖息生物以及生态系统功能。这种气候水文特征塑造了鄱阳湖湿地的独特性，为开展湿地结构和功能研究提供了宝贵的天然实验场所。

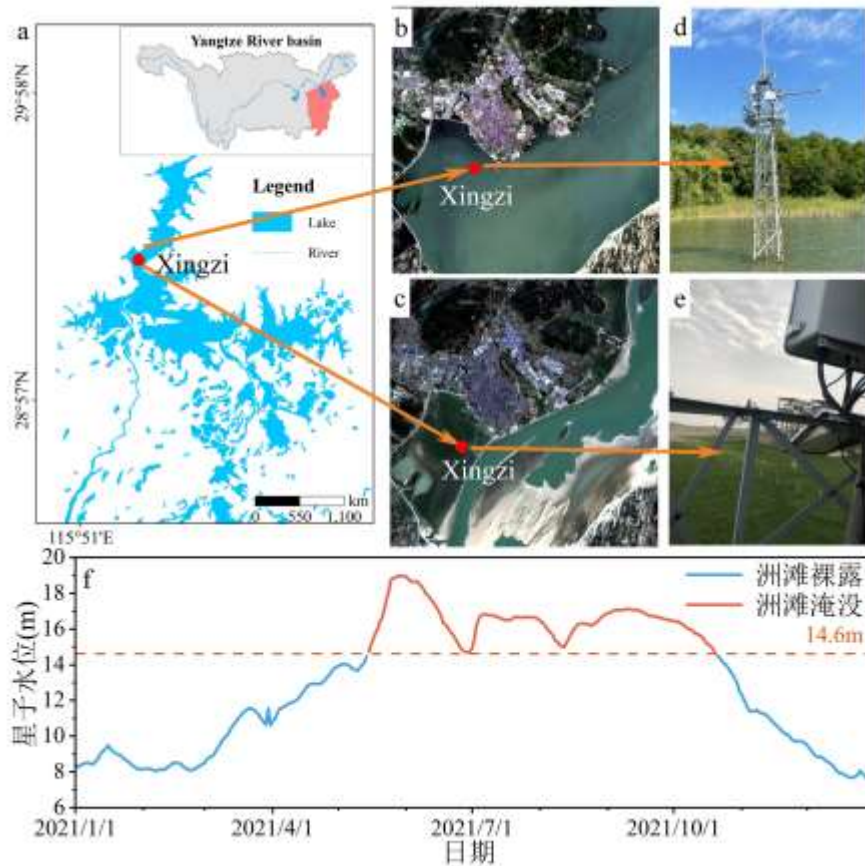


图1 鄱阳湖洲滩湿地的位置概况 (a)，淹没期 (b) 和裸露期 (c) 的遥感影像，2021年9月23日 (d) 和2021年12月15日 (e) 的实地照片，以及2021年星子水位站的水位变化曲线 (f)。

Fig. 1. Overview of the Lake Poyang floodplain wetland (a), remote sensing images during the inundation period (b) and exposed period (c), field photos taken on September 23, 2021 (d), and December 15, 2021 (e), as well as the water level fluctuation curve from the Xingzi Station in 2021 (f).

1.2 观测仪器

本研究使用的观测数据，来自位于江西省庐山市星子镇的一套涡度相关（Eddy Covariance, EC）系统。星子水文站属于国家级水文站，该站观测的水位常用于表示鄱阳湖的水位^[32]，其下垫面呈现周期性的出露-淹没特征，春夏季水位升高时，洲滩逐渐被淹没，表现为碳源状态；秋冬季水位下降，洲滩逐渐出露，秋季温度适宜有利于植被快速生长，表现为碳汇状态。在星子水文站附近塔基为 14.6m 的 10m 高的铁塔上（29°27'N, 116°03'E），安装了开路式涡度相关系统，此系统由 CO₂/H₂O 红外气体分析仪（EC150, Campbell Scientific Inc.）、三维超声风速仪（CSAT3）组成，使用 CR3000 数据采集器（Campbell Scientific, Inc.）记录。使用四分量净辐射传感器（CNR4, Kipp&Zonen B.V., Delft, The Netherlands）测量向上、向下的短波和长波辐射以及净辐射。使用温湿传感器（HMP155A, Vaisala, Helsinki, Finland）测量气温、相对湿度和降水。土壤温度使用土壤平均温度传感器（TCAV）进行测量，使用时域反射土壤含水量传感器（CS616）测量土壤含水量，本研究使用的是地下 10cm 处的土壤含水量。

自 2015 年起至今，开展了鄱阳湖洲滩湿地 CO₂ 通量监测。EC 系统的基本采样频率为 10Hz，并生成每 30min 平均数据。

1.3 数据处理方法

根据多年的鄱阳湖水位观测数据，选择 2021 年为平水年，近似代表鄱阳湖的多年平均情况。数据处理过程包括数据初处理、不同时间尺度上的数理统计分析，以及影响 CO₂ 通量的主控因素分析。

1.3.1 数据初处理 经过二次坐标旋转、除趋势校正、WPL 校正、超虚温校正、统计检验、统计检验、频谱损失校正等技术处理，由 10Hz 原始数据获得经过质量控制的 30min 平均数据。根据 Falge^[33] 等的研究，一般剔除 CO₂ 数据的原则是剔除大于 3 倍标准差的异常数据。考虑到观测数据缺失因素，本研究采用 4 倍标准差来剔除 CO₂ 数据。由于夜间大气边界层稳定，湍流较弱^[34]，涡动相关系统会低估 CO₂ 通量，因此需要剔除摩擦风速（ u^* ）小于一定阈值的夜间数据^[35]。本文使用 Papale^[36] 等人提出的方法，计算得出 2021 年夜间最小摩擦风速为 $u^* \leq 0.2 \text{ ms}^{-1}$ 。对于缺失数据，使用查找表法（LUT）和平均日变化曲线法（MDC）进行插补。LUT 即基于相似的气象条件，来寻找缺失值的代替值。MDC 则适用于气象数据完全缺失的情况，并且使用一天中同一时间的历史平均值进行插补。当缺少 CO₂ 通量数据时，依据辐射、气温和水汽压差等气象数据与通量的关系，建立查找表。当仅有辐射数据而缺少气温和水汽压差数据时，使用 LUT，并根据移动窗口为 7 天的辐射数据来获得相似气象条件下的数值。当辐射数据也缺失时，使用 MDC 进行插补。对于 u^* 过滤与数据插补，本研究使用了马普生物地球化学研究所提供的在线插补工具（<https://bgc.iwww.mpg.de/5622399/REddyProc>）。

1.3.2 数理统计分析 首先，运用常规的多元数据统计方法，基于 30min 数据可以获得 CO₂ 通量和各个环境变量的每日均值、标准差、最大值和最小值等统计量。其次，以每月为一个窗口，可以获得各个月份在 0 时~24 时的日内变化情况。进一步根据昼夜划分，可以获得昼间和夜间各变量的逐日和逐月的统计值，进而获得不同时期乃至全年的统计值。

考虑到鄱阳湖的涨水与退水过程会导致研究区的洲滩湿地出露或被淹，从而引起下垫面状态变化，进而影响局地环境条件及 CO₂ 的吸收或释过程，本文进一步依据 2021 年鄱阳湖实测水位数据，结合通量观测塔基高程（14.60 m）以及 CO₂ 通量变化特征，将全年划分为两个时期：裸露期（1 月 1 日-5 月 14 日、10 月 21 日-12 月 31 日）与淹没期（5 月 15 日-10 月 20 日），对两个不同时期分别进行统计分析。

1.3.3 主控因素分析 采用偏相关和逐步回归分析方法来分析主控因素。偏相关分析用于研究多个变量之间的关联性，旨在剔除其他变量对目标变量的影响，揭示两个变量之间的直接关系^[37]。在 CO₂ 通量研究中，偏相关分析有助于评估 CO₂ 通量与单个环境变量（如温度、辐射、湿度等）之间的关系，同时控制其他可能干扰的变量。逐步回归分析是一种逐步选择最优预测变量的回归分析方法，其基本思想是在回归模型中逐步添加或剔除解释变量，以确定对因变量有显著影响的独立变量，其优势在于能够处理变量间的共线性问题，选择出最具解释力的变量，从而提高模型的预测精度。本文使用 Mumin 包进行分析^[37]，使用 AIC 值（赤池信息量）来进行模型的筛选，较低的 AIC 值代表更优秀的模型，其中调整 R^2 的计算公式为：

$$adjR^2 = 1 - (n - p - 1) / (1 - R^2)(n - 1)$$

其中, R^2 是普通决定系数, 表示模型所能解释的总方差比例; n 是样本的数量 (数据点的个数); p 是模型中的自变量个数 (解释变量的数量)。

1.3.4 显著性差异分析 使用配对样品的 T 检验, 对日尺度、月尺度、年尺度 CO_2 通量的昼夜差异进行了分析。该方法适用于具有配对结构的数据, 能够检验同一观测对象在两个不同条件 (如昼夜) 下的平均值是否存在显著差异。通过显著性差异分析, 可以更明确地识别在不同时间尺度和水文阶段的下垫面 (如裸露期与淹没期) 中 CO_2 通量的昼夜变化规律, 为深入理解湿地碳交换过程中的时段差异提供数据支持和理论依据。

2 分析结果

2.1 洲滩湿地 CO_2 通量变化规律及昼夜差异

2.1.1 不同月份的 CO_2 通量日变化过程 在整体上, 洲滩湿地 CO_2 通量的日变化随地表覆盖类型变化, 呈现两种典型模式, 并表现出显著的昼夜差异。在裸露期 (1-4 月和 11-12 月), 昼夜通量差异极显著 ($t = -48.45$, $df = 31$, $P < 0.001$), 昼间通量均值为 $6.74 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 低于夜间。其 CO_2 通量呈现白天为汇、夜晚为源的变化特征, 形似“U”形。白天负值特征显著, 说明植被光合作用吸收了大量 CO_2 ; 夜晚转为正值, 表明土壤呼吸释放 CO_2 (图 2), 此阶段具有较大的昼夜差异。在淹没期 (5-10 月), 虽然昼夜通量差异显著 ($t = 5.35$, $df = 35$, $P < 0.001$), 但是昼夜差异较小, 且 CO_2 通量在 $0 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近波动, 昼夜差异较小。在淹没后期 (8-10 月), 昼夜差异逐渐增大, 最大值和最小值通常出现在昼夜交替时段 (图 2)。

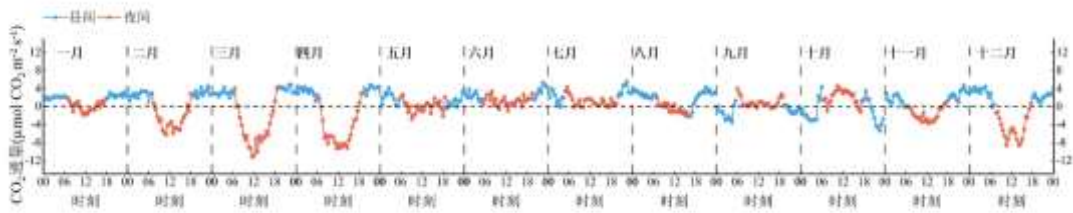


图 2 2021 年鄱阳湖洲滩湿地 CO_2 通量逐月平均日变化过程. 单位: $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 代表月平均 CO_2 通量

Fig. 2. The monthly averaged daily variation process of CO_2 flux in the Lake Poyang floodplain wetland in 2021. Unit: $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ represents the average monthly CO_2 flux

2.1.2 不同月份 CO_2 通量的昼夜差异 在不同月份 CO_2 通量的昼夜差异中, 随着月份的变化, CO_2 通量表现出明显的昼夜差异。在整体上, CO_2 通量的昼夜差异经历了从显著差异到两者接近相等, 再到差异再次增大的变化过程 (图 3)。全年大部分月份的夜间碳源强度通常大于昼间碳汇强度, 但昼夜差异的程度随月份而显著变化。在裸露期 (1-4 月和 11-12 月), 裸露期昼夜通量差异显著 ($t = -5.66$, $df = 5$, $P < 0.01$), 且 CO_2 通量在白天表现为汇, 数值较大且呈现典型的负值特征 (图 3b)。夜晚则表现为源, 通量数值由正值主导, 昼夜间通量差异显著, 为全年昼夜波动最为明显的时期 (图 3c)。在淹没期, 昼夜通量差异不显著 ($t = 0.51$, $df = 5$, $P > 0.05$)。其中在淹没前期 (5-7 月), CO_2 通量昼夜差异不明显, 在全年中昼夜变化最不显著 (图 3b 和图 3c)。然而在淹没后期 (8-10 月), CO_2 通量的昼夜差异再次显现, 并达到全年较高水平。白天 CO_2 通量表现为“源”, 而夜晚则转为明显的“汇”, 昼夜间的波动幅度显著增加 (图 3b 和图 3c)。

2.1.3 不同时期 CO_2 通量的昼夜差异特征 全年夜间碳源强度略高于昼间的碳汇强度, 全年昼夜通量差异极显著 ($t = -35.88$, $df = 8706$, $P < 0.001$), 且夜间 CO_2 通量的值分布更为集中 (图 4a), 这种昼夜差异变化反映了湿地碳循环的时空动态特征。裸露期的昼夜差异最大, 并且昼夜通量差异极显著 ($t = -53.41$, $df = 4589$, $P < 0.001$)。昼间 CO_2 通量表现为明显的“汇”, 平均值为 $-3.22 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 波动范围在 $-9.72-7.91 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 4b)。夜间则转变为 CO_2 的“源”, 平均值为 $2.61 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 通量由负值转为正值, 且夜间 CO_2 通量通常更加集中, 波动范围主要为 $-4.03-7.76$

$\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 4b)。进入淹没期后,昼夜通量差异亦显著 ($t = 5.35, df = 3514, P < 0.001$),然而日间和夜间 CO_2 通量趋于接近,日间与夜间的 CO_2 通量平均值分别为 $0.87 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.10 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,昼夜差异逐渐减小,并且均呈现弱“源”状态,且通量波动较小(图 4c)。此时,昼夜差异明显减小,整体波动幅度接近零值(图 4c)。

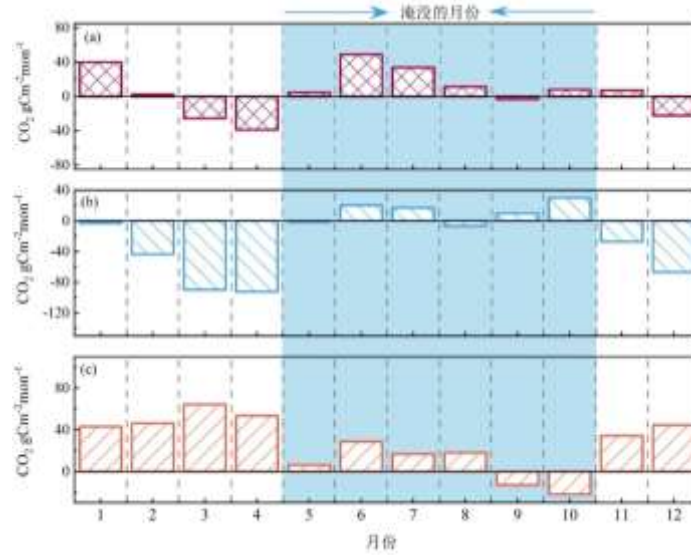


图 3 鄱阳湖洲滩湿地在整日 (a)、日间 (b)、夜间 (c) 的逐月总 CO_2 通量 (单位: $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 表示碳单质的月平均累积量)

Fig. 3. Monthly total CO_2 fluxes of the Poyang floodplain wetland during the whole day (a), daytime (b), and nighttime (c). (Unit: $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$ represents the monthly average cumulative amount of elemental carbon)

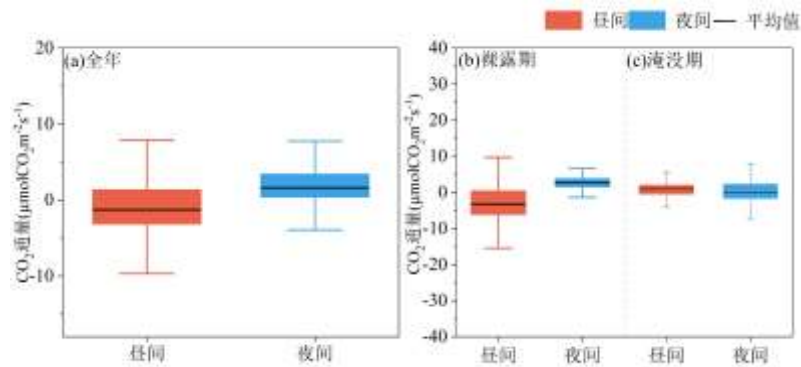


图 4 不同淹水时期的鄱阳湖洲滩湿地 CO_2 通量昼夜差异 (单位: $\mu\text{mol} \cdot \text{CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 4 The diurnal differences in CO_2 flux of the Lake Poyang floodplain wetland during different inundation periods (unit: $\mu\text{mol} \cdot \text{CO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

2.2 洲滩湿地的环境要素变化过程

2021 年,鄱阳湖洲滩湿地的入射短波辐射、气温、土壤温度、水位、相对湿度均与饱和水汽压差呈现出显著的季节性变化特征。日平均入射短波辐射的最低值出现在 12 月 12 日,为 $17.24 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,最高值则出现在 6 月 6 日,为 $335.41 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 5a)。日平均气温的变化范围为 -0.07 至 32.66°C ,土壤温度的日平均值介于 7.93°C 至 30.48°C 之间,且其波动相较气温更加平缓(图 5b)。在水文方面,2021 年鄱阳湖星子站的水位与多年平均值存在差异,且最高水位出现较早,于 5 月 29 日达到全年最大值 18.57 米,并

且洲滩湿地在 2021 年 5 月 15 日至 2021 年 10 月 20 日期间被湖水淹没，淹没时间较多年平均水平明显延长（图 5c）。在空气湿度方面，相对湿度的范围为 19.68%至 134.92%，其中冬季的相对湿度较低（图 5d）。全年风速在 $0.72\text{--}4.80\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间，冬季风速较高（图 5e）。风向主要来自东北和西北方向，少数来自西南方向（图 5f）。在 2021 年所测量到的降水数据中，日降水量最大值为 15.50mm，出现在 2 月 25 日（图 5g）。饱和水汽压差的最高阶段出现在夏季，变化范围在 15.35 hPa 至 1.35 hPa 之间（图 5h）。10 cm 处的土壤含水量在春季相对较高（图 5h）。

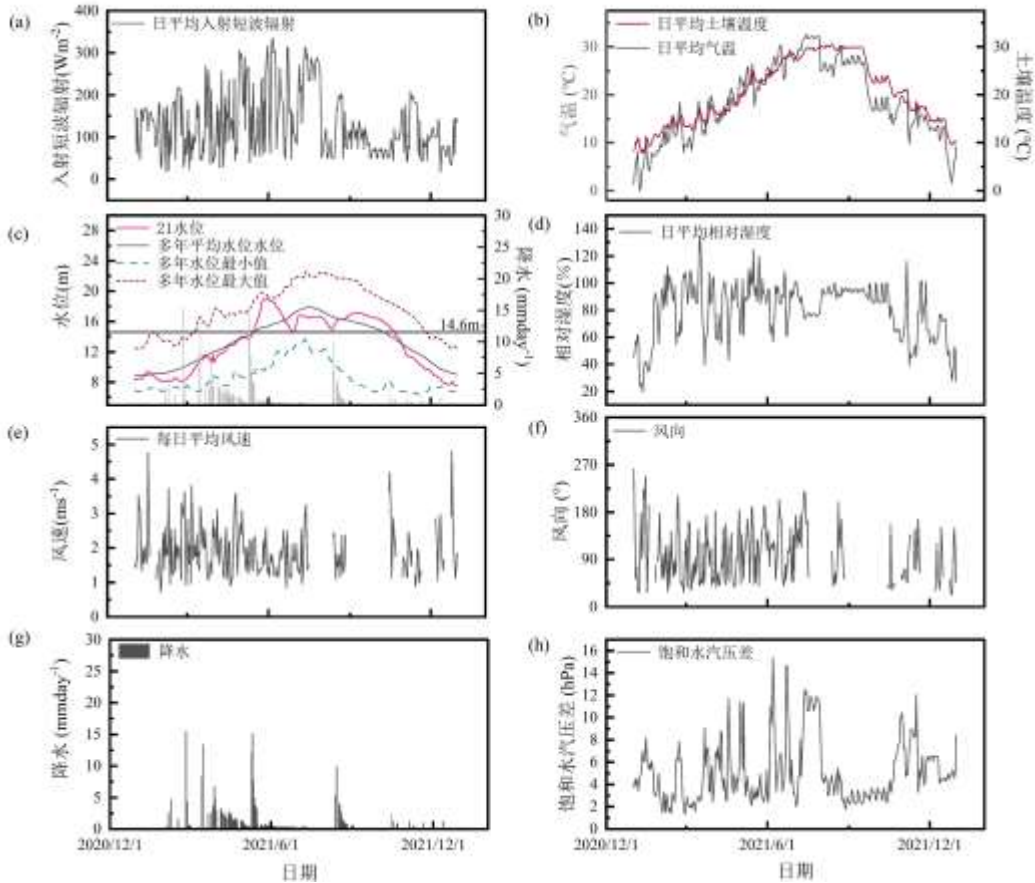


图 5 2021 年鄱阳湖洲滩湿地的环境要素包括：入射短波辐射 (a)，气温 (b)，土壤温度 (c)，相对湿度 (d)，风速 (e)，风向 (f)，降水 (g) 与饱和水汽压 (h)，土壤含水量 (i)，星子水文站 2021 年的水位与多年水位 (j)

Fig. 5. Environmental factors of the Lake Poyang floodplain wetland in 2021, including: incident shortwave radiation (a), air temperature (b), soil temperature (c), relative humidity (d), wind speed (e), wind direction (f), precipitation (g), and saturated water vapor pressure (h), soil moisture content (i), water level of the Xianzi hydrological station in 2021 and the multi-year average water level (j)

图 6 展示了裸露期、淹末期两个时期的影响因素及 CO_2 通量的日变化曲线。两个时期的入射短波辐射均呈单峰变化，且最大值出现在 12:30-13:00 之间。在相对湿度方面，各时期的变化趋势各不相同，淹没期的相对湿度显著高于裸露期（图 6）。风速在两个时期呈现单峰变化特征（图 6）。气温的日变化特征较为一致，最小值出现在 7:00 至 7:30，最大值出现在 15:30 至 16:30（图 6a、6b）。2021 年洲滩湿地的风向主要来自东北和西北方向（图 6），而裸露期的风向波动较大，显示出显著的季节性变化（图 6a）。除了在这两个时期中观察到的两种变化模式外，还可以看出不同时期的昼夜差异。在裸露期，夜间 CO_2 通

量较白天稳定，波动幅度较小。相较之下，在淹没期，夜间 CO_2 通量的波动范围大于白天，但波动频率较低（图 6b）。这种昼夜差异的变化趋势与不同水位期的环境条件密切相关，进一步验证了水位变化对 CO_2 通量的影响。

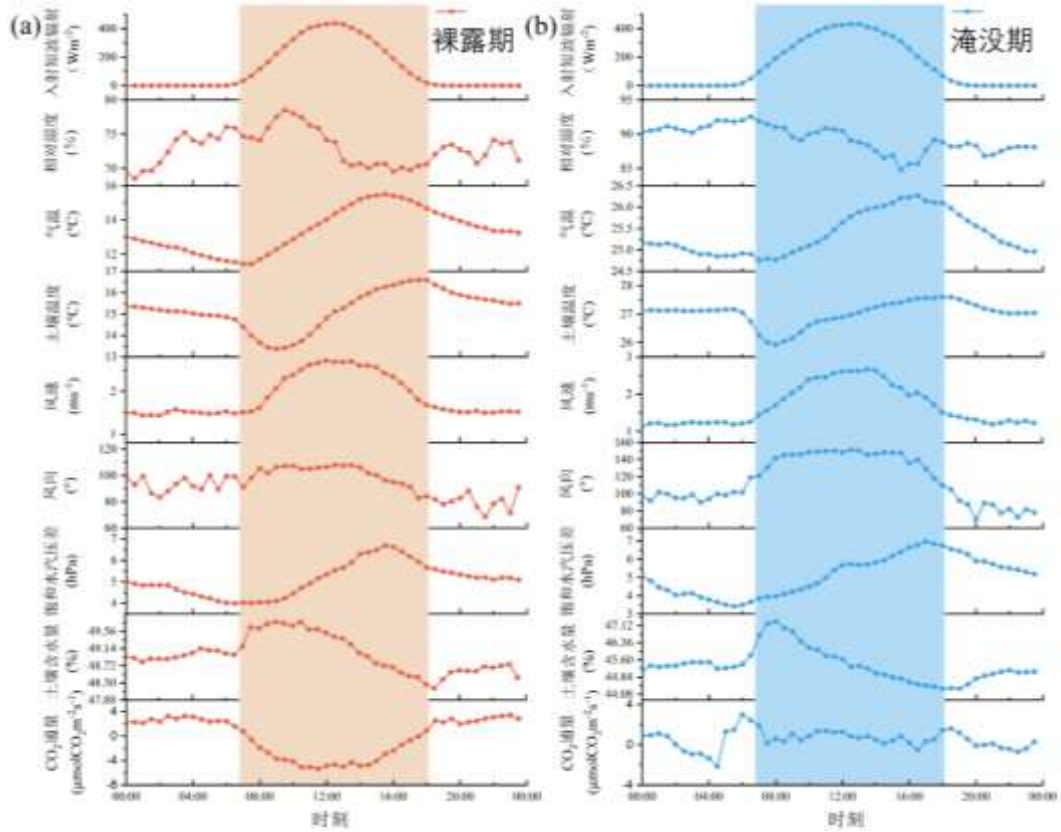


图 6 2021 年鄱阳湖洲滩湿地的影响因素与 CO_2 通量在裸露期（5 月 15 日-10 月 20 日与淹没期（1 月 1 日-5 月 14 日与 10 月 21 日-12 月 31 日）平均日变化，图中阴影部分代表昼间

Fig. 6 daily variation of influencing factors and CO_2 flux in the Lake Poyang floodplain wetland in 2021 during the exposed (May 15 – October 20) and inundated periods (January 1 – May 14 and October 21 – December 31). The shaded area represents daytime

2.3 CO_2 通量昼夜变化与环境要素的关系

在裸露期， CO_2 通量与环境要素的偏相关关系在昼间和夜间表现出显著差异。昼间 CO_2 通量与入射短波辐射、土壤含水量、气温和降水呈显著负相关，其中入射短波辐射的影响尤为显著（图 7a）。风向、土壤温度、风速、饱和水汽压差和相对湿度与昼间 CO_2 通量呈正相关关系，且风向的正相关作用最为突出（图 7a）。夜间的相关性相比昼间有所不同，与 CO_2 通量具有显著正相关关系的因素包括气温、相对湿度、土壤含水量、降水，与 CO_2 通量呈显著负相关关系的有土壤温度、风向，具有显著相关关系的要素中，除相对湿度、风向外其余要素对 CO_2 通量的影响与裸露期昼间相反。在淹没期， CO_2 通量的相关性模式同样随昼夜变化而表现出明显差异，且其主要影响因素与裸露期相比亦存在显著不同。在昼间，与 CO_2 通量呈正相关的因素包括气温与土壤含水量，其中土壤含水量与 CO_2 通量的正相关性较强；而降水和风向则与 CO_2 通量呈显著负相关关系（图 7c）。在夜间， CO_2 通量与土壤含水量的负相关关系尤为显著，同时还与饱和水汽压差和风向存在一定程度的相关性（图 7d）。

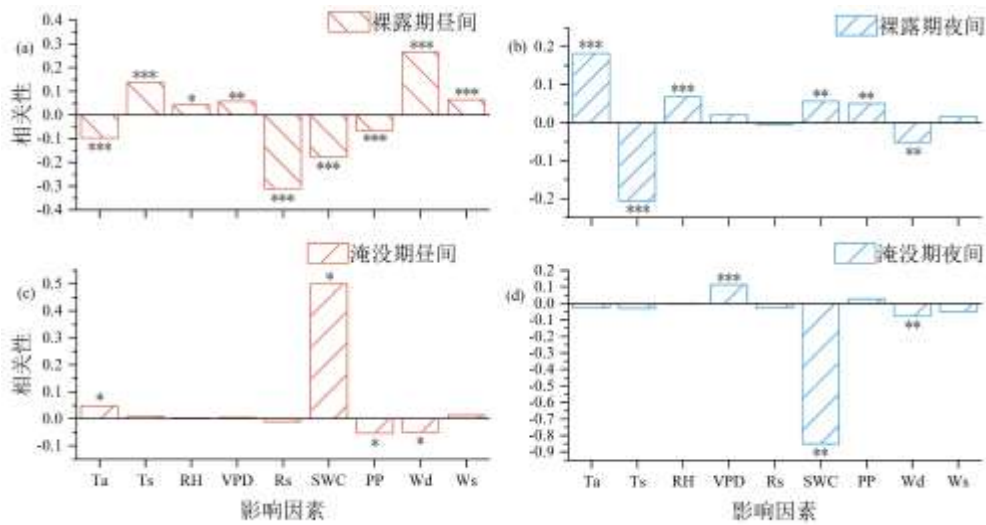


图 7 CO₂ 通量与影响因素的偏相关分析，其纵坐标为偏相关系数。子图 (a, b, c, d) 分别代表裸露期昼间、裸露期夜间、淹没期昼间、淹没期夜间的片相关分析结果

Fig. 7 Partial correlation analysis of CO₂ flux and influencing factors, where the ordinate is partial correlation coefficient. Subgraphs (a, b, c, d) represent the film correlation analysis results of exposed period day, exposed period night, flooded period day and flooded period night, respectively.

基于以上偏相关分析，采用逐步回归分析方法，进一步探讨在不同阶段上影响湿地昼间与夜间总 CO₂ 通量的主要驱动因素，以及各要素在裸露期与淹没期的主次作用及其可能的因果机制。在裸露期昼间，总 CO₂ 通量主要受到短波辐射、土壤含水量和风向的显著影响。其中，入射短波辐射与土壤含水量呈显著负相关，分别解释了通量变异的 33.90% 和 32.33%，表明光照强度和土壤水分是影响总 CO₂ 释放的主要限制因子（图 8a）。此外，风向解释了 17.53% 的变异（图 8a）。其他因素，如气温和水位，对通量的影响次之，贡献率均在 5% 以下（图 8a）。在夜间，土壤温度成为主导因子，占通量变异的 33.99%，表明裸露期夜间 CO₂ 通量主要受土壤呼吸的驱动作用（图 8b）。同时，相对湿度和气温解释了通量变异的 24.10% 和 19.93%（图 8b）。淹没期昼间的逐步回归分析显示，土壤含水量和土壤温度分别是主要驱动因子，对通量变异的贡献率为 34.63% 和 21.90%（图 8c）。与裸露期相比，淹没期昼间的环境因子对 CO₂ 通量的影响更集中于水分与温度相关的要素。在淹没期的夜间，影响因子主要包括土壤含水量、水位和土壤温度，分别解释了通量变异的 31.56%、23.37% 和 21.27%（图 8c）。此外，风速解释了 15.58% 的变异，表明气流扰动在水面气体交换中扮演了重要角色（图 8c）。从逐步回归分析的结果可以看出，裸露期和淹没期的 CO₂ 通量受不同主导因素的驱动。在裸露期，光照和土壤含水量对通量的调控作用显著，反映了光合作用和土壤呼吸的主要影响。而在淹没期，水分条件（土壤含水量与水位）对 CO₂ 释放的限制作用更为突出，尤其是在夜间水文因子的主导地位更加显著。裸露期以气象因素为主，强调了湿地的土壤-植物-大气相互作用；而淹没期因水位上升导致厌氧环境的形成，使得水文和温度相关因子成为通量调控的核心。

3 讨论

3.1 洲滩湿地 CO₂ 通量的源汇转变及昼夜变化

本研究发现，鄱阳湖洲滩湿地 CO₂ 通量的源汇转换受水位变化的显著影响，并进一步发现湿地 CO₂ 通量与湿地的淹没与暴露有关。鄱阳湖洲滩湿地在无水覆盖时，CO₂ 通量的吸收能力增强，此现象在其他研究中也有所发现。在我国的西北干旱区湖泊一艾比湖发现，在无水与洪水的情形中，裸地的碳吸收

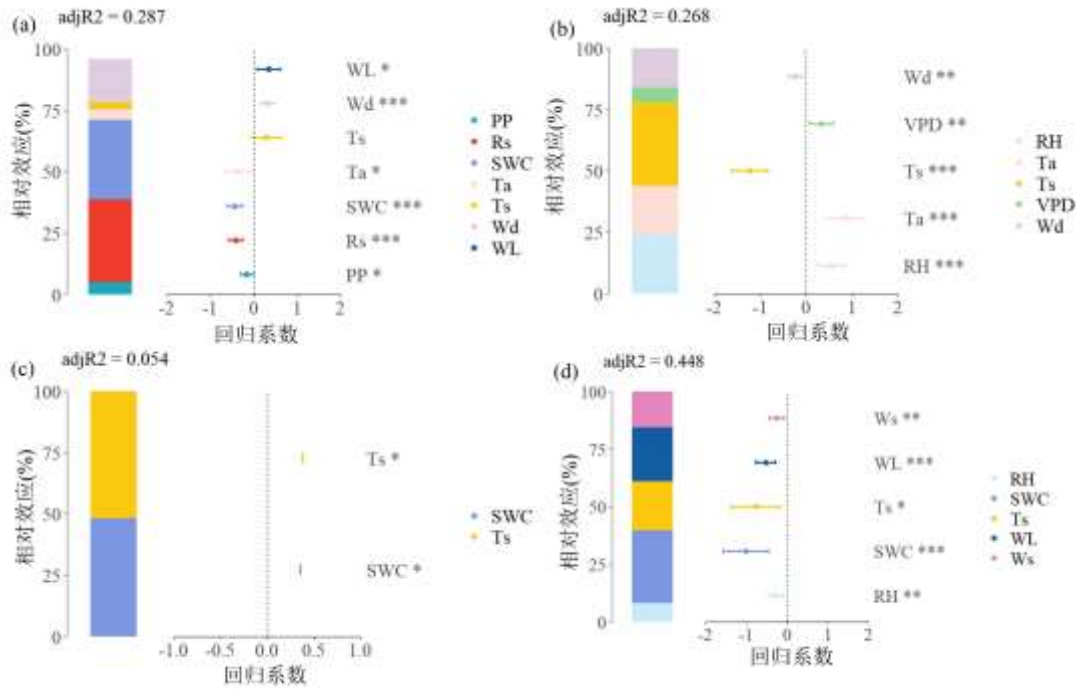


图 8 影响裸露期与淹没期昼间和夜间日总 CO₂ 通量值的变量重要性分析。柱状图表示各变量的解释 R² 值，森林图则显示了线性模型中各影响因素的标准化回归系数及其标准差，星号表示变量在模型中的显著性。

Fig. 8. The importance analysis of variables affecting the daily total CO₂ flux during the exposed and inundated periods, both day and night. The bar chart represents the R² values explaining the variables, while the forest plot shows the standardized regression coefficients and their standard errors for the influencing factors in the linear model. Asterisks indicate the significance of the variables in the model.

能力更强^[38]，在我国洞庭湖洪泛区和俄罗斯鄂毕河的研究中，也发现季节性淹没会导致湿地由碳汇转为碳源^[18, 39, 40]。以上现象出现的原因，为湿地淹没和暴露过程改变了湿地的碳源与碳汇功能。在裸露期，土壤和植被直接暴露于大气中，植物光合作用在白天显著增强，使湿地呈现出碳汇特征；而夜间光合作用停止，呼吸作用占主导，表现为 CO₂ 的排放。在淹没期，CO₂ 通量的变化较小，所考虑的环境因子对 CO₂ 通量的影响相对较弱，这可能与水体覆盖有关^[41]。水体的覆盖抑制了光照、水气交换和土壤氧气供应，限制了植物光合作用和微生物活，整体通量趋于平缓甚至转为碳源。此外，在其他研究中也发现，淹没前后改变了 CO₂ 通量的昼夜差异的强度^[42]。值得注意的是，在淹没的后期（9 月和 10 月），水体在夜间表现出 CO₂ 通量为负的现象，碳汇的最大值分别出现在约 4:30 和 22:00 左右。该现象可能与 2021 年水体覆盖时间较多年平均覆盖时间延长有关，并且 9-10 月期间的日平均气温相对较低、日较差增大，进而使水体温度降低。在较低水温条件下，CO₂ 在水中的溶解度增加；若此时空气中的 CO₂ 分压高于水体中的 CO₂ 分压，则可能出现短时间内水体吸收大气中 CO₂ 的现象，表现为 CO₂ 通量的汇。因此，忽视 CO₂ 通量的昼夜差异性可能导致湿地固碳能力的高估或低估，仅关注昼间碳汇能力可能高估湿地的整体碳汇潜力，而忽视夜间的碳排放则可能低估湿地在特定时期的碳源效应。本文更进一步揭示了昼夜通量格局的变化及其对整体碳平衡的影响。昼夜通量存在的显著差异性，凸显了在评估湿地固碳能力时，必须同时考虑昼夜过程及其随水文条件动态变化的重要性。

3.2 洲滩湿地 CO₂ 通量变化与环境要素之间的关系

3.2.1 归因分析 裸露期 CO₂ 通量的昼夜差异主要受植物与微生物的呼吸与光合作用等生物过程的影响，同

时也与土壤含水量、降水和风向等环境因素密切相关。相比之下，淹没期由于本研究区位于五河在湖区汇合后途径的卡口，水体的流速较高。在丰水期星子站水体的溶解氧含量较低，浮游植物的密度较低，而浮游动物的含量较多，因此浮游植物对光合作用的贡献较少，而浮游植物与动物的呼吸作用的贡献较多，因此会导致水体覆盖时期主要为 CO_2 的释放。引起淹没期 CO_2 通量的昼夜差异则主要由水-气界面和水-土界面相关因素驱动，包括气温、饱和水汽压差、土壤含水量和降水等。

在裸露期昼间，引起昼夜差异的主要原因包括：辐射、温度、土壤水分状态与大气湿度等，这些因子通过影响植物生理活动与土壤过程，驱动生态系统碳交换的动态变化。短波辐射和气温升高通常增强光合作用，促进 CO_2 吸收。而土壤温度过高则可能加速有机质分解，抑制植物生长，减少碳吸收^[42]，这一现象在其他研究中也有所发现^[43-45]。此外，饱和水汽压差的升高可引起植物气孔部分关闭，抑制光合作用，使净 CO_2 释放增加。相对湿度则通常与 CO_2 通量呈正相关关系，这可能是由于降水前后光照减弱和蒸腾降低有关。土壤含水量既影响生物过程，又对气体物理扩散具有直接调控作用。在一定范围内，水分增加促进 CO_2 排放，但过饱和时会限制氧气扩散，抑制 CO_2 释放^[46, 47]。昼间，土壤含水量的升高可能增强植物活性，促进 CO_2 吸收。降水作为一个重要的外部扰动，能够显著影响 CO_2 通量。一方面，降水可通过水分补给促进植物生长，增强生态系统光合作用；另一方面，降水也可能通过填充土壤孔隙、增强表层封闭性，物理性抑制土壤中 CO_2 的扩散与释放^[48]。在蒙古草原研究中，降水增强了生态系统呼吸（ER）与总生态系统生产力（GEP）^[49]，但在洲滩湿地中， CO_2 通量的降低则可能是由于 GEP 提升幅度超过 ER，或降水阻碍 CO_2 释放。此外，风向也是影响洲滩湿地 CO_2 通量昼夜差异的重要因素。裸露期白天常有来自湖面的东风，携带水体 CO_2 通量，进一步加强了昼夜差异。

与昼间以光合作用为主导的碳汇功能不同，裸露期夜间的 CO_2 通量主要由植物与微生物的呼吸作用驱动，其响应环境因子的敏感性和机制亦有所差异。气温升高有助于夜间植物和微生物的呼吸增强，但该过程存在一定的最适温度范围^[50]。相比之下，土壤温度与降水促进了 CO_2 通量的吸收，温度升高和降水增多，利于微生物呼吸，导致 CO_2 排放增加。此外适度增加的土壤水分有利于微生物呼吸，尤其在适宜的土壤水分充填空隙率范围内，微生物异养呼吸更为活跃^[51]。风向的昼夜差异同样对 CO_2 通量产生显著影响。夜间以西风为主，此方向的通量来自于陆地，夜间植被的呼吸作用排放的 CO_2 通量通常高于水体，因此增强了来自湿地的碳排放。夜间的风向主要由陆地吹向湖泊，风向的这种昼夜转换进一步加剧了洲滩湿地 CO_2 通量的昼夜差异。

淹没期引起昼夜差异的因素为气温、土壤含水量、降水。本研究中，淹没期昼间，温度与 CO_2 通量之间呈现显著正相关关系，因为气温的升高会促进水-气界面的碳交换^[52]。土壤水分含量会影响微生物的活动，较高的土壤水分含量使微生物的群落结构更为丰富，并且可以提高液体扩散速率，为微生物提供碳氮底物^[53]。降水可以增强水面的湍流^[54]，也可以产生气泡^[55]，从而增加水体与空气之间的气体传输速率，传输速率的增加有利于加快 CO_2 的交换过程但是否表现为 CO_2 的“吸收”或“释放”，仍取决于水体与大气之间的 CO_2 分压差（ $\Delta p\text{CO}_2$ ）。当水体 CO_2 分压低于大气（即 $\Delta p\text{CO}_2 < 0$ ）时，增强的传输速率将促进大气 CO_2 向水体扩散，表现为碳吸收；反之若 $\Delta p\text{CO}_2 > 0$ ，则会加速水体向大气释放 CO_2 。因此，降水增加气体交换速率，并不必然导致 CO_2 吸收量增加，而是取决于分压梯度的方向和大小。

夜间水体温度为上冷下热，水体与大气的交换受到抑制。引起淹没期夜间昼夜差异的因素主要包括饱和水汽压差与土壤含水量，二者共同作用引起了夜间 CO_2 通量差异。夜间若因水体放热或逆温现象导致饱和水汽压升高，将引起饱和水汽压差上升，从而增强蒸发和扰动，促进水-气界面气体交换。夜间 CO_2 通量随土壤含水量的增加而增加，这很可能是由于夜间水体温度降低，微生物的活性减弱，水体中的 CO_2 减少，水体 CO_2 分压降低，从而更容易吸收 CO_2 。

3.2.2 科学性与局限性 本研究的局限性主要在于缺乏 30 分钟高频水位数据，导致水位对 CO_2 通量日内变化及昼夜差异的关联分析和归因分析无法深入展开。此外，本研究虽然通过相关性分析和回归关系揭示了主控因素，但因果关系的确立以及机制的详细探讨仍是未来研究的挑战。未来的研究仍需要更多的数据和实验来深入理解这些机制，进而完善湿地碳循环的理论框架。

4 结论

本研究基于 EC 系统平水年的观测数据, 结合偏相关分析和逐步回归分析, 深入探讨了鄱阳湖洲滩湿地 CO₂通量的日变化过程及其昼夜差异。研究通过对裸露期与淹没期的不同时间段(昼间与夜间)进行细致分析, 揭示了环境因子在不同水文和气象条件下对 CO₂通量的影响模式与主控因素。

结论表明, 湿地 CO₂通量的昼夜差异及其变化特征显著, 且这些差异在裸露期与淹没期呈现出明显的时空变化。在裸露期, CO₂通量的昼夜差异主要由入射短波辐射、土壤含水量和风向等环境因子驱动。其中昼间短波辐射和土壤含水量的负相关性尤为突出, 而风向则在昼间表现出较强的正相关作用; 夜间, 土壤温度和相对湿度成为主导因素, 影响 CO₂通量的变化。与裸露期相比, 淹没期的环境因子对 CO₂通量的影响更集中于水文因素, 如土壤含水量和水位, 尤其在夜间水文因子对 CO₂通量的主导作用更加显著。

逐步回归分析进一步揭示了各个环境因子对 CO₂通量变异的贡献。在裸露期, 短波辐射和土壤含水量是昼间 CO₂通量的主要影响因子, 分别解释了通量变异的 33.90%和 32.33%; 而夜间, 土壤温度、相对湿度和气温则共同作用于 CO₂通量。在淹没期, 土壤含水量和土壤温度成为昼间 CO₂通量的主要驱动因子, 而水位和土壤温度则在夜间对 CO₂通量具有较大影响。研究表明, 湿地湖泊的碳排放与湿地的水位状况有关, 并且水位状况与土壤-植物-大气相互作用在裸露期和淹没期表现出不同的主控作用, 这些差异主要源于湿地生态系统中的水文动态变化。

本研究的分析方法和结果不仅为湿地碳循环的动态特征提供了科学依据, 还为湿地碳汇功能的评估与管理提供了理论支持。通过量化不同环境因子对 CO₂通量的贡献, 本研究为深入理解湿地生态系统的碳循环过程、提升湿地碳汇功能的管理提供了重要的参考与理论依据。

5 参考文献

- [1] Chen YY, Lu XG. The wetland function and research tendency of wetland science. *Wetland Science*, 2003, **1**(1): 7-11. DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2003.01.003. [陈宜瑜, 吕宪国. 湿地功能与湿地科学的研究方向. *湿地科学*, 2003, **1**(1): 7-11.]
- [2] Yang YX. Main characteristics, progress and prospect of international wetland science research. *Progress in Geography*, 2002, **21**(2): 111-120. [杨永兴. 国际湿地科学研究的主要特点、进展与展望. *地理科学进展*, 2002, **21**(2): 111-120.]
- [3] Duan XN, Wang XK, Yin T, et al. Advance in the studies on carbon sequestration potential of wetland ecosystem. *Ecology and Environment*, 2006, **15**(5): 1091-1095. [段晓男, 王效科, 尹毅等. 湿地生态系统固碳潜力研究进展. *生态环境*, 2006, **15**(5): 1091-1095.]
- [4] Mitsch W J, Bernal B, Nahlik A M, et al. Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape ecology*, 2013, **28**: 583-597.
- [5] Liu ZG. Carbon stock and GHG emission of wetland ecosystem. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, **24**(5): 634-639. [刘子刚. 湿地生态系统碳储存和温室气体排放研究. *地理科学*, 2004(05): 634-CO2639.]
- [6] Luan J W, Cui L J, Song H T, et al. Foreign research progress on carbon cycle in wetland ecosystems. *Wetland Science*, 2012, **10**(2): 235-242. DOI:10.13248/j.cnki.wetlandsci.2012.02.018. [栾军伟, 崔丽娟, 宋洪涛等. 国外湿地生态系统碳循环研究进展. *湿地科学*, 2012, 10(02): 235-242.]
- [7] Zhou NQ, Guo MS, Cai Y, et al. Mechanism of cycle and source-sink conversion and quantitative carbon exchange model in critical zone of wetland. *Earth Science Frontiers*, 2024, **31**(06): 436-449. DOI:10.13745/j.esf.sf.2024.6.36. [周念清, 郭梦申, 蔡奕, 等. 湿地关键带碳循环与碳源碳汇转化机制及碳交换量化模式. *地学前沿*, 2024, **31**(06): 436-449.]
- [8] 李金帅, 郝天象, 杨萌, 等. 中国自然湿地生态系统碳循环关键过程及增汇途径. *中国科学:地球科学*, 2024, **54**(08): 2478-2495.
- [9] Rhee J S, Iamchaturapatr J. Carbon capture and sequestration by a treatment wetland. *Ecological Engineering*, 2009, **35**(3): 393-401.
- [10] Kayranli B, Scholz M, Mustafa A, et al. Carbon storage and fluxes within freshwater wetlands: a critical review. *Wetlands*, 2010, **30**: 111-124.
- [11] Junk W J, An S, Finlayson C M, et al. Current state of knowledge regarding the world's wetlands and their future under global climate change: a synthesis. *Aquatic sciences*, 2013, **75**: 151-167.

- [12] Minick K J, Mitra B, Li X, *et al.* Wetland microtopography alters response of potential net CO₂ and CH₄ production to temperature and moisture: Evidence from a laboratory experiment. *Geoderma*, 2021, **402**: 115367.
- [13] Fortuniak K, Pawlak W, Siedlecki M, *et al.* Temperate mire fluctuations from carbon sink to carbon source following changes in water table. *Science of the Total Environment*, 2021, **756**: 144071.
- [14] Kandel T P, Lærke P E, Hoffmann C C, *et al.* Complete annual CO₂, CH₄, and N₂O balance of a temperate riparian wetland 12 years after rewetting. *Ecological Engineering*, 2019, **127**: 527-535.
- [15] Limpert K E, Camell P E, Trevathan-Tackett S M, *et al.* Reducing emissions from degraded floodplain wetlands. *Frontiers in Environmental Science*, 2020, **8**: 8.
- [16] Zou J, Ziegler A D, Chen D, *et al.* Rewetting global wetlands effectively reduces major greenhouse gas emissions. *Nature Geoscience*, 2022, **15**(8): 627-632.
- [17] Zhang X, Li Y, Ren S, *et al.* Soil CO₂ emissions and water level response in an arid zone lake wetland under freeze-thaw action. *Journal of Hydrology*, 2023, **625**: 130069.
- [18] Zhao J, Malone S L, Oberbauer S F, *et al.* Intensified inundation shifts a freshwater wetland from a CO₂ sink to a source. *Global Change Biology*, 2019, **25**(10): 3319-3333.
- [19] Pugh C A, Reed D E, Desai A R, *et al.* Wetland flux controls: how does interacting water table levels and temperature influence carbon dioxide and methane fluxes in northern Wisconsin? . *Biogeochemistry*, 2018, **137**: 15-25.
- [20] Xia J, Chen J, Piao S, *et al.* Terrestrial carbon cycle affected by non-uniform climate warming. *Nature Geoscience*, 2014, **7**(3): 173-180.
- [21] Wang K, Bastos A, Ciais P, *et al.* Regional and seasonal partitioning of water and temperature controls on global land carbon uptake variability. *Nature Communications*, 2022, **13**(1): 3469.
- [22] Salimi S, Almuktar S A, Scholz M. Impact of climate change on wetland ecosystems: A critical review of experimental wetlands. *Journal of Environmental Management*, 2021, **286**: 112160.
- [23] Verduzco V S, Garatuza - Payán J, Yépez E A, *et al.* Variations of net ecosystem production due to seasonal precipitation differences in a tropical dry forest of northwest Mexico. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, **120**(10): 2081-2094.
- [24] Yang Y, Shi Y, Sun W, *et al.* Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality. *Science China Life Sciences*, 2022, **65**(5): 861-895.[杨元合,石岳,孙文娟,等. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献. *中国科学: 生命科学*, 2022,**52**(04):534-574.]
- [25] Xiao D, Deng L, Kim D G, *et al.* Carbon budgets of wetland ecosystems in China. *Global Change Biology*, 2019, **25**(6): 2061-2076.
- [26] Wen Z, Shang Y, Lyu L, *et al.* Re-estimating China's lake CO₂ flux considering spatiotemporal variability. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2024, **19**: 100337.
- [27] Golub M, Koupaei-Abyazani N, Vesala T, *et al.* Diel, seasonal, and inter-annual variation in carbon dioxide effluxes from lakes and reservoirs. *Environmental Research Letters*, 2023, **18**(3): 034046.
- [28] Rudberg D, Duc N T, Schenk J, *et al.* Diel variability of CO₂ emissions from northern lakes. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, **126**(10): e2021JG006246.
- [29] 朴世龙, 何悦, 王旭辉等. 中国陆地生态系统碳汇估算:方法、进展、展望. *中国科学: 地球科学*, 2022,**52**(6): 1010-1020.
- [30] 李燕. 鄱阳湖湿地土壤微生物群落对干化—干湿转化过程的响应[学位论文]. 南昌: 江西师范大学, 2018.
- [31] 闵骞. 鄱阳湖水位变化规律的研究. *湖泊科学*, 1995,**7**(03): 281-288.
- [32] Liu Y, Wu G. Hydroclimatological influences on recently increased droughts in China's largest freshwater lake. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, **20**(1): 93-107.
- [33] Falge E, Baldocchi D, Olson R, *et al.* Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and forest meteorology*, 2001, **107**(1): 43-69.
- [34] 刘元波, 吴桂平, 柯长青. 水文遥感. 北京: 科学出版社, 2016.

- [35] Reichstein M, Falge E, Baldocchi D, *et al.* On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global change biology*, 2005, **11**(9): 1424-1439.
- [36] Papale D, Reichstein M, Aubinet M, *et al.* Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. *Biogeosciences*, 2006, **3**(4): 571-583.
- [37] Erb I. Partial correlations in compositional data analysis. *Applied Computing and Geosciences*, 2020, **6**: 100026.
- [38] Zhang X, Li Y, Ren S, *et al.* Soil CO₂ emissions and water level response in an arid zone lake wetland under freeze–thaw action. *Journal of Hydrology*, 2023, **625**: 130069.
- [39] Barton K. MuMIn: Multi-model inference. R package version 1.7. 2. <http://CRAN.R-project.org/package=MuMIn>, 2012.
- [40] Cui Y, Liu Y, Gan G, *et al.* Hysteresis behavior of surface water fluxes in a hydrologic transition of an ephemeral lake. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, **125**(12): e2019JD032364.
- [41] Lai D Y F. Methane dynamics in northern peatlands: a review. *Pedosphere*, 2009, **19**(4): 409-421.
- [42] Han, Guangxuan, *et al.* "Effects of episodic flooding on the net ecosystem CO₂ exchange of a supratidal wetland in the Yellow River Delta." *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* **120.8** (2015): 1506-1520.
- [43] Chen, Ying, *et al.* "Whole-soil warming leads to substantial soil carbon emission in an alpine grassland." *Nature Communications* **15.1** (2024): 4489.
- [44] Soong, Jennifer L., *et al.* "Five years of whole-soil warming led to loss of subsoil carbon stocks and increased CO₂ efflux." *Science advances* **7.21** (2021): eabd1343.
- [45] Tagesson T, Fensholt R, Cappelaere B, *et al.* Spatiotemporal variability in carbon exchange fluxes across the Sahel. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, **226**: 108-118.
- [46] Hao, Yuefeng, *et al.* "Soil moisture controls over carbon sequestration and greenhouse gas emissions: a review." *npj Climate and Atmospheric Science* **8.1** (2025): 16.
- [47] ZHANG, Longqi, *et al.* "The individual scale water-carbon coupling process of *Platycladus orientalis* under CO₂ and water stress in Beijing mountainous area." *JOURNAL OF NANJING FORESTRY UNIVERSITY* **49.1** (2025): 128. [张龙齐, *et al.* "CO₂ 和水分胁迫下北京山区侧柏个体尺度水碳耦合过程研究." *南京林业大学学报(自然科学版)* **49.1** (2025): 128.]
- [48] Delsarte, Isabelle, *et al.* "Soil carbon dioxide fluxes to atmosphere: The role of rainfall to control CO₂ transport." *Applied Geochemistry* **127** (2021): 104854.
- [49] Zhang, Rui, *et al.* "Impacts of precipitation on ecosystem carbon fluxes in desert-grasslands in Inner Mongolia, China." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **124.3** (2019): 1266-1276.
- [50] Chen, W., Wang, S., Wang, J., Xia, J., Luo, Y., Yu, G., & Niu, S. (2023). Evidence for widespread thermal optimality of ecosystem respiration. *Nature Ecology & Evolution*, **7**(9), 1379–1387.
- [51] Liang G, Stefanski A, Eddy W C, *et al.* Soil respiration response to decade-long warming modulated by soil moisture in a boreal forest. *Nature Geoscience*, 2024, **17**(9): 905-911.
- [52] Jia J, Sun K, Lü S, *et al.* Determining whether Qinghai–Tibet Plateau waterbodies have acted like carbon sinks or sources over the past 20 years. *Science Bulletin*, 2022, **67**(22): 2345-2357.
- [53] Banerjee S, Helgason B, Wang L, *et al.* Legacy effects of soil moisture on microbial community structure and N₂O emissions. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, **95**: 40-50.
- [54] Bohórquez-Bedoya, E., Rovelli, L., & Lorke, A. (2024). Rainfall as a driver for near-surface turbulence and air-water gas exchange in freshwater aquatic systems. *PLOS ONE*, **19**(3), e0299998. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299998>.
- [55] Ho, D. T., Asher, W. E., Bliven, L. F., Schlosser, P., & Gordan, E. L. (2000). On mechanisms of rain-induced air-water gas exchange. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **105**(C10), 24045–24057. <https://doi.org/10.1029/1999JC00028>