

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^{*}

朱俊羽^{1,2}, 彭凯¹, 李宇阳¹, 刘朝荣¹, 周蕾¹, 周永强^{1**}, 丁艳青²

(1:中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(2:中国矿业大学资源与地球科学学院, 徐州 221116)

摘要: 内陆水域二氧化碳(CO_2)排放是全球碳平衡的重要组成部分, 全球 CO_2 排放通量估算通常有很大不确定性, 一方面源于 CO_2 排放数据观测的时空离散性, 另一方面也是缺少水文情景与 CO_2 排放通量关联性的研究。本文观测了2018年洪泽湖不同水文情景表层水体 CO_2 排放通量特征, 并探讨其影响因素。结果表明, 洪泽湖 CO_2 排放通量为丰水期 ($(106.9 \pm 73.4) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$) > 枯水期 ($(18.7 \pm 13.6) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$) > 平水期 ($(5.2 \pm 15.5) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$), 且碳通量由丰 ($310.2 \sim 32.0 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)、枯 ($50.8 \sim 2.2 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)、平 ($-17.3 \sim -39.8 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$) 3 种水文情景的交替表现出湖泊碳源到弱碳汇的转变, 空间上 CO_2 排放通量总体呈现北部成子湖区低、南部过水湖区高的分布趋势。洪泽湖 CO_2 排放对水文情景响应敏感, 特别是上游淮河流域来水量的改变, 是主导该湖 CO_2 排放时空分异的重要因子。丰水期湖泊接纳了淮河更多有机和无机碳的输入, 外源碳基质的降解和矿化显著促进了水体 CO_2 的生产与排放, 同时氮、磷等营养物质的大量输入, 加剧了水体营养化程度, 进一步提高 CO_2 排放量, 间接反映出人类活动对洪泽湖 CO_2 变化的深刻影响。平、枯水期随着上游淮河来水量的减少, 驱动水体 CO_2 排放的因素逐渐由外源输入转变为水体有机质的呼吸降解。此外, 上游河口区 DOM 中陆源类腐殖质的累积与矿化能够促进 CO_2 的排放, 而内源有机质组分似乎并没有直接参与 CO_2 的排放过程。研究结果揭示了水文情景交替对湖库 CO_2 排放的重要影响, 同时有必要进行高频观测以进一步明晰湖泊的碳通量变化及其控制因素。

关键词: 洪泽湖; 二氧化碳通量; 水文期; 淮河; 影响因素

Characteristics and influence factors of carbon dioxide efflux from Lake Hongze under different hydrological scenarios^{*}

Zhu Junyu^{1,2}, Peng Kai¹, Li Yuyang¹, Liu Chaorong¹, Zhou Lei¹, Zhou Yongqiang^{1**} & Ding Yanqing²

(1: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

(2: School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, P.R.China)

Abstract: CO_2 emission from inland waters is an important component in assessing the global carbon budgets, while the large uncertainty during the budget estimation not only results from incomplete spatial coverage of sampling sites, but also from the lack of studies on the linkages between hydrological heterogeneity of inland waters and CO_2 emission. Here we examined the CO_2 efflux from Lake Hongze under different hydrological scenarios in 2018, to investigate the characteristics and influencing factors of CO_2 . Our results indicated that the CO_2 fluxes in the wet season ($(106.9 \pm 73.4) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$) was significantly higher than in the dry season ($(18.7 \pm 13.6) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$), and further higher in the wet-to-dry transition season ($(5.2 \pm 15.5) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$). The alternation of CO_2 efflux from the wet season to the dry, and further to the wet-to-dry transition season ($310.2 \sim 32.0 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $50.8 \sim 2.2 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, and $-17.3 \sim -39.8 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, separately) suggested a shift from the net carbon source to a weak

* 2021-08-05 收稿; 2021-11-06 收修改稿。

国家自然科学基金项目(41930760, 41807362, 41977322)、江苏省自然科学基金项目(BK20181104)、中国科学院青年创新促进会会员项目(2021312)和中国科学院南京地理与湖泊研究所青年科学家小组项目(E1SL002)联合资助。

** 通信作者; E-mail: yqzhou@niglas.ac.cn.

sink of CO₂ emission from Lake Hongze. The CO₂ efflux was generally low in the northern open water and high in the southern waterway region. The emission of CO₂ from Lake Hongze was highly sensitive to the hydrological scenarios, especially the inflow runoff from the upstream Huaihe River to the lake. In the rainy wet season, the lake received large quantities of organic and inorganic carbon inputs from the Huaihe River. The labile inorganic carbon could be easily transformed into CO₂, and the degradation and mineralization of terrestrial organic carbon could significantly promote the production and emission of CO₂. The input of nitrogen, phosphorus and other nutrients enhanced the eutrophication and further increased the emission of CO₂ from Lake Hongze, especially the upstream inflowing lake regions. Relatively low inflow runoff during the dry and the wet-to-dry transition seasons resulted in a prolonged water residence time and allochthonous input to autochthonous degradation of organic matter potentially favored the production of CO₂ emission in the water. We further found the accumulation and degradation of terrestrial humic-like could promote CO₂ emission, while autochthonous components of dissolved organic matter (DOM) were linked weakly to the process and emission of CO₂. Our results demonstrate the importance of hydrological scenarios fueling the emission of CO₂ from freshwater lakes, and it is necessary to conduct high-frequency observations to further clarify the efflux of CO₂ from lakes and the corresponding influencing factors.

Keywords: Lake Hongze; CO₂ efflux; hydrological scenarios; Huaihe River; influence factors

溪流、河湖、水库等内陆水体是全球碳循环的重要枢纽,每年内陆水体排放到大气中的二氧化碳(CO₂)几乎抵消了海洋吸收CO₂的总量^[1]。据估计,全球内陆水体CO₂排放预算为2.42 Pg C/a,尽管湖泊只占除两极冰盖外陆地面积的3.7%,却贡献了内陆水体大气碳排放总量的25%^[2],在流域尺度碳平衡估算中举足轻重。目前,针对国内湖泊甚至流域CO₂排放的研究依然较少,湖泊的异质性以及季风气候区CO₂排放数据的相对匮乏,进一步限制了国内水体碳排放的准确估算,较少的样本量和观测点时空高度离散使得国内湖泊CO₂总排放量估算偏差较大,极大地增加全球碳收支估算的不确定性。

湖泊是CO₂排放的热点区域,同时也是水体有机质运输和降解的重要场所,有机质的迁移转化亦能在很大程度上影响水体CO₂产生与排放^[3]。水体CO₂过饱和主要是陆源有机物原位呼吸或流域CO₂直接输入的结果^[4]。湖库溶解性有机物(DOM)中有相当部分会直接参与水体微生物循环,包括光合作用固定CO₂、呼吸作用和降解矿化释放CO₂^[5]。人类活动产生的废水导致下游承接水体营养盐浓度上升,过量的营养负荷易造成水体富营养化,气候变暖协同湖泊营养水平升高也会增强CO₂的产生和排放^[6]。

湖库产生的碳排放不仅取决于水体无机、有机碳输入通量大小,还与输入碳的处理及转化为CO₂的潜力有关^[7-8],而这些过程均会受到水文情景的直接影响^[9]。Butman等^[10]研究强调了降水强度对区域碳收支的重要性,发现河流CO₂排放与降水量呈正相关;Li等^[4]研究认为极端水文事件会引发淡水湖系统碳汇和碳源之间的整体转变;Gatland等^[11]证明了洪水事件会输入大量DOM,加剧水体的脱氧和酸化,极大地促进水体CO₂排放;Nydale等^[12]长期研究发现内陆淡水溶解性有机碳(DOC)浓度的增加并未伴随更高的CO₂分压,很大可能是因为暴雨径流过程增强了地表冲刷与土壤淋溶,降低DOC降解矿化为CO₂的效率。尽管如此,目前探讨湖泊水文情景对CO₂排放影响的研究报道仍然有限,由此认为,湖泊碳排放估算具有很大的不确定性。鉴于此,本文于2018年野外采集洪泽湖不同水文情景下温室气体样品,运用传递系数法计算CO₂通量,探讨洪泽湖水—气界面CO₂通量变化特征及其影响因素,提升对湖库CO₂迁移转化及碳循环的认识具有一定的参考价值。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

洪泽湖是南水北调工程东线重要的过水通道和调水泵站,也是我国第四大淡水湖。洪泽湖为过水型湖泊,换水周期约为35 d,平均水深1.77 m,补给主要依赖大气降水和地表径流^[13]。近年来,洪泽湖周边经济快速发展,人类活动加剧,水生态环境面临水体富营养化等环境问题^[14]。本文将洪泽湖大体分为3个湖区:北部成子湖区水体流动性较差^[14];西部溧河洼水浅且水生植物分布面积较广^[15];东部湖心过水区,水体从淮河流入,入江水道流出,水体流动性大。本研究在全湖范围内设置10个采样点,采样时间为2018年2、4、5、6、9和11月每月25日左右,均避开大风或降雨天气,保证采样安全的同时,也可以更好地观测当月水文情

势变化后各参数的响应结果(图1).

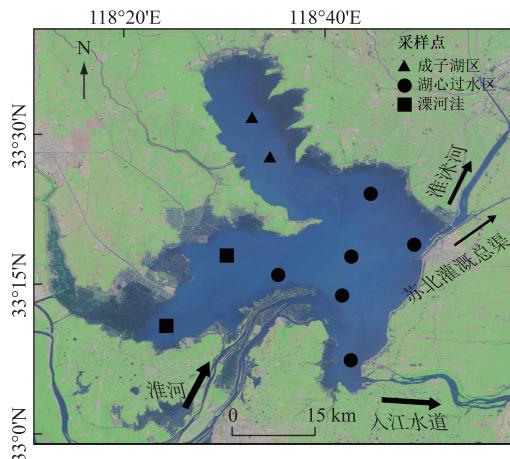


图1 洪泽湖采样点分布

Fig.1 Location of sampling sites in Lake Hongze

1.2 水文特征划分

洪泽湖位于淮河流域中游(王家坝至洪泽湖出口)和下游(洪泽湖出口至以下),淮河水系降雨量、淮河控制站(蚌埠站)的月均流量水文数据来自水利部淮河水利委员会(<http://www.hrc.gov.cn>),洪泽湖水位来自江苏省水利厅水情信息(<http://jswater.jiangsu.gov.cn>)。

2018年淮河水系全年降水量范围为7~182 mm,其中5—8月记录了较高的降雨量;同样淮河干流蚌埠水文站在5—8月期间观测到的月均流量值,可达 $1719.2 \text{ m}^3/\text{s}$,而9—12月该站点记录最大月均流量值也仅有 $421 \text{ m}^3/\text{s}$ 。洪泽湖水位数据表明,2018年1—5月水位明显高于正常蓄水位(13 m),而6—12月呈现较低水位,与文献[16]中洪泽湖1953—2019年水位记录变化特征一致,这是因为自1953年三河闸建闸后,以往洪泽湖水位变动的自然节律被打乱,年内水位呈现冬春季高、夏季低的反相变化特征,同时2014年南水北调东线一期工程通水后,还受到了水利工程等人为调控影响^[15]。淮河是洪泽湖主要入湖河流,占所有河流入湖量的87%^[16],因此本研究将2018年2、11月划分为枯水期,4、9月划分为平水期,5、6月划分为丰水期(图2)。

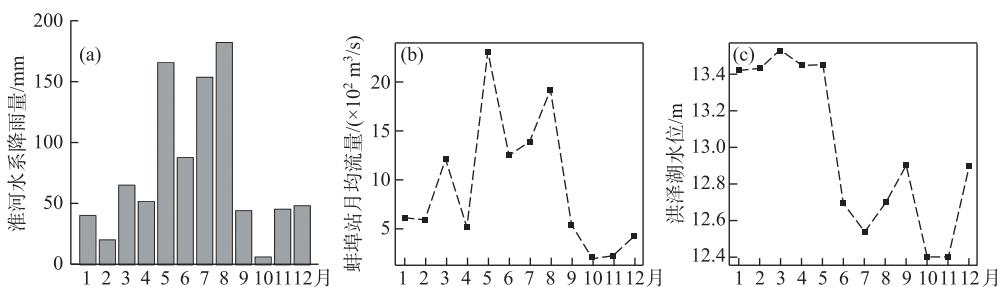


图2 2018年淮河水系月均降雨量(a)、蚌埠站月均流量(b)和洪泽湖水位(c)

Fig.2 Monthly mean rainfall of Huaihe River basin(a), monthly mean inflow rate to Lake Hongze at Bengbu station(b), and the water level(c) of Lake Hongze in 2018

1.3 样品参数测定

1.3.1 主要水质参数测定 采用Yellow Springs Instruments (YSI) EXO2多参数水质分析仪原位测定pH、水

温(WT)、溶解氧(DO)等水质参数。野外工作中每个样点均采集2.5 L水样,保存在装有冰袋的保温箱中。叶绿素a浓度(Chl.a)使用分光光度法予以测定,水样经0.7 μm孔径Whatman GF/F滤膜过滤,所得滤膜置于冰箱中冷冻48 h,再用90%的热乙醇提取后由日本岛津UV-2550型号分光光度计测定665、750 nm波长处吸光度再换算得到,精度<2 μg/L^[17];DOC浓度测定是将水样经0.2 μm孔径的GF/F滤膜,滤液通过日本岛津Shimadzu TOC-V CPN经高温灼烧测定,精度<0.1 mg/L;NH₃-N浓度测定采用水杨酸一次氯酸盐光度法,在波长697 nm处测得吸光度换算得到^[18],精度<0.05 mg/L;总氮(TN)浓度采用碱性过硫酸钾消毒紫外分光光度法测定220、275 nm处吸光度^[18],精度为0.05 mg/L;总磷(TP)浓度采用钼酸铵分光光度法测定700 nm波长下吸光度^[18],精度为2 μg/L;风速使用便携式风速仪原位测定。

1.3.2 CDOM测定及平行因子分析 使用光学手段测定DOM的结构组分,DOM中可以强烈吸收紫外辐射的部分被称为有色可溶性有机质(CDOM)。水样经Millipore 0.22 μm膜过滤,滤液用Shimadzu UV-2550 UV-Vis分光光度进行吸收光谱扫描,在200~800 nm波长范围(间隔为1 nm)内获得CDOM的吸收系数^[19];采用Hitachi公司的F-7000型荧光光度计测定CDOM三维荧光光谱(excitation-emission matrices, EEMs),激发波长范围为230~450 nm,间隔5 nm,发射波长范围为250~550 nm,间隔1 nm^[13]。以每日Milli-q超纯水为空白,以修订拉曼散射造成的误差并消除瑞利散射影响^[20]。MATLAB 2019b中使用drEEM工具箱(ver.0.0.2.0)对测得的光谱数据进行平行因子(parallel factor analysis, PARAFAC)分析,最终得到4个组分模型。

1.3.3 二氧化碳测定和通量计算 本研究采用顶空平衡法测定表层水体CO₂浓度。野外选择较为平稳的水面,使用61 mL棕色玻璃瓶于水下约20 cm处,装满水样并保证无气泡。在实验室用高纯氮气(99.999%)顶空,剧烈振荡后用三通阀将平衡后的气体注入气相色谱仪(Agilent-7890B, USA)中进行分析。依据道尔顿分压定律和亨利定律,测得CO₂原始溶解浓度,计算公式如下^[21-22]:

$$c_w = c_g \cdot \frac{V_g}{V_l} + c_l \quad (1)$$

$$c_l = f_g \cdot a \quad (2)$$

$$\ln a = A_1 + A_2(100/T) + A_3 \ln(T/100) + A_4(T/100) + S[B_1 + B_2(T/100) + B_3(T/100)^2] \quad (3)$$

式中,c_w为水样原始CO₂浓度,μmol/L;c_g为平衡后气相中CO₂浓度,由气相色谱仪测定,μmol/L;V_g和V_l分别为顶空平衡中气相和液相的体积,L;c_l为顶空平衡后剩余液相中CO₂的溶解浓度,μmol/L;f_g为CO₂的摩尔分数,μmol/mol;a为布什系数;S为盐度(0.02),‰;A₁、A₂、A₃、A₄、B₁、B₂和B₃为常数,具体值见文献[22]。

本文使用传递系数法测定水—气界面CO₂扩散通量(F),传递系数法具备有大区域内快速连续观测的优势,计算公式如下^[2,23-24]:

$$F = k(c_w - c_{eq}) \quad (4)$$

$$k/k_{600} = (S_c/600)^{-n} \quad (5)$$

$$k_{600} = 2.07 + 0.215U_{10}^{1.7} \quad (6)$$

$$S_c = 1911.1 - 118.11T + 3.4527T^2 - 0.04132T^3 \quad (7)$$

$$U_{10} = U_z \left[1 + \frac{C_{d10}^{0.5}}{K} \ln \left(\frac{10}{z} \right) \right] \quad (8)$$

式中,C_w是表层水体CO₂溶解浓度,由式(1)得到;C_{eq}原位条件下水—气界面平衡时大气CO₂浓度,μmol/L;k是水—气界面气体交换系数,通过风速进行参数化,cm/h;k₆₀₀是当施密特数为600时对应的k值,且U₁₀≤3.7 m/s,n=2/3,U₁₀>3.7 m/s,n=0.5,U₁₀是10 m高度处的风速,根据粗糙度和仪器的观测高度得到;T为表层水体温度,℃;C_{d10}为水面上10 m高处的阻力系数(0.0013 m/s),K为冯卡门常数(0.41),U_z是便携式风速仪测定的风速,m/s;S_c是施密特数(无量纲)。

1.4 数据处理

用Excel 2019、R-studio 1.4.1717(R 4.0.2)软件进行数据汇总、相关性检验、t检验分析(t-test)及方差分析(ANOVA);采用MATLAB R2019b中drEEM工具箱进行平行因子分析建模;通过ArcGIS 10.2.1软件进行空间IDW插值绘图;通过R-studio ggplot2包绘制相关图表。

2 结果

2.1 不同水文期下水质参数特征

不同水文期洪泽湖水温有明显变化,丰水期平均水温在 24.4°C ,枯水期为 6.5°C ,平水期为 20.6°C ;全湖平均pH值为8.4,且枯水期内变化较大,2月pH为7表现出中性,11月则为9.2;DO浓度枯水期>平水期>丰水期($P<0.001$),极大值出现在2月((14.6 ± 0.6) mg/L),是6月极小值的2.1倍,西部湖区DO浓度总体偏高且变幅小;单因素方差分析(ANOVA)可知不同水文情景下TN浓度差异不显著($P=0.19$),但在空间分布上差异明显,总体趋势表现为全湖由北向南、由西向东TN浓度不断增大,高值往往出现在淮河入湖口附近;TP和NH₃-N浓度在丰、平、枯期的差异性显著($P<0.001$),同时TN、TP和NH₃-N浓度之间有显著的正相关关系($P<0.01$);Chl.a浓度总体表现为丰水期>平水期>枯水期,空间上,Chl.a浓度高值主要出现在北部和西部湖区,而丰水期过水湖区变化最强烈;DOC浓度在丰、平、枯中差异不显著($P=0.8$),高值主要出现在北部成子和西部的溧河洼湖区,而东部的过水湖区DOC浓度偏低(图3、4).

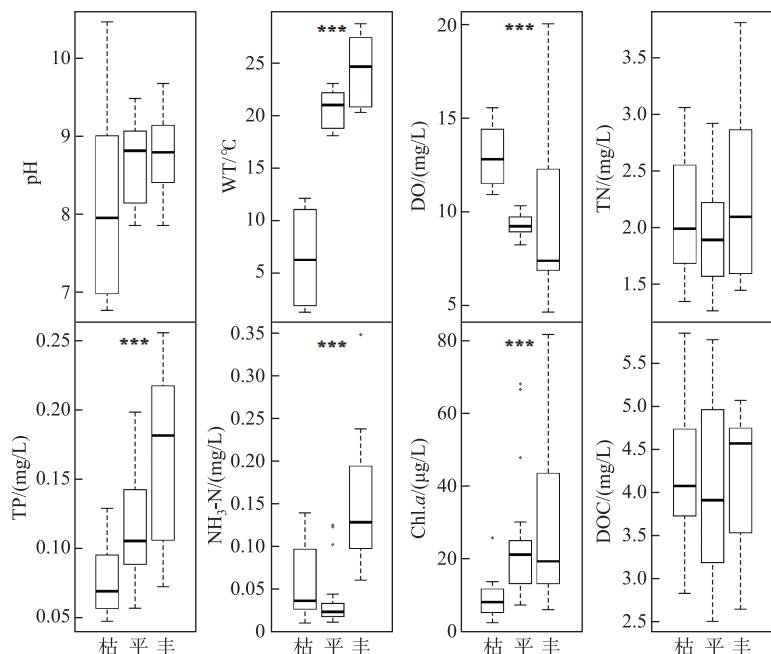


图3 不同水文情景下洪泽湖表层水体环境因子对比(***表示 $P<0.001$)

Fig.3 Comparison of environmental variables of Lake Hongze under different hydrological scenarios

2.2 表层水体溶解性有机质特征

对滤后水进行EEMs-PARAFAC分析后,得到4种荧光组分:C1、C2、C3和C4(图5).组分C1($\text{Ex}/\text{Em}=240(325)/444\text{ nm}$)与紫外区的A峰有着相似的光谱形态,为类腐殖质且与人类活动及农业灌溉有关^[25];C2($\text{Ex}/\text{Em}=<250/404\text{ nm}$)具有强烈的陆源土壤有机质类腐殖质的光谱特性^[26];C3($\text{Ex}/\text{Em}=235(295)/356\text{ nm}$)为蛋白质类氨基酸荧光团,与水生生物量及微生物降解过程息息相关^[27-28];C4($\text{Ex}/\text{Em}=<250(275)/308\text{ nm}$)为内源类酪氨酸组分^[13];本研究使用吸收系数 a_{350} 来表征CDOM浓度^[29],且CDOM与DOC显著正相关($P<0.01$).

2.3 不同水文期下水—气界面CO₂交换通量特征

洪泽湖表层水体CO₂浓度变幅为 $6.7\sim109.4\text{ }\mu\text{mol/L}$,平均值(31.6 ± 21.4) $\mu\text{mol/L}$,CO₂浓度丰水期>枯水期>平水期($P<0.001$);水—气界面CO₂通量虽然受到风速、水温等影响,但其在时空分布上与CO₂浓度基本

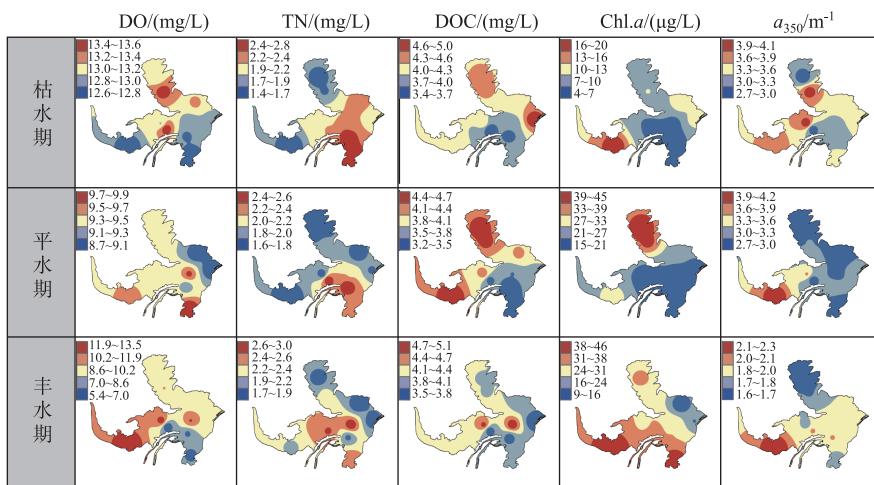


图 4 不同水文情景下洪泽湖环境因子空间分布

Fig.4 Spatial distribution of environmental variables under different hydrological scenarios of Lake Hongze

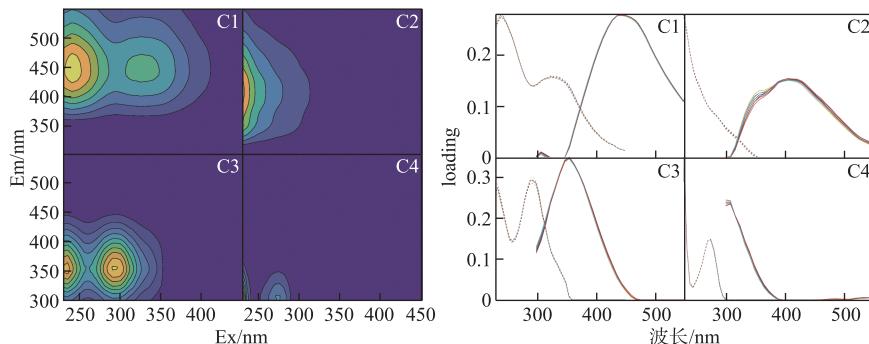


图 5 PARAFAC 得到 4 种组分的荧光组分荧光图谱及对半检验结果

Fig.5 Spectral shapes of four PARAFAC components and the model was validated using split half validation procedure

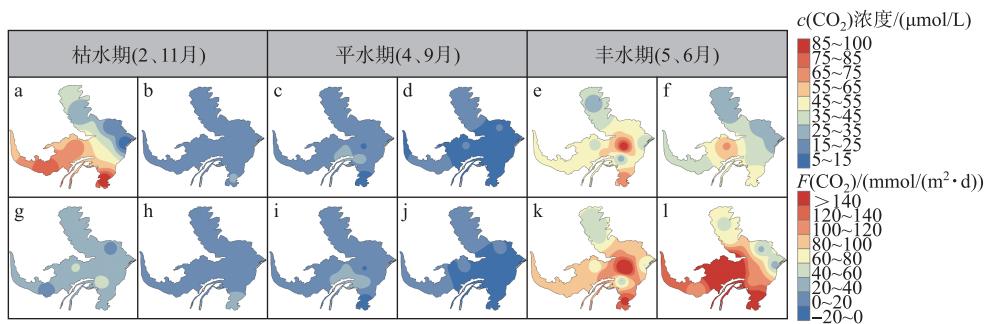
一致,水—气界面 CO_2 交换通量值为 $-17.3 \sim 310.2 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 均值为 $(43.5 \pm 63.5) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 不同水文期下 CO_2 通量波动范围较大, 高水期 $((106.9 \pm 73.4) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}))$ 显著高于枯水期 $((18.7 \pm 13.6) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}))$ 和平水期 $((5.2 \pm 15.5) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}))$ ($P < 0.001$); 同时 CO_2 通量极大值主要出现在过水湖区和淮河入湖口附近, 北部成子湖区 CO_2 通量值相对较低, 值得一提的是, 9 月平水期过水湖区出现了负通量(图 6).

由表 1 得到不同水文期 CO_2 交换通量与各参数的关系, 其中枯水期 DO、TN 和组分 C1 与 CO_2 通量呈正相关, pH、DOC 与 CO_2 通量呈负相关; 平水期仅有 pH 与 CO_2 通量有显著相关性; 高水期淮河径流输入增强, TN、TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 与 CO_2 通量呈显著正相关. 图 7 通过非线性拟合得到 CO_2 通量与蚌埠站月均流量的显著正相关关系.

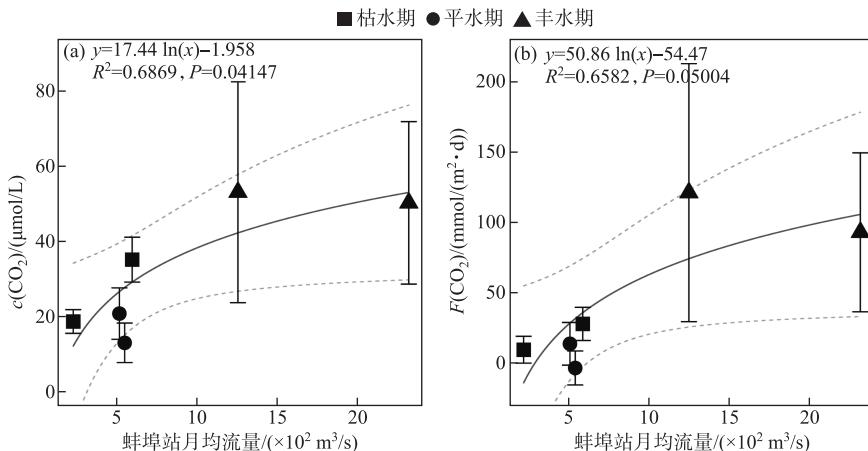
3 讨论

3.1 不同水文情景 CO_2 时空变化特征

洪泽湖年内不同水文期的转变,很大程度上对表层水体 CO_2 溶存浓度和交换通量的时空变化格局起到

图 6 洪泽湖不同水文情景下 CO_2 浓度和通量的空间分布Fig.6 Spatial distribution of CO_2 concentration and fluxes of Lake Hongze under different hydrological scenarios表 1 不同水文情景下 CO_2 通量与各参数之间的关系Tab.1 Relationship between CO_2 flux and parameters under different hydrological scenarios

水文期	pH	DO	TN	TP	$\text{NH}_3\text{-N}$	Chl.a	DOC	a_{350}	C1	C2	C3	C4
枯水期	-0.54 *	0.57 **	0.61 **	-0.23	0.43	-0.37	-0.52 *	0.07	0.70 ***	-0.66 **	0.36	-0.22
平水期	-0.60 **	-0.02	0.26	0.22	0.61	-0.10	-0.30	-0.41	-0.33	-0.20	0.17	0.25
丰水期	-0.01	-0.17	0.67 **	0.53 *	0.83 ***	0.44	0.28	-0.07	0.19	-0.21	-0.07	-0.02
全年	0.03	-0.19	0.52 ***	0.61 ***	0.86 ***	0.40 **	0.07	-0.49 ***	0.04	-0.27 *	0.15	-0.10

* 表示 $P<0.05$, ** 表示 $P<0.01$, *** 表示 $P<0.001$.图 7 洪泽湖 CO_2 溶存浓度和通量对蚌埠站月均来水量的响应关系Fig.7 Response of CO_2 concentration and efflux to monthly mean inflow discharge to Lake Hongze at Bengbu station

调控作用。从时间角度而言,5、6月丰水期,洪泽湖开始进入典型亚热带“雨热同季”期,此时入湖径流增强,水温不断上升,水体 CO_2 溶存浓度和交换通量显著升高,全湖表现为大气 CO_2 的源。丰水期湖泊接纳更多的外来水量,能够帮助氧气进入湖体和底泥增强水体呼吸作用,驱动有机碳的氧化分解从而产生更多的 CO_2 ^[30]。水温上升使水体中的微生物更为活跃,生物的新陈代谢和有机质的分解,会加速水柱中 DO 的消耗,降低 CO_2 等温室气体在水中的溶解度^[29],加大 CO_2 的逸出量。考虑到淮河流域复杂的河网和较高的生产力,

流域尺度的碳输入为洪泽湖提供了重要的碳源,也是导致丰水期 CO₂过饱和的重要原因,有研究证实,水文方式输入的外部无机碳,可以通过增加水体碳基质来提高湖泊 CO₂排放水平^[31]。平水期尽管水温维持在 20℃左右,但全湖 CO₂溶存浓度和通量均较低,甚至在 9 月由丰水期转变至平水期后,过水湖区出现了 CO₂负通量,表现为大气 CO₂的弱碳汇,说明水文条件的变化很大程度上能够替代水温成为控制 CO₂生产和排放的主要因子。同样枯水期也并没有因为水温更低,而呈现出最低的 CO₂排放量,甚至高于平水期,表现出大气的弱碳源。由此可见,洪泽湖 CO₂交换通量对水文变化敏感,造成该现象的原因一方面可能是水文情景交替改变碳累积速率,另一方面可能是水位波动引起水体碳酸盐环境变化,进而影响 CO₂的产生效率^[30]。后者表现在洪泽湖枯水期内,2 月 pH 明显低于 11 月,相比之下 2 月有更高的 CO₂排放量,这是因为在较低 pH 环境中 CO₂不易形成稳定的碳酸盐,更易以气体形式逸出^[22]。空间上,洪泽湖 CO₂溶存浓度和交换通量总体表现出由北向南递增的趋势,相比北部湖区,南部过水湖区更容易受淮河径流输入的直接影响,因此该区域 CO₂的显著变化可以更好地解释水文情景交替引起的调控影响。综上所述,洪泽湖水文情景发生改变时,会使湖泊在大气 CO₂碳源和潜在碳汇之间发生转变,这种对不同水文情景反应的动态和程度在以往研究中很少,因而可认为由水文期交替引起的径流变化影响,很大程度上会扭转湖泊系统对碳收支的影响和作用。

3.2 洪泽湖富营养化状态对 CO₂的影响

近期研究显示,洪泽湖整体处于轻度到中度富营养水平^[32]。营养水平高的湖泊往往会接纳更多的氮、磷和外源碳等物质^[33]。淮河是洪泽湖外源负荷输入的主要贡献者,也是导致湖泊营养盐水平空间分异的重要原因^[14]。丰水期,洪泽湖随着降雨量升高,周边农田土壤中更多的氮、磷元素汇入湖水,淮河径流增强携带流域城市污水(NH₃-N 等)进入湖体,使湖泊营养盐水平明显高于其它水文期,且 CO₂交换通量也与 TN、TP 和 NH₃-N 呈显著正相关,可见与人类活动密切相关的营养物质的输入能够驱动 CO₂产生和排放^[32]。值得注意的是,尽管丰水期洪泽湖有较高的 DO 水平,但 CO₂交换通量与 DO 之间无显著关系,说明 CO₂的生产排放不仅受营养盐的驱动影响,还可能更多的来自外源无机碳的输入而非内源呼吸作用^[33]。此外,有研究认为水体初级生产力(Chl.a 反映)升高能够降低 CO₂排放^[34]。丰水期营养盐浓度上升促进了藻类的生长^[35],过水湖区和西部溧河洼湖区均有高浓度 Chl.a,但结果表明 Chl.a 与 CO₂交换通量无显著关系,说明径流冲刷不但影响了藻类等浮游植物的群落结构,造成短暂富集现象^[36],还降低了光合作用的固碳能力^[37],这也反映丰水期藻类的生长代谢并没有直接影响 CO₂的产生和排放。平、枯水期过水湖区 TN 浓度依然较高,可能是由于营养负荷中的氮素相较于磷素不易吸附于土壤,而入湖流量减少和水体流动缓慢,易使得氮素在湖中浓缩富集^[32]。枯水期 TN、DO 与 CO₂通量呈显著正相关,而 DOC 与 CO₂显著负相关,说明伴随着径流输入减弱和水温的下降,驱动 CO₂产生和排放的主导因素由原本的外源输入逐渐转变为内源有机碳的降解。总体而言,洪泽湖富营养化状态能够促进 CO₂排放,但不同水文期下径流强度的变化似乎更能主导 CO₂的排放通量,同时外源无机碳输入对湖泊 CO₂的贡献也不可忽视,需要采取积极的淮河流域管理以改善洪泽湖水质,进而降低水体 CO₂水平。

3.3 溶解有机质组成来源对 CO₂的影响

洪泽湖表层水体 DOC、CDOM 等有机质与 CO₂交换通量之间均没有良好的耦合关系,说明水体内源有机质可能并不是促使 CO₂产生和排放的直接因素。不同水文期下 CDOM 与 DOC 显著相关,且高值往往出现在西部溧河洼湖区,该湖区受淮河径流变化影响较小,具有更利于水生动植物生长的水动力条件,较强的生物固碳能力也降低了该湖区的 CO₂水平^[38]。以往研究证实,河流等外源输入会携带大量有机质和无机碳进入湖泊,促进 CO₂排放^[2]。丰水期过水湖区 DOM 浓度并不高,而 CO₂通量排放明显上升,一方面能够说明较快的水流一定程度稀释了 DOC、CDOM 等有机质,使 DOM 没有适宜环境充分参与水体微生物循环,降低有机质降解矿化为 CO₂的效率^[39];另一方面也证实了河流无机碳的输入能够直接促进水体 CO₂的排放^[31]。枯水期类腐殖质组分 C1、C2 与 CO₂通量关系显著,虽然此时期径流强度减弱、水体滞留时间增加,但与人类活动相关的那部分类腐殖质仍然能够促进 CO₂的通量释放,同时内源呼吸降解开始占据优势,水体微生物分解滞留于湖水中的有机质,提高水体腐殖化程度,并能够在微生物降解循环过程中释放 CO₂^[5]。

3.4 国内外内陆水体水—气界面 CO₂通量对比

不同水体 CO₂交换通量数据可知(表 2),不同气候带湖泊或者河流总体是向大气排放 CO₂,证实了内陆

水域是大气 CO₂的热点排放区这一观点^[4,11,30,40-43]. 洪泽湖水—气界面 CO₂交换通量年均值为(43.5±63.5) mmol/(m²·d), 明显小于位于热带的湄公河和亚马逊湖泊的 CO₂排放量, 同时热带水体的气体传递系数值(*k*)也高于其它气候带. 结合其它区域水体不同水文条件下 CO₂通量特征发现, 巢湖在丰、平水期由于受外源有机质输入影响, 成为大气的碳源, 而在枯水期河流输入减弱, 全湖则转变为弱碳汇, 这与本文的研究结果相似; Rocky Mouth Creek 和 Lower Lakes 分别经历了干旱和洪水这类较为极端的水文事件, 并追踪观测了 CO₂交换通量特征, 发现极端事件导致水文条件的巨大改变, 同样会扭转水体的碳收支平衡; 白洋淀 CO₂交换通量对不同时期水位变化的敏感响应, 也表明了水文变化能够有力地调控水体的碳通量收支. 因此, 全球温室气体的评估不仅要考虑湖泊等水体面临的各类环境问题, 还需在更高频次的尺度上研究水文变化带来的影响, 以阐明水体碳变化及其控制影响因素.

表 2 国内外不同水体水—气界面 CO₂交换通量比较Tab.2 Comparative water-air flux of CO₂ from previously publications in the world and current study

水体	气候带	CO ₂ 交换通量/ (mmol/(m ² ·d))	<i>k</i> / (cm/h)	文献
Lower Mekong River	热带	194.5	26	[40]
Amazon	热带	345.2	15	[41]
太湖(2012—2013 年)	亚热带	17.9±6.3	—	[42]
洪泽湖(丰水期)	亚热带	106.8±73.4	3.0	本研究
洪泽湖(平水期)	亚热带	5.2±15.5	2.3	本研究
洪泽湖(枯水期)	亚热带	18.7±13.4	1.6	本研究
巢湖(丰水期)	亚热带	5.0±6.3	3.9	[43]
巢湖(平水期)	亚热带	5.0±3.6	2.7	[43]
巢湖(枯水期)	亚热带	-2.2±0.5	1.5	[43]
Rocky Mouth Creek (flood)	亚热带	163.6±25	—	[11]
Rocky Mouth Creek (post-flood)	亚热带	81.8±5.5	—	[11]
Lower Lakes (drought)	温带	0.3~7.0	0.6	[4]
Lower Lakes (post-drought)	温带	-16.4~0.9	1.0	[4]
白洋淀(水位 0~50 cm)	温带	73.4	—	[30]
白洋淀(水位 -40~-10 cm)	温带	0.7	—	[30]
白洋淀(水位 -80~-50 cm)	温带	43.2	—	[30]

4 结论

洪泽湖不同水文情景下水体 CO₂排放特征研究显示, 表层水体 CO₂溶存浓度及交换通量受水文因素调控的直接影响. 丰水期 CO₂排放通量值最高, 水体表现为大气 CO₂的源, 枯水期 CO₂通量降低为弱碳源, 平水期最低, 甚至在过水区出现了负通量, 全湖转为大气 CO₂的弱碳汇. CO₂交换通量空间上呈北部成自湖区低、南部过水湖区高的趋势, 特别是在淮河入湖区附近最高且变化最为强烈. 丰水期淮河来水量增加, TN、TP、NH₃-N 等营养负荷以及流域无机碳随之大量进入湖泊, 显著提高了水体 CO₂排放通量水平, 反映人类活动对湖库 CO₂排放的深刻影响, 同时外源氮磷营养的大量输入还造成过水湖区 Chl.a 浓度短暂上升. 平、枯水期径流强度减弱, 外源输入对水体 CO₂的影响降低, 水体呼吸和微生物降解有机质释放 CO₂逐渐占据优势. 此外, 洪泽湖水体内源 DOM 光谱组分并没有表现出与 CO₂通量的显著关系, 可能是受径流冲刷稀释影响不易聚集和降解. 研究结果表明水文情景是估算湖库 CO₂碳收支平衡的重要因子.

致谢:感谢张柳青、张成英、陈业、郭锐等同志在野外采样与室内实验过程中给予的帮助.

5 参考文献

- [1] Gómez-Gener L, Rocher-Ros G, Battin T *et al*. Global carbon dioxide efflux from rivers enhanced by high nocturnal emis-

- sions. *Nature Geoscience*, 2021, **14**(5) : 289-294. DOI: 10.1038/s41561-021-00722-3.
- [2] Qi TC, Xiao QT, Miao YQ et al. Temporal and spatial variation of carbon dioxide concentration and its exchange fluxes in Lake Chaohu. *J Lake Sci*, 2019, **31**(3) : 766-778. DOI: 10.18307/2019.0315. [齐天赐, 肖启涛, 苗雨青等. 巢湖水体二氧化碳浓度时空分布特征及其水-气交换通量. 湖泊科学, 2019, **31**(3) : 766-778.]
- [3] Drake TW, Hemingway JD, Kurek MR et al. The pulse of the Amazon: Fluxes of dissolved organic carbon, nutrients, and ions from the world's largest river. *Global Biogeochemical Cycles*, 2021, **35**(4). DOI: 10.1029/2020gb006895.
- [4] Li SY, Bush RT, Ward NJ et al. Air-water CO₂ outgassing in the Lower Lakes (Alexandrina and Albert, Australia) following a millennium drought. *Science of the Total Environment*, 2016, **542**: 453-468. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.10.070.
- [5] Dittmar T, Lennartz ST, Buck-Wiese H et al. Enigmatic persistence of dissolved organic matter in the ocean. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, **2**(8) : 570-583. DOI: 10.1038/s43017-021-00183-7.
- [6] 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.
- [7] Zhou YQ, Zhou L, Zhang YL et al. Autochthonous dissolved organic matter potentially fuels methane ebullition from experimental lakes. *Water Research*, 2019, **166**: 115048. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115048.
- [8] 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**: 2972. DOI: 10.1038/ncomms3972.
- [9] Algesten G, Sobek S, Bergström AK et al. Role of lakes for organic carbon cycling in the boreal zone. *Global Change Biology*, 2004, **10**(1) : 141-147. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2003.00721.x.
- [10] Butman D, Raymond PA. Significant efflux of carbon dioxide from streams and rivers in the United States. *Nature Geoscience*, 2011, **4**(12) : 839-842. DOI: 10.1038/ngeo1294.
- [11] Gatland JR, Santos IR, Maher DT et al. Carbon dioxide and methane emissions from an artificially drained coastal wetland during a flood: Implications for wetland global warming potential. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2014, **119**(8) : 1698-1716. DOI: 10.1002/2013jg002544.
- [12] Nydahl AC, Wallin MB, Weyhenmeyer GA. No long-term trends in pCO₂ despite increasing organic carbon concentrations in boreal lakes, streams, and rivers. *Global Biogeochemical Cycles*, 2017, **31** (6) : 985-995. DOI: 10.1002/2016gb005539.
- [13] Zhang LQ, Peng K, Yang Y et al. The bioavailability characteristics of CDOM in Lake Hongze and Lake Luoma under different hydrological scenarios. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, **40**(1) : 85-90. [张柳青, 彭凯, 杨艳等. 不同水文情景下洪泽湖、骆马湖有色可溶性有机物生物可利用性特征. 光谱学与光谱分析, 2020, **40**(1) : 85-90.]
- [14] Li Y, Zhang Z, Chen JH et al. Water quality change and driving forces of Lake Hongze from 2012 to 2018. *J Lake Sci*, 2021, **33**(3) : 715-726. DOI: 10.18307/2021.0308. [李颖, 张祯, 程建华等. 2012—2018年洪泽湖水质时空变化与原因分析. 湖泊科学, 2021, **33**(3) : 715-726.]
- [15] Qin JL, Yin XN, Liu HR et al. Analysis of effect of lake water level changes on emergent plants: A case study in the Hongze lake. *Environmental Engineering*, 2020, **38**(10) : 53-60. DOI: 10.13205/j.hjgc.202010009. [秦敬嵒, 尹心安, 刘洪蕊等. 湖泊水位变化对挺水植物影响分析: 以洪泽湖为例. 环境工程, 2020, **38**(10) : 53-60.]
- [16] Wang ZH, Zhang YR. Identification of spatio-temporal distribution characteristics and its influencing factors of water quality on Yujia Lake. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2013, **25**(2) : 16-20, 66. [王召唤, 张延荣. 喻家湖水质时空分布特征和影响因子分析. 环境监测管理与技术, 2013, **25**(2) : 16-20, 66.]
- [17] Chen YW, Chen KN, Hu YH. Discussion on possible error for phytoplankton chlorophyll-a concentration analysis using hot-ethanol extraction method. *J Lake Sci*, 2006, **18**(5) : 550-552. DOI: 10.18307/2006.0519. [陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉. 浮游植物叶绿素a测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨. 湖泊科学, 2006, **18**(5) : 550-552.]
- [18] Huang XF ed. Survey, observation and analysis of lake ecology. Beijing: Standards Press of China, 2000. [黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 2000.]
- [19] Shi Y, Li YP, Zhang LQ et al. Characterizing chromophoric dissolved organic matter in Lake Gehu, Lake Dianshan and Lake Yangcheng in different hydrological seasons. *J Lake Sci*, 2021, **33**(1) : 168-180. DOI: 10.18307/2021.0124. [石玉, 李元鹏, 张柳青等. 不同丰枯情景下长江三角洲非通江湖泊(滆湖、淀山湖和阳澄湖)有色可溶性有机物组成特征. 湖泊科学, 2021, **33**(1) : 168-180.]

- [20] Zhang YL, Zhou YQ, Shi K et al. Optical properties and composition changes in chromophoric dissolved organic matter along trophic gradients: Implications for monitoring and assessing lake eutrophication. *Water Research*, 2018, **131**: 255-263. DOI: 10.1016/j.watres.2017.12.051.
- [21] Zang KP, Wang JY, Zhao HD et al. Simultaneous determination of dissolved CH₄ and N₂O in seawater using head space-dual channel GC system. *Environmental Chemistry*, 2014, **33**(12) : 2094-2101. [臧昆鹏, 王菊英, 赵化德等. 顶空平衡-双通道气相色谱法测定海水中溶解态甲烷和氧化亚氮. 环境化学, 2014, **33**(12) : 2094-2101.]
- [22] Yang FY, Zhang SL, Wang SM et al. Dissolution and emission patterns and influencing factors of greenhouse gases in Panjiakou Reservoir. *China Environmental Science*, 2021; 1-13. [杨凡艳, 张松林, 王少明等. 潘家口水库温室气体溶存、排放特征及影响因素. 中国环境科学, 2021; 1-13.]
- [23] Cole JJ, Caraco NF. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF₆. *Limnology and Oceanography*, 1998, **43**(4) : 647-656. DOI: 10.4319/lo.1998.43.4.0647.
- [24] Crusius J, Wanninkhof R. Gas transfer velocities measured at low wind speed over a lake. *Limnology and Oceanography*, 2003, **48**(3) : 1010-1017. DOI: 10.4319/lo.2003.48.3.1010.
- [25] Shutova Y, Baker A, Bridgeman J et al. Spectroscopic characterisation of dissolved organic matter changes in drinking water treatment: From PARAFAC analysis to online monitoring wavelengths. *Water Research*, 2014, **54**: 159-169. DOI: 10.1016/j.watres.2014.01.053.
- [26] Murphy KR, Stedmon CA, Waite TD et al. Distinguishing between terrestrial and autochthonous organic matter sources in marine environments using fluorescence spectroscopy. *Marine Chemistry*, 2008, **108** (1/2) : 40-58. DOI: 10.1016/j.marchem.2007.10.003.
- [27] Zhang YL, van Dijk MA, Liu ML et al. The contribution of phytoplankton degradation to chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in eutrophic shallow lakes: Field and experimental evidence. *Water Research*, 2009, **43**(18) : 4685-4697. DOI: 10.1016/j.watres.2009.07.024.
- [28] He XS, Xi BD, Zhang P et al. The seasonal distribution characteristics and its reasons of dissolved organic matter in groundwater. *China Environmental Science*, 2015, **35**(3) : 862-870. [何小松, 席北斗, 张鹏等. 地下水中溶解性有机物的季节变化特征及成因. 中国环境科学, 2015, **35**(3) : 862-870.]
- [29] Zhou YQ, Xiao QT, Yao XL et al. Accumulation of terrestrial dissolved organic matter potentially enhances dissolved methane levels in eutrophic Lake Taihu, China. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(18) : 10297-10306. DOI: 10.1021/acs.est.8b02163.
- [30] Yuan XM, Liu Q, Cui BS et al. Effect of water-level fluctuations on methane and carbon dioxide dynamics in a shallow lake of Northern China: Implications for wetland restoration. *Journal of Hydrology*, 2021, **597**: 126169. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126169.
- [31] Weyhenmeyer GA, Kosten S, Wallin MB et al. Significant fraction of CO₂ emissions from boreal lakes derived from hydrologic inorganic carbon inputs. *Nature Geoscience*, 2015, **8**(12) : 933-936. DOI: 10.1038/ngeo2582.
- [32] Cui JY, Guo R, Song XW et al. Spatio-temporal variations of total nitrogen and total phosphorus in lake and inflow/outflow rivers of Lake Hongze, 2010–2019. *J Lake Sci*, 2021, **33**(6) : 1-16. DOI: 10.18307/2021.0610. [崔嘉宇, 郭蓉, 宋兴伟等. 洪泽湖出入河流及湖体氮、磷浓度时空变化(2010—2019年). 湖泊科学, 2021, **33**(6) : 1-16.]
- [33] Xiao QT, Duan HT, Qi TC et al. Environmental investments decreased partial pressure of CO₂ in a small eutrophic urban lake: Evidence from long-term measurements. *Environmental Pollution*, 2020, **263**: 114433. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114433.
- [34] Cole JJ, Cole JJ, Caraco NF et al. Carbon in catchments: Connecting terrestrial carbon losses with aquatic metabolism. *Marine and Freshwater Research*, 2001, **52**(1) : 101. DOI: 10.1071/mf00084.
- [35] Zhang QJ, Wang YY, Wang JD et al. Succession pattern of phytoplankton and its drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province. *Environmental Science*, 2020, **41**(4) : 1648-1656. DOI: 10.13227/j.hjkx.201909146. [张庆吉, 王业宇, 王金东. 骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子. 环境科学, 2020, **41**(4) : 1648-1656.]
- [36] Chen Y, Peng K, Zhang QJ et al. Spatio-temporal distribution characteristics and driving factors of zooplankton in Hongze Lake. *Environmental Science*, 2021; 1-16. DOI: 10.13227/j.hjkx.202010195. [陈业, 彭凯, 张庆吉等. 洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素. 环境科学, 2021; 1-16.]
- [37] Balmer MB, Downing JA. Carbon dioxide concentrations in eutrophic lakes: Undersaturation implies atmospheric uptake.

- Inland Waters*, 2011, 1(2) : 125-132. DOI: 10.5268/IW-1.2.366.
- [38] Gu BH, Schelske CL, Coveney MF. Low carbon dioxide partial pressure in a productive subtropical lake. *Aquatic Sciences*, 2011, 73(3) : 317-330. DOI: 10.1007/s00027-010-0179-y.
- [39] 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.
- [40] Li SY, Lu XX, Bush RT. CO₂ partial pressure and CO₂ emission in the Lower Mekong River. *Journal of Hydrology*, 2013, 504 : 40-56. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.09.024.
- [41] Alin SR, de Fátima FL, Rasera M et al. Physical controls on carbon dioxide transfer velocity and flux in low-gradient river systems and implications for regional carbon budgets. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011, 116 (G1) : G01009. DOI: 10.1029/2010jg001398.
- [42] Xiao QT. Study on greenhouse gases (CO₂, CH₄, and N₂O) fluxes of water-air interface in Lake Taihu [Dissertation]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2014. [肖启涛. 太湖水—气界面温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)通量研究[学位论文]. 南京:南京信息工程大学, 2014.]
- [43] Li YY, Zhu JY, Yu XQ et al. Emission of carbon dioxide and its potential linkage with optical composition of chromophoric dissolved organic matter in Lake Chaohu. *China Environmental Science*, 2021; 1-10. [李宇阳, 朱俊羽, 俞晓琴等. 巢湖二氧化碳排放特征及与有色可溶性有机物来源组成潜在关联. 中国环境科学, 2021; 1-10.]