

丹江口水库丰水期与枯水期 CO₂ 通量变化特征及影响因素*

卢名燊^{1,2}, 吴玥^{1,2}, 陈梦晗^{1,2}, 付琛昊^{1,2}, 秦淑静^{1,2}, 刘攀^{1,2}, 张棹^{1,2}, 程磊^{1,2**}

(1: 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉 430072)

(2: 武汉大学水利水电学院, 武汉 430072)

摘要: 水库在调节径流的同时深刻改变了河流连续体的碳通量和碳储存, 在全球碳循环中扮演着重要的调控作用, 其源汇大小受到自然条件、水库特征和调度管理等多方面影响。当前对不同水文条件下水库水-气界面 CO₂ 通量动态变化及其影响因素的观测与研究仍十分匮乏, 严重制约了水库碳收支估算的准确性。本研究以亚热带季风区的丹江口水库为研究对象, 基于 2022 年 4 月至 2024 年 2 月的涡度通量观测数据, 结合结构方程模型 (Structural Equation Model, SEM), 定量解析丰水期与枯水期水-气界面 CO₂ 通量的差异及其影响因素。结果表明, 丹江口水库全年 CO₂ 通量均值为 $0.12 \pm 1.93 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 总体表现为弱碳源, 但存在显著的季节性差异, 丰水期 (4-10 月) CO₂ 通量为碳源 ($0.97 \pm 1.22 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), 而枯水期 (11-3 月) 转为碳汇 ($-1.13 \pm 2.04 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。SEM 路径分析表明, 能量因子 (显热通量为主) 在丰、枯水期均为 CO₂ 通量的主要直接负向驱动因子, 且在枯水期作用更为显著。丰水期水文和水体物理性质通过促进营养物质积累和浮游植物繁殖, 进而增强微生物呼吸作用, 显著提高 CO₂ 排放, 而枯水期水体相对稳定且营养负荷减弱, 浮游植物等对 CO₂ 通量的作用由正转负, 生物过程转而促进 CO₂ 吸收。研究结果揭示了丹江口水库不同水文时期下 CO₂ 通量源汇特征及驱动机制, 为水库碳收支评估及碳调度提供科学依据。

关键词: 丹江口水库; 二氧化碳通量; 丰水期; 枯水期; 影响因素; 结构方程模型

Comparison and influence factors of carbon dioxide flux in Danjiangkou Reservoir during wet and dry periods*

Lu Mingshen^{1,2}, Wu Yue^{1,2}, Chen Menhan^{1,2}, Fu Chenhao^{1,2}, Qin Shujing^{1,2}, Liu Pan^{1,2}, Zhang Lu^{1,2} & Cheng Lei^{1,2,**}

(1: State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, P.R.China)

(2: School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, P.R.China)

Abstract: Reservoirs significantly alter carbon flux and storage along riverine systems, playing a critical role in the global carbon cycle. The carbon source-sink dynamics of reservoirs are influenced by a complex interplay of natural conditions, reservoir characteristics, and operational management. However, data on the dynamics of CO₂ fluxes at the water-air interface under varying hydrological regimes remain scarce, limiting the accuracy of carbon budget assessments. This study investigates the Danjiangkou Reservoir in a subtropical monsoon region. Using eddy covariance observations from April 2022 to February 2024 and Structural Equation Modeling (SEM), we quantitatively analyzed the seasonal variations in CO₂ fluxes and their driving

* 2025-05-21 收稿; 2025-08-05 收修改稿。

国家自然科学基金项目 (U2340207, 52394233) 和湖北省自然科学基金项目 (2022CFA094) 联合资助。

** 通讯作者; Email: lei.cheng@whu.edu.cn。

factors during wet and dry periods. The results indicate that the annual mean CO₂ flux was $0.12 \pm 1.93 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, characterizing the reservoir as a weak carbon source with pronounced seasonal variation. Specifically, the reservoir acted as a carbon source during the wet period (April to October; $0.97 \pm 1.22 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) but shifted to a carbon sink during the dry period (November to March; $-1.13 \pm 2.04 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$). SEM analysis revealed that energy-related factors, particularly sensible heat flux, were the most direct and significant negative influence on CO₂ fluxes in both periods, with a stronger effect during the dry season. During the wet period, inflow and physical water properties significantly enhanced CO₂ emissions, whereas in the dry season, the influence of phytoplankton and nutrients reversed from positive to negative, indicating an increased contribution of biological processes to CO₂ uptake. These findings elucidate the seasonal source-sink dynamics and their driving mechanisms in the Danjiangkou Reservoir under different hydrological regimes, providing a scientific basis for refined carbon budget assessments and informed, carbon-oriented management strategies.

Key words: Danjiangkou Reservoir; carbon dioxide fluxes; wet period; dry period; influence factors; structural equation model

水库在防洪、发电、航运及供水等方面发挥重要作用，但其修建和运行改变了天然河流的水文条件，对水循环和碳循环过程产生了直接影响^[1]。越来越多的研究表明，水库既可通过浮游植物光合作用和淹没区有机质埋藏等机制吸收大气 CO₂，也可因底层有机质矿化、淹没植被分解等过程释放大量 CO₂，使其在生物地球化学循环中同时扮演碳汇与碳源的双重角色^[2,3]。据估算，水库排放温室气体的全球变暖潜能值相当于人类活动总排放量的 4%~7%^[4-7]。然而，由于水库碳循环的复杂性和观测数据的时空异质性，当前对其碳收支水平的估算仍存在很大不确定性^[8-10]。因此，为更准确地评估水库对全球气候变化的影响，需进一步加强对水库温室气体排放时空变化特征的理解，并深入探究环境因素对温室气体排放的影响机制。

水-气界面 CO₂ 扩散通量是准确量化水库、湖泊等内陆水体碳收支水平的主要参数，反映了水体与大气 CO₂ 的源汇关系^[11-13]。当前，大多数研究通过浮箱法、模型估算法和涡度相关法监测或估算水体水-气界面温室气体通量。其中浮箱法、模型估算法由于操作简便，价格低廉，应用最广泛^[14]。但这些方法仍存在一定局限。浮箱法因部署时在水-气界面的扰动效应可能高估气体释放，且受限于每日数次的离散采样频率，难以捕捉暴雨径流、泄洪调度等水文事件驱动的脉冲式排放过程^[15]；模型估算法则依赖湍流参数化假设，在分层稳定水体中易造成系统性偏差^[16]。Soumis 等^[17]的研究发现，浮箱法会高估 CO₂ 日间排放（149%±39%），但严重低估了夜间排放（57%±18%）。Duchemin 等^[18]指出在深水区，模型估算法会高估风速的影响进而高估通量的大小，而在浅水区当风速较低时，又会低估通量的大小。尽管这些方法对水库 CO₂ 碳收支已经取得一定成果，但多数研究主要集中在单一时段 CO₂ 通量的短期监测，缺乏对水库在不同水文时期（如丰水期与枯水期）整体碳收支动态变化的连续长期观测，进而限制了对水库温室气体排放的准确评估。相比之下，涡度相关技术通过直接监测大气湍流脉动和微量气体的浓度变化测算近地面气体排放通量，具有无物理扰动、时间分辨率高、可连续自动运行等显著优势，能够有效克服浮箱法和梯度法的固有缺陷。Baldocchi 等^[19]对 Mendota 湖 CO₂ 通量的监测中发现漂浮箱法与通量梯度法观测结果相似，而涡度相关法观测的通量偏低，且季节模式与前两种方法完全相反，其认为 CO₂ 通量的观测与大气气象条件关系密切，而前二者方法未考虑气象条件带来的大气湍流过程的季节差异。因此，涡度相关法的高频连续长期观测，为捕捉 CO₂ 排放季节变化动态提供了关键手段，逐渐成为内陆水体碳交换研究的重要工具。

此外，环境因素对温室气体排放的影响较为复杂，湖库等内陆水体的碳收支大小不仅取决于水体无机、有机碳输入，还与水生生物光合作用、微生物有机质矿化和降解等碳转化能力有关^[20-23]。近年来，越来越多的研究尝试从气象、水质等角度识别影响 CO₂ 通量变化的主控因子^[23]。例如，Yang 等^[24]通过分析气象、水文因素与湖泊 CO₂ 通量的相关系数发现，控制湖泊 CO₂ 吸收和释放的主要机制是无机过程，以温度驱动的 pH 为主导调节着水-气界面 CO₂ 的交换。Golub 等^[25]基于互信息分析揭示了北半球 13 个水库与湖泊在不同时间尺度上 CO₂ 通量的不同驱动因素。上述研究虽然揭示了某些环境因子与 CO₂ 通量的统计关系，但归因分析主要采用单变量相关性或线性回归模型，无法揭示气象-水文-水质等多因子的交互作用及其对 CO₂ 通量的耦合驱动过程。因此，亟需引入能够处理多因子耦合关系的系统分析方法，以更准确地识别 CO₂ 通量的主导控制路径和作用机制。

丹江口水库是亚洲最大人工湖，位于亚热带季风气候区，受季风气候影响显著，其在丰水期和枯水期之间的水位波动和人文变化存在显著区别。因此，本研究选取丹江口水库为研究对象，利用涡度相关技术监测通量和气象数据，并采用结构方程模型构建多因子路径分析框架，探究丹江口水库丰水期与枯水期内水-气界面 CO_2 通量变化特征及影响因素作用机制，对提高水库碳循环的理解、指导水库生态调度、评估水库碳收支具有重要的科学意义。

1 数据与方法

1.1 研究区域

丹江口水库坝址位于湖北省丹江口市，是一座以防洪、供水为主，兼顾灌溉、发电、航运和生态等功能的综合大(二)型控制性水利枢纽工程。丹江口水库自 2012 年大坝加高扩容后，正常蓄水位抬升至 170 m，水域面积达 1050 km^2 ，最大水深达 80 m，蓄水量达 290.5 亿 m^3 。库区属于典型的北亚热带季风气候，年平均气温 15~16 $^{\circ}\text{C}$ ，多年平均降雨量为 800~1200 mm，降水年内分配不均，全年 70% 以上降水出现在汛期。水库补给主要依赖于流经农业耕地区上游来水及降雨^[26]，在丰水期间大量的上游来水，不仅改变了丹江口水库的水文情势，也带来了大量的营养物质和污染物影响水库水质^[27]；在枯水期水流流速较缓，水位波动较小，总磷、有机污染物等容易被泥沙颗粒吸附沉积，水库污染物浓度较蓄水前有所降低^[28,29]。

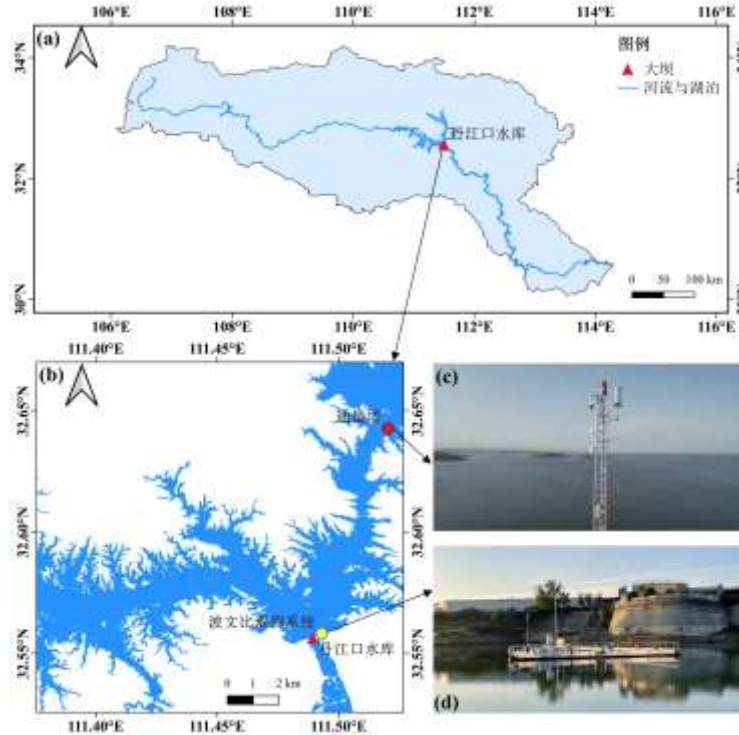


图 1 丹江口水库位置及观测站点位图

Fig. 1 Location of Danjiangkou Reservoir and Observatory Site Map

1.2 涡度相关观测

本研究采用涡度相关系统在丹江口水库展开通量及气象数据的长期定位监测。丹江口水库通量观测系统由通量塔和波文比系统两部分组成。为避免靠近岸边可能受到的陆地的显著影响，通量塔建于丹江库区内的一座小岛上(图 1)，小岛周围为开阔的水域，距最近的水库岸线约为 260 m。通量塔高 18 m，塔基建于小岛最高点，海拔 168 m，比丹江口水库正常蓄水位(170 m)低 2 m，确保通量塔的源区能覆盖更大范围、更典型的水库开阔水域。塔上装有开路红外气体分析仪(IGRASON, Campbell Scientific Inc., 美国，精密有效值: 0.15 $\mu\text{mol}/\text{mol}$)、三维超声风速仪(CSAT3, Campbell Scientific Inc., 美国，测量精度有效值: 1

mm/s)、空气温湿度传感器 (HMP155, Vaisala Inc., 芬兰)、翻斗式雨量筒 (TY2-J-02MM, Techno Solutions, 中国, $E_b \leq 2\%$)、数据采集器 (CR1000X, Campbell Scientific Inc., 美国) 等设备, 监测指标包括降水量、气温、风速、相对湿度等微气象以及生态系统水热通量。波文比系统部署在丹江口大坝东南岸的一座浮闸上, 主要包括四分量辐射传感器 (CNR4, Kipp & Zonen B.V., 荷兰, 灵敏度: $5\sim 20 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$) 和温度链传感器 (CS225, Campbell Scientific Inc., 美国, 测量精度: $\pm 0.2^\circ\text{C}$), 用于测量净辐射和水体各层水温。涡度相关通量观测和微气象观测原始数据采集频率分别为 10 Hz 和 10 min。

1.3 数据处理

本研究收集了 2022 年 4 月 6 日至 2024 年 2 月 28 日的高频原始通量数据、相关气象数据、水库运行数据和水库水质数据, 其中高频原始通量数据及相关气象数据由丹江口水库通量观测系统收集得到, 水库运行数据由长江水利委员会水文局提供, 水库水质数据来自中国环境监测总站发布的丹江口水库坝上中站 ($32^\circ 33' \text{N}$, $111^\circ 29' \text{E}$) 的实时数据。

本研究将收集的 10 Hz 高频原始数据利用 Eddy Pro v7.0.6 软件 (LI-COR Biosciences Inc., USA) 进行处理, 处理过程主要包括峰值检测、原始数据过滤、坐标旋转、空气密度波动修正、数据质量评估等^[30-34]。根据数据质量评估结果将通量分为 3 个质量等级: 0 为数据质量最佳; 1 为数据质量适中, 2 为数据质量较差, 最终获得带有数据质量标志的 30 min 尺度通量数据。并且根据以下标准进行数据质量控制: (1) 剔除通量足迹明显超出水库水面的数据; (2) 剔除不满足 3σ 准则的数据; (3) 剔除降雨前后 1 h 的数据; (4) 剔除夜间湍流不充分 (摩擦风速 $u^* < 0.1 \text{ m/s}$) 时的数据; (5) 剔除数据质量标志为 2 的数据。经数据处理及质量控制后, 30 min 尺度 CO_2 通量、感热通量和潜热通量观察值分别为 14261 个、20598 个和 19039 个, 数据有效覆盖率分别为 43%、61%和 56%。

对于缺失的通量数据和气象数据, 当缺失时长不超过 2.5 h 的时段, 本研究基于缺失时段相邻观测数据采取线性插值法进行插补, 而缺失时长超过 2.5 h 的时段则采用平均日变化法进行插补, 即利用特定时间窗口内的观测数据建立平均日变化曲线插补缺失数据, 本研究选用的时间窗口为 5 天。基于插补后的 30 min 尺度数据计算日尺度数据, 如果 1 d 内 30 min 尺度通量数据和气象数据超过 50%, 则计算该日平均数据, 由此得到 507 天日尺度数据, 涵盖了总观测期 (705 天) 中的 72%, 总体数据质量良好。

1.4 丰水期和枯水期划分

丹江口水库多年平均入库径流量 374 亿 m^3 , 基于 1956 年至 2018 年的天然入库径流观测数据, 通过对径流年内分配进行分析, 发现年内分配非常不均, 汛期 5~10 月来水量占年径流总量的 77.6%^[35]。在观测期间, 丹江口水库的年平均入库流量 $1156 \text{ m}^3/\text{s}$, 其中 4~10 月来水占年径流总量的 76.2%。基于观测期间水库平均入库径流量, 将一年时间划分为丰水期 (4~10 月) 和枯水期 (11 月~翌年 3 月) 对水库水-气界面 CO_2 通量进行分析。

1.5 CO_2 通量特征影响因子解析方法

本研究基于结构方程模型 (Structural Equation Model, SEM) 评估丰水期和枯水期内环境因子对 CO_2 通量的直接和间接影响。结构方程模型是基于变量的协方差矩阵来分析变量之间关系的一种统计方法, 与传统的回归分析相比, 它的优点在于允许变量之间相互作用且能从整体上系统地研究多因素的影响^[36]。在本研究中, 采用 R 语言中的 “plspm” 软件包来完成 SEM 分析, 在日尺度上通过环境因子对 CO_2 通量的直接和间接的标准化路径系数来阐明环境因子的影响程度。模型评价采用拟合优度 (Goodness of Fit) 和决定系数 (R^2), 指标的值范围从 0 到 1, 其中更高的值表示更好的模型拟合。在进行 SEM 建模之前, 基于相关性分析排除共线性强变量以进行观测变量的选取, 并参考 Sun 等^[37]文章对潜变量模型进行构建, 具体划分为 7 个潜变量: (1) 气象, 包括风速 (U)、气温 (T_a)、饱和水汽压差 (VPD)、相对湿度 (RH)、气压 (PA); (2) 能量, 包括净辐射 (R_n)、潜热通量 (LE)、显热通量 (H); (3) 水文, 包括水位 (WL)、入库流量 (Q_{out})、出库流量 (Q_{in}); (4) 水体物理性质, 包括水面温度 (T_w); (5) 水体化学性质, 包括 pH、电导率 (EC)、溶解氧 (DO); (6) 营养物质, 包括总磷 (TP)、总氮 (TN); (7) 浮游植物, 包括叶绿素 a (Chl. a)。各潜变量的组成信度 CR 均大于 0.7, 平均萃取量 AVE 均大于 0.4, 说明潜变量所对应的各观测变量的选择较为合理^[38]。

2 结果与分析

2.1 丰水期与枯水期环境因子变化特征

2022—2024 年丹江口水库部分环境因子的变化曲线如图 2 所示，丰水期与枯水期的环境因子特征如表 1 所示。日均气温、日均水面温度和日均净辐射在全年内呈现单峰变化，丰水期和枯水期表现出显著的季节性变化规律。日均气温和日均水面温度在丰水期内先上升后下降，平均值分别为 24.3℃和 24.4℃，在枯水期内先下降后上升，平均值为 9.9℃和 12.0℃，日均气温在整个研究期间变化范围为 -2.9℃至 34.2℃，而日均水面温度变化范围略小于日均气温，为 3.8℃至 32.4℃。日均净辐射在丰水期和枯水期的变化趋势与日均气温和日均水面温度类似，丰水期和枯水期的平均值分别为 137.3 W/m²和 56.7 W/m²。日均潜热通量在全年为正，并呈现夏秋高春冬低的变化规律，丰水期和枯水期的平均值分别为 63.3 W/m²和 34.6 W/m²。显热通量是水-气界面热传递强度，直接受水气温差的影响，日均显热通量在秋冬季变化范围大但基本为正，在春夏季基本在 0 W/m² 上下小幅度波动。日均风速在观测期间无明显季节变化规律，变化范围为 0.9~5.8 m/s，平均值为 2.3 m/s。日均相对湿度在丰水期较高，均值为 57.2%，枯水期较低，均值为 33.2%。同样，日均饱和水汽压差丰水期明显高于枯水期，均值分别为 1.42 kPa 和 0.82 kPa，而日均气压则相反，枯水期明显高于丰水期。

丹江口水库的入库流量和出库流量集中在丰水期，丰水期内平均入库流量为 1517 m³/s，最大日均入库流量达 14150 m³/s，平均出库流量为 1222 m³/s，最大日均出库流量为 10110 m³/s；枯水期内出入库流量相对稳定，平均入库流量和出库流量为 660 m³/s 和 988 m³/s，最大日均入库和出库流量为 1640 m³/s 和 1651 m³/s。由于丹江口水库为多年调节水库，在观测期间丰水期与枯水期的水位平均值无显著差异，通常在丰水期末末上升至全年最高水位，而后为满足库区居民和南水北调中线工程的供水需求的供水需求，水位开始缓慢下降直至来年汛期，但由于丰水期与枯水期内丹江口水库出入库流量的显著差异，pH、溶解氧、电导率等水体理化性质在不同水文时期存在一定差异。

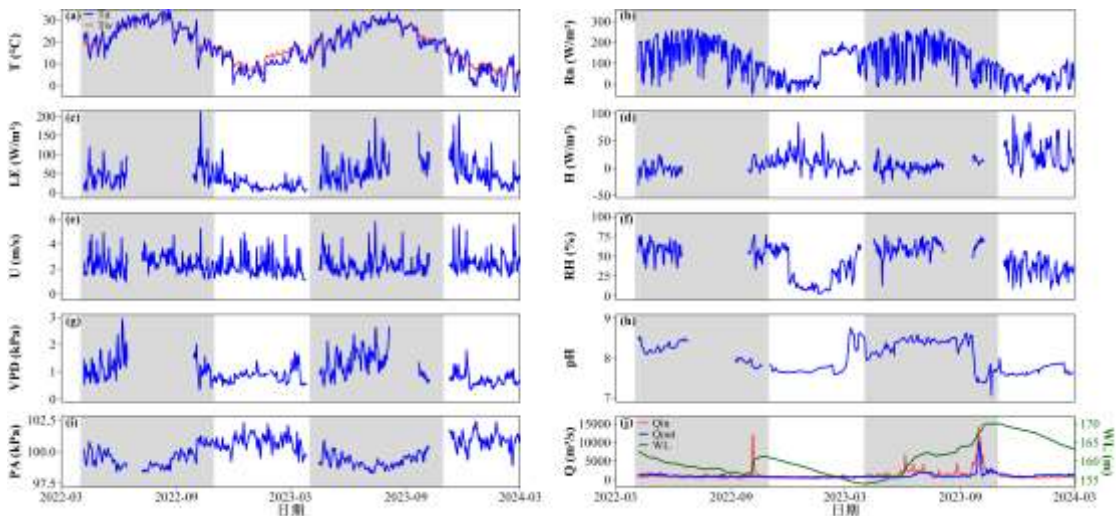


图 2 丹江口水库观测期间部分环境因子日尺度过程（阴影部分为丰水期；非阴影部分为枯水期）

Fig. 2 Daily variation of some environmental factors during the observation period in Danjiangkou Reservoir

(Shaded areas indicate the wet season; unshaded areas indicate the dry season.)

2.2 丰水期与枯水期 CO₂ 通量变化特征

丹江口水库水-气界面 CO₂ 通量值变化范围为 -10.21~5.29 μmol/(m²·s)，均值为 0.12 ± 1.93 μmol/(m²·s)，丹江口水库水体为“碳源”。由图 3 可知，水库水-气界面 CO₂ 通量呈现明显的分期变化规律，从枯水期末起 CO₂ 呈碳收支平衡状态，进入丰水期初期（4 月~5 月），CO₂ 转为排放状态且强度逐渐增强，至汛期（6 月~8 月）达到峰值，而后在丰水期末 CO₂ 排放强度下降，进入枯水期呈 CO₂ 吸收状态，12 月份达到

吸收峰值。经独立样本 t 检验可知，丰水期与枯水期的水—气界面 CO₂ 通量存在显著性差异。观测期间丰水期各月平均 CO₂ 通量均为正值，表现为碳源，丰水期内 CO₂ 平均排放强度为 $0.97 \pm 1.22 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，雨热同期的 6、7、8 月是 CO₂ 碳排放最强的时期，平均每月碳排放强度为 $1.40 \pm 1.24 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。枯水期 11 月至翌年 2 月各月平均 CO₂ 通量为负值，表现为碳汇，CO₂ 平均吸收强度为 $1.13 \pm 2.04 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，12 月是 CO₂ 碳吸收最强的时期，月平均碳吸收强度 $2.50 \pm 2.40 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

表 1 丹江口水库不同时期环境因子平均值

Tab.1 Characteristics of environmental factors in Danjiangkou Reservoir during different periods of time

环境因子	所有观测期	丰水期	枯水期	P
Ta/°C	19.51 ± 8.64	24.31 ± 5.37	9.88 ± 5.26	< 0.001
Tw/°C	20.29 ± 7.42	24.40 ± 4.83	12.04 ± 4.05	< 0.001
Rn/(W/m ²)	110.47 ± 82.80	137.32 ± 76.76	56.70 ± 66.80	< 0.001
LE/(W/m ²)	51.16 ± 36.78	63.30 ± 36.69	34.64 ± 29.84	< 0.001
H/(W/m ²)	9.63 ± 17.03	4.29 ± 10.81	16.86 ± 20.85	< 0.001
U/(m/s)	2.29 ± 0.81	2.29 ± 0.81	2.28 ± 0.81	0.87
RH/%	47.04 ± 18.30	57.19 ± 10.63	33.23 ± 17.50	< 0.001
VPD/kPa	1.16 ± 0.51	1.42 ± 0.50	0.82 ± 0.25	< 0.001
PA/kPa	99.83 ± 0.92	99.30 ± 0.69	100.30 ± 0.83	< 0.001
WL/m	160.72 ± 3.93	160.30 ± 3.30	161.55 ± 4.84	0.08
Q _{in} /(m ³ /s)	1231 ± 1363	1517 ± 1586	660 ± 227	< 0.001
Q _{out} /(m ³ /s)	1144 ± 696	1222 ± 820	988 ± 269	< 0.001
pH	8.09 ± 0.39	8.26 ± 0.34	7.79 ± 0.29	< 0.001
DO/%	9.45 ± 1.88	9.63 ± 1.85	9.14 ± 1.89	0.13
EC(μS/cm)	258.95 ± 24.38	250.03 ± 24.76	274.22 ± 13.94	< 0.001
TP(mg/L)	0.02 ± 0.03	0.01 ± 0.04	0.02 ± 0.01	< 0.001
TN(mg/L)	1.07 ± 0.22	1.00 ± 0.23	1.20 ± 0.12	< 0.001
Chl.a/(mg/L)	0.03 ± 0.04	0.04 ± 0.05	0.02 ± 0.02	< 0.001

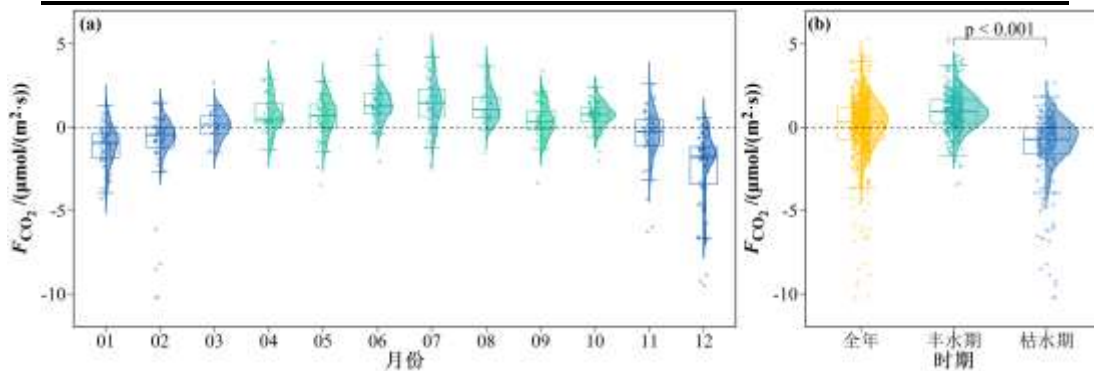


图 3 丹江口水库丰水期和枯水期 CO₂ 通量的变化特征

Fig. 3 Characteristics of changes in CO₂ fluxes during the wet and dry period at Danjiangkou Reservoir

2.3 丰水期和枯水期 CO₂ 通量的影响因子

结果表明，该模型对丰水期和枯水期 CO₂通量的拟合优度 (R²) 分别为 0.52 和 0.54，即分别解释了 48%与 49%的通量变化，说明模型能够较好地反映丹江口水库 CO₂通量的环境驱动机制。如图 4 和图 5 所示，在丰水期，能量因子是 CO₂通量的关键驱动因素，其直接效应系数为-0.37；辐射、显热通量和潜热通量对能量因子的载荷系数分别为 0.66、0.91 和 0.68，其中显热通量的贡献最大。气象因子对 CO₂通量的直

接效应不显著（直接路径系数=0.04），但通过影响水体理化性质与浮游植物产生间接效应（间接效应系数=0.15）。水文因子对 CO_2 通量既存在直接效应（直接路径系数=0.11），也通过影响营养盐和水体化学性质产生间接效应（间接效应系数=0.08）。类似地，水体物理性质除对 CO_2 通量有直接正向效应（直接路径系数=0.20）外，还通过影响浮游植物产生间接效应（间接效应系数=0.08）。营养盐对 CO_2 通量无显著直接效应，而是通过影响浮游植物产生间接效应（间接效应系数=0.12）；浮游植物则对 CO_2 通量表现出显著直接正效应（直接路径系数=0.17），而水体化学性质对 CO_2 通量的直接与间接效应均不显著。从总效应来看，丰水期各环境因子对 CO_2 通量的影响程度依次为：能量 > 水体物理性质 > 水文 > 浮游植物 > 气象 > 营养盐 > 水体化学性质，其中仅能量因子对 CO_2 通量具有显著负效应，而水体物理性质、水文、浮游植物和气象因子均表现为显著正效应。

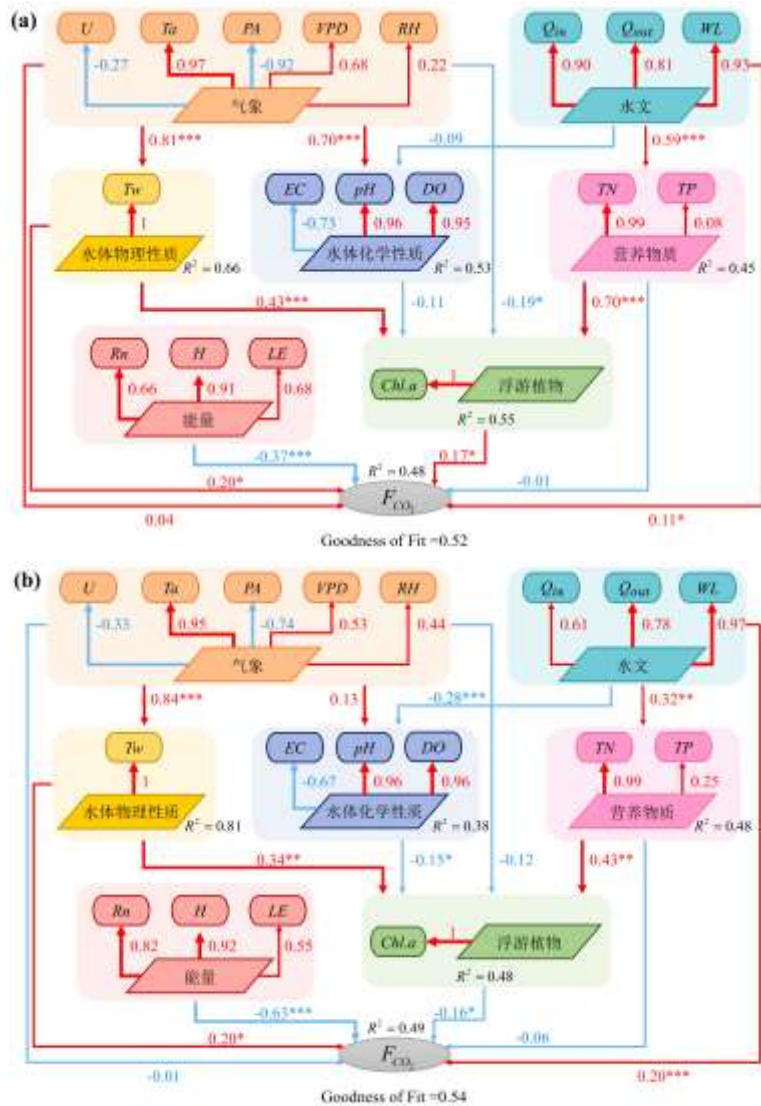


图 4 丹江口水库 (a) 丰水期与 (b) 枯水期水-气界面 CO_2 通量调控机制的 SEM 路径图

Fig. 4 SEM path diagrams of environmental regulation mechanisms for CO_2 fluxes in Danjiangkou Reservoir during (a) the wet period and (b) dry period

红色箭头为正向作用，蓝色箭头表示负向作用，箭头数值表示标准化路径系数；***、**、*代表 $p < 0.001$ 、 $p < 0.01$ 、 $p < 0.05$

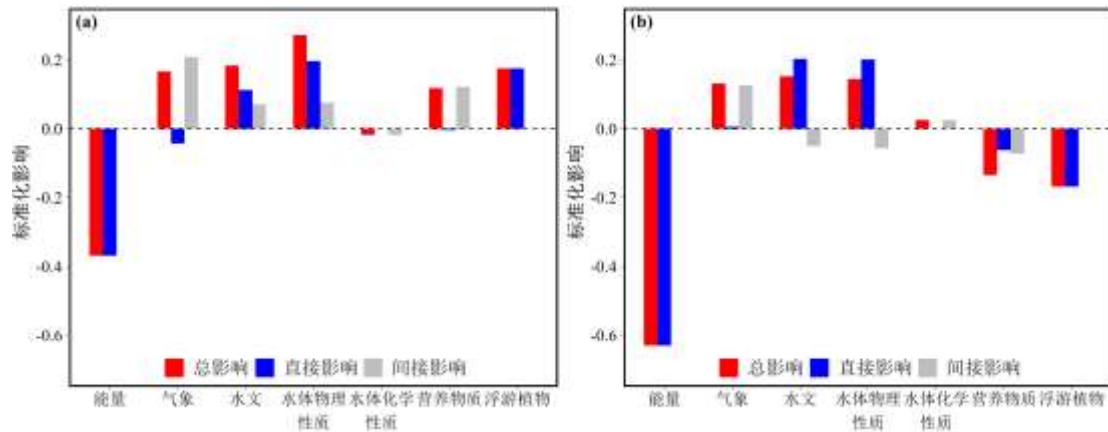


图 5 丹江口水库 (a) 丰水期与 (b) 枯水期环境因子对 CO₂ 通量的直接、间接和总影响

Fig. 5 Direct, indirect, and total controls of environmental factors on CO₂ flux in Danjiangkou Reservoir during (a) the wet period and (b) dry period

在枯水期, 能量因子对 CO₂ 通量的负向直接影响进一步加强, 直接影响系数为 0.63, 为所有路径中最大值, 说明能量过程 (以显热通量为主) 对 CO₂ 通量的抑制效应在枯水期进一步增强。气象因子对 CO₂ 通量的直接影响和间接影响相比于丰水期进一步减弱, 直接影响系数和间接影响系数分别为 0.01 和 0.13。水文因子通过水位变化对 CO₂ 通量的直接影响进一步增强, 直接影响系数为 0.20, 但其通过营养物质等路径的间接影响由正转负, 间接影响系数变为-0.05。水体物理性质对 CO₂ 通量也表现出类似特征, 直接影响系数仍为 0.20, 而间接影响系数变为-0.06。枯水期营养物质和浮游植物对 CO₂ 通量的影响与丰水期不同, 浮游植物的直接影响由正向变为负向, 进而营养物质影响浮游植物间接影响 CO₂ 通量的影响系数也转负, 二者枯水期对 CO₂ 通量的总影响系数分别为-0.14 和-0.17。从总效应来看, 枯水期各环境因子对 CO₂ 通量的总影响顺序为能量>水文>浮游植物>水体物理性质>营养物质>气象>水体化学性质。其中, 能量、营养物质和浮游植物对 CO₂ 通量的总影响为显著的负向作用, 而水体物理性质、水文和气象对 CO₂ 通量的总影响为显著的正向作用。

3 讨论

3.1 丰水期与枯水期 CO₂ 通量驱动机制分析

本研究聚焦于丹江口水库丰水期与枯水期的 CO₂ 通量变化及其影响因素, 结果显示两时期通量差异显著 ($p < 0.001$), 表现为丰水期以碳排放为主 (碳源), 而枯水期则转为显著的碳吸收 (碳汇)。这一源汇转变过程不仅与水文条件密切相关, 也受能量交换、气象条件及水体理化性质等多因子的共同调控^[39-42]。丰水期作为典型的雨热同期时期, 丹江口水库受强降水和高温共同影响, 大量入库径流带来显著的外源碳和营养负荷, 水体富营养化程度提高, 还加剧了底层扰动和沉积物再悬浮, 从而促进沉积层积累的 CO₂ 释放^[43,44]。此外, 高气温和强太阳辐射增强了水-气界面的热交换过程, 加速了 CO₂ 扩散速率。尽管水体中浮游植物在营养盐输入下快速生长与繁殖, 初级生产力有所增强, 但由于微生物呼吸作用增强、水动力扰动强烈、外源碳输入量大, 藻类吸收的 CO₂ 难以抵消整体排放通量, 导致系统在丰水期呈现显著的“碳源”特征^[45]。相较之下, 枯水期气温降低, 流量减弱, 水库转入蓄水阶段, 降水量和径流减少显著降低了外源碳输入和水体扰动程度, 底泥中 CO₂ 释放受限。同时, 低温抑制了微生物呼吸及水-气界面的分子扩散速率, 有利于水体保持较高的溶解 CO₂ 浓度, 降低了 CO₂ 的内源产生强度。此外, 从物理机制上看, 冬季气温显著低于水温, 形成持续的温差结构, 增强了水-气界面处的能量梯度与 CO₂ 分压差, 提升了大气 CO₂ 向水体扩散的驱动力。加上已有研究表明, 丹江口水库以甲藻和硅藻为主要浮游植物群落, 二者在枯水期仍能维持一定初级生产力, 进一步吸收水体中溶解 CO₂。上述生物地球化学过程共同作用, 最终促使水体在枯水期表现出大气 CO₂ 的持续净吸收 (碳汇) 特征。

3.2 丹江口水库水-气界面 CO₂ 源汇收支与其他研究的比较

丹江口水库全年平均 CO₂ 排放强度为 $10.4 \pm 166.8 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ，观测期间变化范围为 $-882.1 \sim 457.1 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。与国内外典型湖库的水-气界面 CO₂ 通量水平相比（表 2），丹江口水库的 CO₂ 年均排放强度显著低于同为涡度相关法观测的小型重度富营养化水库——如美国弗吉尼亚州的 Falling Creek 水库 ($160.70 \pm 536.54 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$) [46]，而与美国密西西比州的 Ross Barnett 水库 ($26.78 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$) [47] 及德国的 Rappbode 水库 ($31.10 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$) [48] 等中至轻度富营养水体排放水平相近。涡度相关法作为连续观测技术，具有较高的精度与可比性，上述结果在技术一致前提下表明，丹江口水库整体 CO₂ 通量处于中等偏低水平。漂浮箱法或模型估算法在一定程度上可能高估实际排放水平，前者由于箱体扰动及水气界面封闭条件，可能高估 CO₂ 通量 15%~30%；后者则常忽略水体垂向混合与生物过程的短时变化，导致估值偏高。与基于漂浮箱法或模型估算法的其他研究观测结果相比，即使考虑观测技术带来的差异，丹江口水库 CO₂ 年均排放强度仍属于偏低水平。进一步对比丹江口水库与其他湖库在丰水期与枯水期的 CO₂ 通量特征，可以发现其表现出显著的源汇转变趋势。丹江口水库丰水期 CO₂ 平均通量为 $121.0 \pm 107.1 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ，表现为碳源；而在枯水期则转为碳汇，平均通量为 $-97.6 \pm 176.3 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。类似的转变也出现在其他典型湖库中。例如，巢湖的 CO₂ 通量由丰水期的 $5.0 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 下降至枯水期的 $-2.2 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ [49]；洪泽湖由丰水期的 $106.8 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 下降至平水期的 $5.1 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和枯水期的 $18.7 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ [41]；鄱阳湖则由 $74.2 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 降至 $-65.6 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ [50]，转变幅度与丹江口水库相近。部分湖库同样存在季节转变，但趋势有所不同，如龙滩水库在枯水期 CO₂ 排放反而增强，由丰水期的 $14.94 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 上升至枯水期的 $49.07 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ [51]。

表 2 国内外内陆水体水-气界面 CO₂ 通量比较

Tab.2 Comparison of CO₂ fluxes at the water-gas interface in inland waters from previously publications in the world and current study

内陆水体	气候带	调查时期	CO ₂ 通量/ mmol/ (m ² ·d)	观测方法	营养状态	文献
Falling Creek Reservoir	温带	全年	160.70 ± 536.54	涡度相关法	重度富营养 ^[46]	[46]
Ross Barnett Reservoir	温带	全年	26.78	涡度相关法	中营养到轻度富营养 ^[47]	[47]
Rappbode Reservoir	亚热带	全年	31.10	涡度相关法	贫营养 ^[48]	[48]
丹江口水库	亚热带	丰水期	121.0 ± 107.1	涡度相关法	中度富营养 ^[54]	本研究
		枯水期	-97.6 ± 176.3		中营养 ^[54]	本研究
汉丰湖	亚热带	全年	35.8 ± 45.2	漂浮箱法	中营养到轻度富营养 ^[55]	[56]
		丰水期	74.2 ± 27.0		中度富营养 ^[57]	
鄱阳湖	亚热带	平水期	11.2 ± 42.7	涡度相关法	中度富营养 ^[57]	[50]
		枯水期	-65.6 ± 15.3		轻度富营养 ^[57]	
		丰水期	5.0 ± 6.3		中度富营养 ^[58]	
巢湖	亚热带	平水期	5.0 ± 3.6	模型估算法	中度富营养 ^[58]	[49]
		枯水期	-2.2 ± 0.5		轻度富营养 ^[58]	
		丰水期	106.8 ± 73.4		中度富营养 ^[59]	
洪泽湖	亚热带	平水期	5.1 ± 15.5	模型估算法	轻度富营养 ^[59]	[41]
		枯水期	18.7 ± 13.4		轻度富营养 ^[59]	
		丰水期	14.94		中营养 ^[60]	
龙滩水库	亚热带	枯水期	49.07	模型估算法	中营养 ^[60]	[51]

已有研究指出, 水体营养状态是影响湖库 CO₂ 通量的关键因子^[52], 适度增加富营养化会导致大气中温室气体效应增加 5%~40%^[53]。一方面, 富营养化带来的高营养负荷可通过增强沉积物矿化和微生物异养呼吸显著提高 CO₂ 排放; 另一方面, 富营养化引发的初级生产力升高可能短期内降低 CO₂ 扩散通量。丹江口水库整体处于中营养至中度富营养水平, 通量的排放水平低于重度富营养湖库(异养呼吸过强)和寡营养湖库(初级生产力受限), 而与水体营养状态相似的湖库排放水平相近。本研究发现, 丰、枯水期湖库 CO₂ 通量差异与水体营养状态的季节变动密切相关, 而这种营养状态的变化主要受到水文条件的驱动。丹江口水库、鄱阳湖、巢湖等存在显著的源汇转变趋势的湖库均具有共同特征: 在丰水期外源水输入显著增加, 营养物质与有机碳通量提升, 导致水体富营养化水平高于枯水期。这一现象说明, 丰水期水文过程所引发的营养负荷增强、浮游植物快速繁殖及微生物异养活动加剧, 是驱动湖库系统在丰水期表现为 CO₂ 碳源的关键; 而枯水期水体相对稳定、扰动减弱、碳同化增强, 则促使其向碳汇转化。上述过程表明, 水文条件通过调控水体营养水平, 间接驱动湖库 CO₂ 源汇状态转变, 是湖库碳循环季节变化的关键机制。

4 结论

(1) 丹江口水库水-气界面 CO₂ 通量在不同水文条件下呈现显著的源汇转换特征。在丰水期为碳源, CO₂ 平均排放强度为 $0.97 \pm 1.22 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 枯水期为碳汇, CO₂ 平均吸收强度为 $1.13 \pm 2.04 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

(2) CO₂ 通量主导因子在丰水期与枯水期存在显著差异。丰水期 CO₂ 排放主要受能量、水文条件和水体物理性质等因素共同直接驱动, 而枯水期 CO₂ 吸收主要受能量因子主导, 浮游植物固碳为辅。

(3) 与其它湖库 CO₂ 排放通量对比和归纳发现, 湖库 CO₂ 通量收支水平在不同时期具有显著的季节波动, 这种季节性的 CO₂ 波动与水文条件变化密切相关, 特别是其通过影响水体营养状态, 进而间接调节初级生产和碳循环过程。

5 参考文献

- [1] Maavara T, Chen Q, Van Meter K *et al.* River dam impacts on biogeochemical cycling. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, **1**(2): 103-116. DOI: 10.1038/s43017-019-0019-0.
- [2] Liu J, Xiao SB, Wang CC *et al.* Spatial and temporal variability of dissolved methane concentrations and diffusive emissions in the three gorges reservoir. *Water Research*, 2021, **207**: 117788. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117788.
- [3] Liu J, Xue F, Guo XJ *et al.* Methane dynamics altered by reservoir operations in a typical tributary of the three gorges reservoir. *Water Research*, 2024, **263**: 122163. DOI: 10.1016/j.watres.2024.122163.
- [4] Cole JJ, Prairie YT, Caraco NF *et al.* Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems*, 2007, **10**(1): 172-185. DOI: 10.1007/s10021-006-9013-8.
- [5] Bastviken D, Tranvik LJ, Downing JA *et al.* Freshwater Methane Emissions Offset the Continental Carbon Sink. *Science*, 2011, **331**(6013): 50-50. DOI: 10.1126/science.1196808.
- [6] Keller PS, Marcé R, Obrador B *et al.* Global carbon budget of reservoirs is overturned by the quantification of drawdown areas. *Nature Geoscience*, 2021, **14**(6): 402-408. DOI: 10.1038/s41561-021-00734-z.
- [7] St Louis VL, Kelly CA, Duchemin É *et al.* Reservoir Surfaces as Sources of Greenhouse Gases to the Atmosphere: A Global Estimate. *BioScience*, 2000, **50**(9): 766-775. DOI: 10.1641/0006-3568(2000)050[0766:RSASOG]2.0.CO;2.
- [8] 曾媛媛. 黄河上游深大水库 CO₂ 气体溶存特征及水-气界面交换通量研究[学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2025.
- [9] Chen MH, Wu Y, Lu MS *et al.* Spatiotemporal pattern of riverine pCO₂ and its controlling factors in the Hanjiang River Basin. *J. Lake Sci*, 2026, **38**(1):000-000. DOI:10.18307/2026.0123. [陈梦晗, 吴玥, 卢名燊等. 汉江流域河流 pCO₂ 时空格局及其控制因子. 湖泊科学, 2026, **38**(1):000-000.]
- [10] Chen M, Cheng L, Chang L *et al.* Identifying the determinants of the spatial patterns and temporal fluctuation characteristics of riverine pCO₂ of the largest subtropical river using machine learning methods. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2025, **58**: 102284. DOI: 10.1016/j.ejrh.2025.102284.
- [11] Yao X, Li Z, Guo JS *et al.* Comparison between closed static chamber method and thin boundary layer method on monitoring air-water CO₂ diffusion flux. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(2): 289-296. DOI: 10.18307/2015.0213. [姚晓, 李哲, 郭劲松等.]

- 水-气界面 CO₂ 通量监测的静态箱法与薄边界层模型估算法比较. *湖泊科学*, 2015, **27**(2): 289-296.]
- [12] Nordbo A, Launiainen S, Mammarella I *et al.* Long-term energy flux measurements and energy balance over a small boreal lake using eddy covariance technique. *Journal of Geophysical Research*, 2011, **116**(D2): D02119. DOI: 10.1029/2010JD014542.
- [13] Li L, Pu JB, Li JH *et al.* Variations of CO₂ exchange fluxes across water-air interface and environmental meaning in a surface stream in subtropical Karst area, SW China. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2487-2495. DOI: 10.13227/j.hj.kx.2016.07.010. [李丽, 蒲俊兵, 李建鸿等. 亚热带典型岩溶溪流水气界面 CO₂ 交换通量变化过程及其环境影响. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2487-2495.]
- [14] Li H, Wang XF, Yuan XZ *et al.* Review on monitoring methods for greenhouse gases fluxes in freshwater ecosystems. *J. Lake Sci*, 2023, **35**(4): 1153-1175. DOI:10.18307/2023.0402. [李航, 王晓锋, 袁兴中等. 淡水生态系统温室气体通量监测方法综述. *湖泊科学*, 2023, **35**(4): 1153-1175.]
- [15] Xiao SB, Wang CC, Wilkinson RJ *et al.* Theoretical model for diffusive greenhouse gas fluxes estimation across water-air interfaces measured with the static floating chamber method. *Atmospheric Environment*, 2016, **137**: 45-52. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.04.036.
- [16] Dugan HA, Woolway RI, Santoso AB *et al.* Consequences of gas flux model choice on the interpretation of metabolic balance across 15 lakes. *Inland Waters*, 2016, **6**(4): 581-592. DOI: 10.1080/iw-6.4.836.
- [17] Soumis N, Canuel R, Lucotte M. Evaluation of two current approaches for the measurement of carbon dioxide diffusive fluxes from lentic ecosystems. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(8): 2964-2969. DOI: 10.1021/es702361s.
- [18] Duchemin É, Lucotte M, Canuel R. Comparison of static chamber and thin boundary layer equation methods for measuring greenhouse gas emissions from large water bodies. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(2): 350-357. DOI: 10.1021/es9800840.
- [19] Baldocchi AK, Reed DE, Loken LC *et al.* Comparing spatial and temporal variation of lake-atmosphere carbon dioxide fluxes using multiple methods. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020, **125**(12). DOI: 10.1029/2019jg005623.
- [20] Yang P, Tong C. Emission paths and measurement methods for greenhouse gas fluxes from freshwater ecosystems: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(20): 6868-6880. DOI: 10.5846/stxb201406231298. [杨平, 仝川. 淡水水生生态系统温室气体排放的主要途径及影响因素研究进展. *生态学报*, 2015, **35**(20): 6868-6880.]
- [21] Chen ZH, Huang P, Zhang Z. Interaction between carbon dioxide emissions and eutrophication in a drinking water reservoir: A three-dimensional ecological modeling approach. *Science of The Total Environment*, 2019, **663**: 369-379. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.336.
- [22] Lapierre JF, Guillemette F, Berggren M *et al.* Increases in terrestrially derived carbon stimulate organic carbon processing and CO₂ emissions in boreal aquatic ecosystems. *Nature Communications*, 2013, **4**(1): 2972. DOI: 10.1038/ncomms3972.
- [23] Su H, Cheng L, Wu Y *et al.* Extreme storm events shift DOC export from transport-limited to source-limited in a typical flash flood catchment. *Journal of Hydrology*, 2023, **620**: 129377. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129377.
- [24] Yang P, Wang N, Zhao L *et al.* Variation characteristics and influencing mechanism of CO₂ flux from lakes in the Badain Jaran Desert: A case study of Yindeer Lake. *Ecological Indicators*, 2021, **127**: 107731. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107731.
- [25] 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. DOI: 10.1088/1748-9326/acb834.
- [26] Xu Z, Li Y, Cai X *et al.* Impact of reservoir operation policies on spatiotemporal dynamics of sediment methane production and release in a large reservoir. *Water Resources Research*, 2023, **59**(12): e2023WR035072. DOI: 10.1029/2023WR035072.
- [27] Yu QH, Lin L, Jin HY *et al.* Features of spatial and temporal distribution of nitrogen and phosphorus in the Danjiangkou Reservoir and safeguarding measures for water quality. *China Water Resources*, 2024, **No.998**(20): 59-66. [余启辉, 林莉, 金海洋, 等. 丹江口水库氮磷时空分布特征及水质安全保障对策. *中国水利*, 2024, **No.998**(20): 59-66.]
- [28] Yu Q, Shi CY, Zhuang NN *et al.* Analysis of impact of sub-watersheds landscape patterns on trophic state of Danjiangkou Reservoir. *Research of Environmental Sciences*, 2024, **37**(8): 1714-1724. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2024.06.04. [余祺, 时晨臻, 庄娜娜, 等. 子流域景观格局对丹江口水库营养状态的影响分析. *环境科学研究*, 2024, **37**(8): 1714-1724.]

- [29] 王新宇. 丹江口水库(丹库区)水质和浮游植物的时空动态及相互关系[学位论文]. 上海: 上海海洋大学, 2024.
- [30] Foken T, Gööckede M, Mauder M *et al.* Post-field data quality control. in *Handbook of micrometeorology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004: 181-208.
- [31] Vickers D, Mahrt L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1997, **14**(3): 512-526. DOI: 10.1175/1520-0426(1997)014<0512:QCAFSP>2.0.CO;2.
- [32] Wilczak JM, Oncley SP, Stage SA. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, **99**(1): 127-150. DOI: 10.1023/A:1018966204465.
- [33] Leuning R, Cleugh HA, Zegelin SJ *et al.* Carbon and water fluxes over a temperate eucalyptus forest and a tropical wet/dry savanna in Australia: measurements and comparison with MODIS remote sensing estimates. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, **129**(3-4): 151-173. DOI: 10.1016/j.agrformet.2004.12.004.
- [34] Webb EK, Pearman GI, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, **106**(447): 85-100. DOI: 10.1002/qj.49710644707.
- [35] Dong FQ, Mu QQ, Wang W *et al.* Preliminary study on impoundment in advance at end of flood season for Danjiangkou Reservoir. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2023, **44**(9): 79-85. DOI: 10.15974/j.cnki.slsdkb.2023.09.013. [董付强, 穆青青, 王伟等. 丹江口水利枢纽汛末提前蓄水方案研究. 水利水电快报, 2023, **44**(9): 79-85.]
- [36] Li WX, Jiang ML, Xu LG *et al.* Spatial and temporal characteristics of phytoplankton in Lake Poyang and its response to extreme flood and drying events. *J. Lake Sci*, 2024, **36**(4): 1001-1013. DOI: 10.18307/2024.0411. [李文轩, 蒋名亮, 徐力刚等. 鄱阳湖浮游植物时空变化特征及其对极端洪枯事件的响应. 湖泊科学, 2024, **36**(4): 1001-1013.]
- [37] Sun K, Jia J, Wang S *et al.* Real-time and dynamic estimation of CO₂ emissions from China's lakes and reservoirs. *The Innovation Geoscience*, 2023, **1**(3): 100031. DOI: 10.59717/j.xinn-geo.2023.100031.
- [38] Henseler J, Ringle CM, Sarstedt M. A new criterion for assessing discriminant validity in variance-based structural equation modeling. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 2015, **43**(1): 115-135. DOI: 10.1007/s11747-014-0403-8.
- [39] Ren YJ, Deng ZM, Xie YH *et al.* Estimation of methane diffusion and ebullition flux and water environmental controls during flooding period in Lake Dongting wetlands. *J. Lake Sci*, 2019, **31**(4): 1075-1087. DOI: 10.18307/2019.0418. [任艺洁, 邓正苗, 谢永宏等. 洞庭湖湿地洪水期甲烷扩散和气泡排放通量估算及水环境影响分析. 湖泊科学, 2019, **31**(4): 1075-1087.]
- [40] Chen M, Xu HT, Zheng XW *et al.* Impacts of summer rainfall events on the dynamics of greenhouse gas fluxes revealed by high-frequency observation from Guanzhuang Reservoir, Hubei Province. *J. Lake Sci*, 2021, **33**(6): 1857-1870. DOI: 10.18307/2021.0619. [陈敏, 许浩霆, 郑祥旺等. 夏季降雨事件对水库温室气体通量变化的影响: 来自湖北官庄水库的高频观测. 湖泊科学, 2021, **33**(6): 1857-1870.]
- [41] Zhu JY, Peng K, Li YY *et al.* Characteristics and influence factors of carbon dioxide efflux from Lake Hongze under different hydrological scenarios. *J. Lake Sci*, 2022, **34**(4): 1347-1358. DOI: 10.18307/2022.0425. [朱俊羽, 彭凯, 李宇阳等. 不同水文情景下洪泽湖二氧化碳排放通量特征及影响因素. 湖泊科学, 2022, **34**(4): 1347-1358.]
- [42] Jin Y, Chen XQ, Liao MM *et al.* Spatial variations of dissolved greenhouse gases and emission fluxes in a large reservoir during the stratification and mixing periods. *J. Lake Sci*, 2023, **35**(3): 1082-1096. DOI: 10.18307/2023.0326. [金业, 陈小强, 廖苗苗等. 大型水库分层期和混合期溶存温室气体空间变化及排放通量. 湖泊科学, 2023, **35**(3): 1082-1096.]
- [43] Gao Y, Jia J, Lu Y *et al.* Determining dominating control mechanisms of inland water carbon cycling processes and associated gross primary productivity on regional and global scales. *Earth-Science Reviews*, 2021, **213**: 103497. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103497.
- [44] Wang S, Gao Y, Jia JJ *et al.* Determining whether hydrological processes drive carbon source and sink conversion shifts in a large floodplain-lake system in China. *Water Research*, 2022, **224**: 119105. DOI: 10.1016/j.watres.2022.119105.
- [45] Li SY, Zhang QF. Partial pressure of CO₂ and CO₂ emission in a monsoon-driven hydroelectric reservoir (Danjiangkou Reservoir), China. *Ecological Engineering*, 2014, **71**: 401-414. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.07.014.
- [46] Hounshell AG, D'Acunha BM, Breef-Pilz A *et al.* Eddy covariance data reveal that a small freshwater reservoir emits a substantial amount of carbon dioxide and methane. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2023, **128**(3): e2022JG007091. DOI:

10.1029/2022JG007091.

- [47] Liu HP, Zhang QY, Katul GG *et al.* Large CO₂ effluxes at night and during synoptic weather events significantly contribute to CO₂ emissions from a reservoir. *Environmental Research Letters*, 2016, **11**(6): 064001. DOI: 10.1088/1748-9326/11/6/064001.
- [48] Spank U, Hehn M, Keller P *et al.* A Season of Eddy-Covariance Fluxes Above an Extensive Water Body Based on Observations from a Floating Platform. *Boundary-Layer Meteorology*, 2020, **174**(3): 433-464. DOI: 10.1007/s10546-019-00490-z.
- [49] Li YY, Zhu JY, Yu XQ *et al.* Emission of carbon dioxide from Lake Chaohu and the potential influencing factors. *China Environmental Science*, 2022, **42**(1): 425-433. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2022.0007. [李宇阳, 朱俊羽, 俞晓琴, 等. 巢湖二氧化碳排放特征及其潜在影响因素. 中国环境科学, 2022, **42**(1): 425-433.] [50] Zhao X, Fan X, Griffis T J, et al. Three Gorges Dam Operations Affect the Carbon Dioxide Budget of a Large Downstream Connected Lake[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, **50**(12): e2022GL102697. DOI: 10.1029/2022GL102697.
- [51] Zhao ZQ, Cao YP, Jiao SL *et al.* Partial pressure of carbon dioxide and hydrochemical characteristics of surface water in the Longtan Reservoir. *Wetland Science*, 2018, **16**(6): 793-800. DOI: 10.13248/j.cnki.wetlandsci.2018.06.015. [赵宗权, 曹玉平, 焦树林等. 龙滩水库表层水体 CO₂ 分压和水化学特征. 湿地科学, 2018, **16**(6): 793-800.]
- [52] Xiao QT, Xu XF, Duan HT *et al.* Eutrophic lake taihu as a significant CO₂ source during 2000-2015. *Water Research*, 2020, **170**: 115331. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115331.
- [53] DelSontro T, Beaulieu JJ, Downing JA. Greenhouse gas emissions from lakes and impoundments: upscaling in the face of global change. *Limnology and Oceanography Letters*, 2018, **3**(3): 64-75. DOI: 10.1002/lol2.10073.
- [54] 李佳昊, 张鹏. 2021—2023 年丹江口水库水质变化趋势研究. 绿色科技, 2025, **27**(10): 126-133.
- [55] Zhang ZW, Hu L, Zou X *et al.* Eutrophication Assessment and Analysis of Nutrient Loading in Hanfeng Lake. *Journal of Hydroecology*, 2014, **35**(5): 22-27. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2014.05.008. [郑志伟, 胡莲, 邹曦等. 汉丰湖富营养化综合评价与水环境容量分析. 水生态学杂志, 2014, **35**(5): 22-27.]
- [56] Jian C, Yang Y, Liu TT *et al.* Spatial-temporal dynamics and influencing factors of CO₂ and CH₄ fluxes in a double-water-level regulated Hanfeng Lake in the Three Gorges Reservoir. *China Environmental Science*, 2024, **44**(12): 7046-7062. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20240903.004. [蹇陈, 杨艺, 刘婷婷等. 三峡库区汉丰湖水体 CO₂ 及 CH₄ 排放特征及影响因素. 中国环境科学, 2024, **44**(12): 7046-7062.]
- [57] Wen CY, Liu JT, Hu F *et al.* Water Quality Change Characteristics and Eutrophication Assessment of Poyang Lake. *China Rural Water and Hydropower*, 2020, **0**(11): 83-88. [温春云, 刘聚涛, 胡芳等. 鄱阳湖水质变化特征及水体富营养化评价. 中国农村水利水电, 2020, **0**(11): 83-88.]
- [58] 张辉, 杨雄. 综合营养状态指数法在巢湖水体富营养化评价中的应用. 安徽农学通报, 2018, **24**(9): 84-87.
- [59] 朱正伟. 洪泽湖富营养化现状及防治对策. 江西化工, 2014(3): 104-106.
- [60] 李东霖, 韦海玲. 河池市龙滩水库水质及富营养化分析. 广西水利水电, 2021, (6): 10-13, 26.