

# 天气状况对富营养化池塘水-气界面 冬季二氧化碳通量的影响

李元正 雷丹 刘佳 王炜 于国熙

(三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:**为揭示富营养化浅水池塘冬季不同天气状况的昼夜性温室气体通量特征,利用静态浮箱法连续7 d监测了宜昌市富营养化池塘冬季水-气界面昼夜性CO<sub>2</sub>通量,7 d内的天气状况各异,包括晴天、阴天和雨天,能较好的代表冬季池塘通量特征.观测点在7 d内的平均CO<sub>2</sub>通量为7.09 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>;单日CO<sub>2</sub>通量最大为11.26 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,最小为-3.20 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>.阴雨天CO<sub>2</sub>的排放通量为9.76 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,约是晴天的两倍,且全天CO<sub>2</sub>均呈向大气排放状态.晴天时CO<sub>2</sub>通量在冬季表现为极弱的排放,3 d平均通量约为3.76 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,白天水体表现为CO<sub>2</sub>的汇.在观测期间内CO<sub>2</sub>扩散通量昼夜性变化明显,晴天时扩散通量与水温、叶绿素、溶解氧、pH呈显著负相关,与气压呈正相关,水体中的藻类等浮游植物在晴天的光合作用强度大于呼吸作用,导致在白天(10:00~18:00)池塘表现为吸收大气中的CO<sub>2</sub>.阴雨天气通量与气温、水温呈负相关,与溶解氧、叶绿素、风速、气压呈显著正相关.不同的天气状况下环境因子昼夜性变化,导致了气体通量的昼夜性变化特征.

**关键词:**二氧化碳; 富营养化池塘; 气体扩散通量; 温室效应

中图分类号:X83 文献标识码:A 文章编号:1672-948X(2018)04-0033-06

## Influence of Weather Condition on CO<sub>2</sub> Flux in Eutrophic Pond Water-Air Interface in Winter

Li Yuanzheng Lei Dan Liu Jia Wang Wei Yu Guoxi

(College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges Univ., Yichang 443002, China)

**Abstract** Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emission pathways in winter have been quantified during a 7 days online survey of a eutrophic shallow pond in Yichang, China. The weather conditions are different in 7 days, including sunny, cloudy and rainy days, which can better represent the characteristics of the winter pond flux. The total average emission flux of CO<sub>2</sub> was 7.09 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>; the maximum CO<sub>2</sub> flux was 11.26 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>; and the maximum CO<sub>2</sub> flux was -3.20 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> in monitoring period. The emission flux of CO<sub>2</sub> in the cloudy day was 9.76 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>, is about two times of the sunny day; and water was a strong source of atmospheric carbon dioxide. The total emission fluxes of CO<sub>2</sub> remains at a very low level and the average value were 3.76 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>. The diffusion flux was negatively correlated with water temperature, chlorophyll, dissolved oxygen(DO) and pH in clear day, and was positively correlated with air pressure. In the cloudy and rainy weather, the flux is negatively correlated with the temperature and water temperature, and has a significant positive correlation with the DO, chlorophyll, wind speed and air pressure. The day and night-changes

收稿日期:2018-03-26

基金项目:国家自然科学基金项目(41273110);湖北省教育厅科研计划项目(Q20151209)

通信作者:雷丹(1980-),女,讲师,博士,研究方向为生态水利.E-mail:88598687@qq.com

of environmental factors caused by different weathers and times resulted in the day and night variation of gas flux.

**Keywords** carbon dioxide( $\text{CO}_2$ ); eutrophic pond; gas diffusion flux; greenhouse effect

## 1 研究背景

自工业革命以来,大气中二氧化碳( $\text{CO}_2$ )、甲烷( $\text{CH}_4$ )、氧化亚氮( $\text{N}_2\text{O}$ )等温室气体浓度大幅上升,由此所带来的温室效应是人类现阶段面临的最严峻的全球环境问题之一<sup>[1]</sup>.陆地生态系统的碳循环和碳蓄积是全球变化研究的重要组成部分,其中淡水生态系统作为陆地生态系统的一部分,其水-气界面、沉积物-水界面的碳交换不可忽视.小型池塘作为淡水生态系统的重要组成部分,同时也是重要的内陆人工水体,其总面积占全球湖泊和池塘总面积的8.6%<sup>[2]</sup>,约为 $7.7 \times 10^3 \text{ km}^2$ <sup>[3]</sup>,但 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 排放占整个淡水生态系统的15.1%和40.6%<sup>[4]</sup>.由于这些池塘面积小数量众多、地理位置复杂,导致人们在估算内陆水体温室气体排放量时忽略掉它的“贡献”,而更多地关注湖泊、水库等大中型水体.近年来这些自然地理和富营养化状况差异较大,有着较高的 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 排放的池塘<sup>[5,6]</sup>,逐渐成为温室气体排放的研究热点<sup>[7,8]</sup>.且随着化肥在农业领域中的过度使用,导致池塘水体富营养化现象日益严峻,大量的内源有机质促进了池塘沉积物中的 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 产生<sup>[9-13]</sup>.迄今为止,小型池塘的温室气体通量监测大多以单次昼夜监测来代表其近期的通量释放水平,这样可能导致得到的通量结果受天气等偶然因素的影响较大,同时相对于季节尺度而言,冬季的研究也相对较少.

本文利用无人值守的自动通量箱观测系统,不间断对富营养化池塘进行了连续7d的通量观测,以及水环境因子和大气环境因子的同步监测,旨在揭示冬季富营养化池塘水-气界面 $\text{CO}_2$ 通量的昼夜性特征与规律,并探讨环境因子的影响.

## 2 材料和方法

### 2.1 研究区和监测点

湖北省宜昌市位于中亚热带与北亚热带的过渡地带,四季分明,冬季11月平均气温在 $4^\circ\text{C} \sim 11^\circ\text{C}$ 之间,当月平均降水总量约为21 mm.莲心湖位于湖北省宜昌市三峡大学内,是典型的富营养化景观池塘.该池塘面积约为 $2100 \text{ m}^2$ ,最大水深和平均水深约为2 m和1.6 m,且全年水位变化在10 cm之间.池塘水

体的总氮(TN)和总磷(TP)质量浓度分别约为 $1.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,底部覆盖约10 cm的松软沉积物.2016年11月24日至2016年11月30日,在湖中距离岸边8 m处(水深约1.6 m)进行了7 d连续观测.

### 2.2 样品采集和分析方法

本文利用全自动封闭漂浮通量箱系统测量水-气界面的 $\text{CO}_2$ 通量(如图1所示).该箱体底部中通不透明,两侧固定两个自动推杆连接顶部不锈钢盖,顶盖与箱体间以硅胶软垫密封,并连接控制器控制推杆轨迹.箱体表面覆盖一层隔热材料,体积为 $56.67 \text{ L}$ ,底面积为 $0.113 \text{ m}^2$ 直径和高度分别为0.38 m和0.50 m.箱内顶部安装一个小型风扇,使箱体内气体混合均匀.当进行测量时,将通量箱与G2301温室气体分析仪(Picarro,美国)相连接.该仪器能以1 Hz频率实时、连续地测量箱体內的 $\text{CO}_2$ 气体浓度.单次测量时间为25 min,由于箱体闭合,水体中的 $\text{CO}_2$ 与箱体空间內的 $\text{CO}_2$ 会进行交换,并通过温室气体分析仪记录下时间-气体浓度的数据.在测量时间结束后,自动通量箱的控制装置会自动控制箱体顶盖缓慢升起,使得箱体内气体与环境空气充分交换、混合均匀,5 min后推杆缓慢自动收缩关闭,并自动进行下次测量.

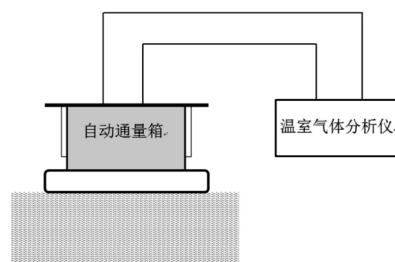


图1 观测系统示意图

实验期间,在岸边高于水面约3 m处架设便携式气象站(YGY-QXY,中国)现场监测风速、气温和气压.在离岸边2 m处采用多参数水质分析仪(HACH,美国)监测水体水温、叶绿素、pH和溶解氧.

### 2.3 计算方法

水-气界面气体交换通量是指单位时间内单位面积上的浓度变化量,正值表示水体向大气排放气体,负值表示水体吸收大气中的气体.本文采用Lambert等<sup>[14]</sup>给出的简单线性回归方法计算气体释放速率和通量.

通过此公式,将观测点处单位时间、单位面积内

的 CO<sub>2</sub> 浓度转换为 CO<sub>2</sub> 扩散通量,每组数据之间以 30 min 为间隔,全天监测数据可计算得到 48 组扩散通量,从而得到 CO<sub>2</sub> 扩散通量的昼夜变化规律.

3 结果与讨论

3.1 大气环境因子

气温、风速和气压的变化情况见表 1.在观测期间受天气影响,气温的变幅较大,观测第 1 d、第 2 d 为晴天,最高气温达到 25.3℃,最低温度为 14.3℃,平均温度为 17.1℃.观测后 4 d 为阴雨天气,最高气温为 20.5℃,最低气温仅为 7.4℃,温差达到了 16.1℃,平

均温度为 10.7℃.整个观测周期的平均温度为 13.5℃,略低于平均水温.

由于池塘周边建筑物、绿化树木遮挡,观测期间的最大风速仅为 1.43 m·s<sup>-1</sup>,风速在期间内平均为 0.19 m·s<sup>-1</sup>,阴、雨天气的平均风速为 0.24 m·s<sup>-1</sup>,晴天的平均风速为 0.16 m·s<sup>-1</sup>,最大风速为 0.71 m·s<sup>-1</sup>,由于观测期间内大多数情况下呈无风状态导致变异系数较大.晴天时的最大气压为 1 012.1 kPa,最小气压为 1 005.7 kPa,平均值为 kPa,阴、雨天气的最大气压达到了 1 028.4 kPa,最小气压也低于晴天,为 1 001.4 kPa,平均值为 1 014 kPa.

表 1 监测期间环境因子统计

统计项目	气温/℃			气压/kPa			风速/(m·s <sup>-1</sup> )			水温/℃		溶解氧/(mg·L <sup>-1</sup> )				pH		叶绿素/(mg·L <sup>-1</sup> )			
	全过程	晴天	阴雨天	全过程	晴天	阴雨天	全过程	晴天	阴雨天	全过程	晴天	阴雨天	全过程	晴天	阴雨天	全过程	晴天	阴雨天	全过程	晴天	阴雨天
最大值	25.3	25.3	20.5	1 028.4	1 012.1	1 028.4	1.43	0.71	1.43	23.1	23.1	20.1	31.2	31.2	23.4	9.9	9.9	9.78	96.79	96.79	91.39
最小值	7.4	14.3	7.4	1 001.4	1 005.7	1 001.4	0	0	0	7.8	15.9	7.8	4.09	7.78	4.09	7.06	7.88	7.06	6.71	10.25	6.71
平均值	13.5	17.1	10.7	1 013	1 009.3	1 014	0.19	0.16	0.24	15.1	17.6	13.8	15.73	15.84	14.52	8.86	9.11	8.81	42.28	39.87	45.84
标准偏差	4.88	2.31	3.2	6.97	1.71	5.79	0.28	0.2	0.33	3.38	1.14	3.38	4.65	5.22	4.71	0.58	0.51	0.56	16.97	20.41	15.41
变异系数	0.36	0.14	0.23	0.01	0	0.01	1.47	1.25	1.38	0.22	0.06	0.24	0.3	0.33	0.32	0.07	0.06	0.06	0.4	0.51	0.34

3.2 水环境因子

水温、溶解氧(DO)、pH 和叶绿素含量见表 1.观测期间的最高水温为 23.1℃,最低水温仅为 7.8℃,平均水温在 15.1℃左右.晴天时,平均水温为 17.6℃,最低水温为 15.9℃,略高于观测全过程的平均水温,阴、雨天气下的最高水温为 20.1℃,平均水温仅为 13.8℃,标准偏差为 3.38,在阴雨天气下的昼夜温差要大于晴天.

池塘水体呈弱碱性,pH 的范围在 7.06~9.90 之间,平均为 8.86.晴天时,水体的 pH 值略大于阴雨天,其平均值为 9.11.在阴、雨天气下水体中的 pH 波动范围较大,平均值为 8.81.在观测期间,DO 的变化幅度较大,最大值高达 31.20 mg·L<sup>-1</sup>,最低值仅为 4.09 mg·L<sup>-1</sup>,平均为 15.73 mg·L<sup>-1</sup>.晴天时的平均 DO 为 15.84 mg·L<sup>-1</sup>,略高于阴、雨天气的 14.52 mg·L<sup>-1</sup>.叶绿素的变化受昼夜影响明显,在观测期间的叶绿素变化范围在 6.71~96.79 mg·L<sup>-1</sup>,波动范围极大,是由于多数藻类具有明显的趋光性行为<sup>[15]</sup>,再加上昼夜水温差导致的水体分层、参混等现象,使叶绿素在白天的含量高于夜间.

3.3 水-气界面 CO<sub>2</sub> 通量的昼夜变化

在监测期间内(2016 年 11 月 24 日~2016 年 11 月 30 日,从 8:00 开始,到次日 8:00 为一个循环),

CO<sub>2</sub> 扩散通量随着昼夜、天气的改变而变化,7 d 的天气状况见表 2.监测结果表明(如图 2 所示),在整个观测期间内,CO<sub>2</sub> 的通量最大值为 32.02 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,最小为-35.02 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,1 d 内的最大变化幅度为 49.87 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,最小变化幅度为 10.13 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>.7 d 平均 CO<sub>2</sub> 通量约为 170.39 mg·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>,全天最大 CO<sub>2</sub> 通量约为 270.42 mg·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>,最小约为-76.84 mg·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>.

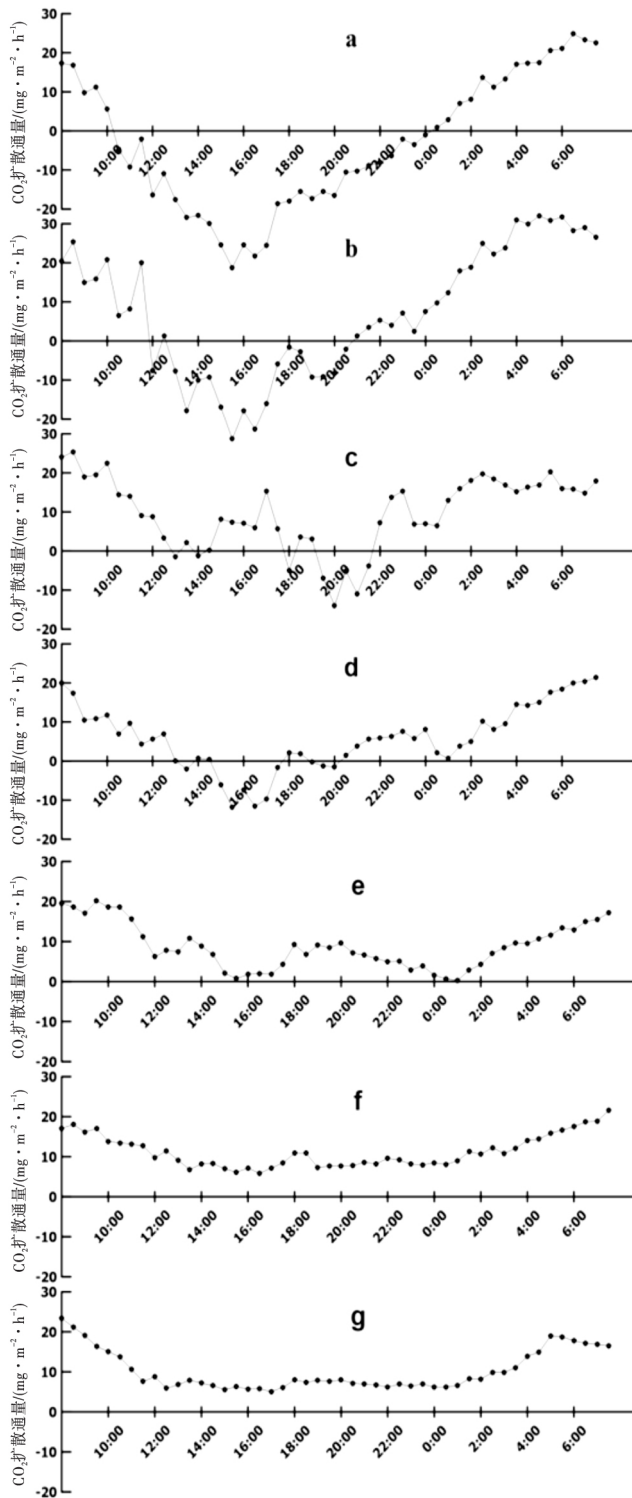
在观测前 3 d(a、b、c)天气晴朗或多云,CO<sub>2</sub> 通量从 8:00~16:00 左右总体呈下降趋势,其分别下降了 52.28 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>、50.39 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>、39.31 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>.且在 12:00~18:00 时间段内水体中的 CO<sub>2</sub> 呈吸收状态,并在 14:00 左右吸收量最大,随后通量上升,在 4:00~6:00 时间段内达到最大值.其中 11 月 24 日(a)的最大吸收量为-29.18 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,高于随后两天的-20.90 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>和-11.64 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>.在 11 月 27 日(d),大气中的 CO<sub>2</sub> 在 14:00~18:00 时间段向水体中扩散,全天最大扩散通量为 14.84 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,变幅约为 33.19 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,最大值和最小值分别为 21.36 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>和 11.83 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>.e、f、g 3 天的通量在全天均向外界扩散,最大扩散通量分别为 20.19 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>、21.58 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>和 23.37

$\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , 最小分别为  $0.30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $5.86 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  和  $5.08 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。在观测期间内, 全天通量变化幅度偏小, 分别为  $19.88 \text{ mg} \cdot$

$\text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $15.72 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $18.28 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , 仅为晴天时变化幅度的 35% 左右。

表2 观测期间天气状况表

日期	11月24日	11月25日	11月26日	11月27日	11月28日	11月29日	11月30日
天气	晴天	晴转多云	多云	小雨	小雨	阴转小雨	阴转小雨



a, b, c, d, e, f, g 依次代表 24 日~30 日的通量变化

图2 观测期间  $\text{CO}_2$  通量的昼夜变化

### 3.4 讨论

观测期间内  $\text{CO}_2$  昼夜扩散通量与环境因子的相关系数见表3。在24、25日(晴),  $\text{CO}_2$  扩散通量与气压呈显著正相关, 而与水温、pH、DO、气温呈显著负相关。在27~30日,  $\text{CO}_2$  扩散通量与叶绿素、气压、风速呈显著正相关, 与水温、气温呈显著负相关。7d中的天气变化体现了光照强度的变化, 从而间接地影响水体中的藻类进行光合作用, 消耗水体中溶解性  $\text{CO}_2$ 。在白天光合作用的强度超过了呼吸作用时,  $\text{CO}_2$  被消耗并产生氧气<sup>[16]</sup>, 导致水体中的  $\text{CO}_2$  呈不饱和状态, 导致在晴天(如图2所示)会有扩散通量呈负值的情况出现。长时间的光合作用消耗了水体中大量的溶解性  $\text{CO}_2$ , 且夜晚温度降低, 而气体在水中的溶解度与水温呈反比, 促使水体吸收更多的  $\text{CO}_2$ , 使大气中的  $\text{CO}_2$  在18:00~21:00左右仍然向水中扩散。在阴、雨天, 光照强度偏弱导致光合作用强度低, 呼吸作用速率大于光合作用速率导致产生的  $\text{CO}_2$  向大气扩散, 全天内  $\text{CO}_2$  扩散通量在6:00达到最大值并逐渐降低, 在14:00左右达到最低值随后上升。有研究指出风速是影响湖泊和海洋水-气界面温室气体通量的一个重要因素<sup>[17]</sup>, 在观测期间仅有雨天呈现出相关性, 这可能是由于城市内池塘周边的房屋建筑物等遮挡, 导致晴天风速和气流不明显, 使相关性不明显。

夜间的水温是影响  $\text{CO}_2$  排放通量的主要因素之一<sup>[18]</sup>, 晴天时夜间的水温比白天低  $0.65^\circ\text{C}$  (见表4), 在白天时  $\text{CO}_2$  扩散通量呈负值, 水体藻类的光合作用消耗了水体中的溶解性  $\text{CO}_2$ , 导致大气中的  $\text{CO}_2$  向水体中扩散, 平均扩散通量为  $-10.80 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , 夜间的平均扩散通量为  $16.80 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。雨天昼夜水温差异较大, 约  $3.59^\circ\text{C}$ , 白天  $\text{CO}_2$  通量由于光合作用强度低, 仅比夜间平均通量下降约30%, 为  $8.39 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。雨天夜间的  $\text{CO}_2$  扩散通量约为  $11.98 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , 相比与晴天时下降约28.7%, 二者的温度差为  $4.82^\circ\text{C}$ 。不同的天气、时刻会导致昼夜性的pH、气温、光照强度、气压的变化, 从而导致水体中的光合作用、呼吸作用和沉积物中的微生物酶活性的改变, 这一系列的影响导致了气体通量的昼夜性变化特征<sup>[19,20]</sup>。

表 3 CO<sub>2</sub> 昼夜性扩散通量与主要环境因子的相关系数

CO <sub>2</sub> 通量	水温	ph	DO	叶绿素	气温	风速	气压
晴	-.404**	-.503**	-.769**		-.683**		.727**
雨	-.711**		.185*	.267**	-.504**	.292**	.733**

注: \*\*表示 0.01 置信水平显著相关,\*表示 0.05 置信水平显著相关;非显著性相关数据被略去.

表 4 不同天气下昼、夜 CO<sub>2</sub> 通量和水温

时段	CO <sub>2</sub> 通量/(mg·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )		水温/℃	
	晴天	雨天	晴天	雨天
10:00~22:00	-10.80	8.39	17.71	14.74
22:00~10:00	16.80	11.98	17.06	11.15

3.5 与相关研究的比较

为了能够与其他淡水水域进行比较,本研究统计了一些不同淡水水域冬季的每日 CO<sub>2</sub> 释放通量的基本情况(见表 5)<sup>[23,25]</sup>.从表 5 可以看出,不同淡水生态系统 CO<sub>2</sub> 释放量差别很大.冬季环境温度过低,水体微生物活性微弱,本研究区的日平均 CO<sub>2</sub> 通量为 -7.09 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,高于森林池塘的 1.10 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,整体上呈微弱的 CO<sub>2</sub> 吸收状态.洱海、滇池等大型湖泊的 CO<sub>2</sub> 每日释放通量分别为 -24.38 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>和 -17.94 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,低于本研究区域.湿地池塘由于其泥炭有机质含量丰富,导致呼吸矿化作用显著<sup>[21,22]</sup>,其 CO<sub>2</sub> 最大释放量达到了 110 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,平均通量为 56.35 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,而富营养化水体同样也含有丰富的有机质,这些都直接或间接说明浅水池塘有着较高的 CO<sub>2</sub> 释放量.

表 5 不同淡水水域冬季 CO<sub>2</sub> 释放通量

研究区域	冬季每日释放通量/(mg·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )
雨养沼泽	2.87
太湖梅梁湾	-1.52
洱海	-24.38
滇池	-17.94
森林池塘	1.10
湿地池塘	56.35
富营养化冬季浅水池塘	-7.09

4 结 论

冬季的富营养化池塘的 CO<sub>2</sub> 通量具有明显的昼夜变化特征,不同的天气、时刻会导致 pH、气温、光照强度、气压的昼夜性变化,这些环境因子的周期性变化导致了 CO<sub>2</sub> 通量的昼夜性的变化规律.

观测期间 7 d 平均 CO<sub>2</sub> 扩散通量为 7.09 mg·

m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,其释放量变化范围在 -29.18~26.67 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,整体来说冬季的富营化池塘表现并不活跃.CO<sub>2</sub> 扩散通量均白天较低夜间较高,并在午间达到最小值.阴雨天表现为水体 CO<sub>2</sub> 向大气释放,在此天气时,CO<sub>2</sub> 的变化范围在 -8.02~15.82 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>之间,日平均通量为 8.81 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>.晴朗天气下,强烈的光和作用导致白天大气中的 CO<sub>2</sub> 向水体中扩散,夜间时呼吸作用占据主导,池塘表现为向大气中扩散 CO<sub>2</sub>,此天气下 CO<sub>2</sub> 的变化范围在 -29.02~26.67 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>之间,且日平均通量为 1.95 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,其 CO<sub>2</sub> 释放量远低于阴雨天气.而从此次测量结果来看夜间通量有部分呈负值,主要是由于白天光合作用消耗水体中大量的溶解性 CO<sub>2</sub>,使得夜间仍会持续向水体扩散一段时间.

参考文献:

[1] Crowley T J. Causes of Climate Change over the Past 1000 Years[J]. Science, 2000, 289(5477): 270.

[2] Holgerson M A, Raymond P A. Large Contribution to Inland Water CO<sub>2</sub> And CH<sub>4</sub> Emissions From Very Small Ponds[J]. Nature Geoscience, 2016, 9(3):222-226.

[3] Downing J A, Prairie Y T, Cole J J, et al. The Global Abundance and Size Distribution of Lakes, Ponds, and Impoundments [J]. Encyclopedia of Inland Waters, 2009,51(5):469-478.

[4] Bastien J, Demarty M, Tremblay A. CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> Diffusive and Degassing Fluxes from 2003 to 2009 at Eastmain 1 Reservoir, Quebec, Canada[J]. Inland Waters, 2011, 1(2): 113-123.

[5] Battin T J, Luyssaert S, Kaplan L A, et al. The Boundless Carbon Cycle[J]. Nature Geoscience, 2009, 2(9): 598-600.

[6] 赵佳玉, 张弥, 肖薇,等. 基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量[J]. 环境科学, 2017,38(1):41-51.

[7] Raymond P A, Hartmann J, Lauerwald R, et al. Global Carbon Dioxide Emissions from Inland Waters[J]. Nature, 2013, 503(7476): 355-359.

[8] Holgerson M A. Drivers of Carbon Dioxide and Methane Supersaturation in Small, Temporary Ponds[J]. Biogeochemistry, 2015, 124(1-3): 305-318.

- [9] Bastviken D, Cole J, Pace M, et al. Methane Emissions from Lakes: Dependence of Lake Characteristics, Two Regional Assessments, and a Global Estimate[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(4): 305-313.
- [10] Hope D, Kratz T K, Riera J L. Relationship Between  $\text{PCO}_2$  and Dissolved Organic Carbon in Northern Wisconsin Lakes [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25(6): 1442-1445.
- [11] Kankaala P, Huotari J, TOLONEN T, et al. Lake-size Dependent Physical Forcing Drives Carbon Dioxide and Methane Effluxes from Lakes in a Boreal Landscape[J]. *Limnology & Oceanography*, 2013, 58(6): 1915-1930.
- [12] Kelly C A, Fee E, Ramlal P S, et al. Natural Variability of Carbon Dioxide and Net Epilimnetic Production in the Surface Waters of Boreal Lakes of Different Sizes[J]. *Limnology & Oceanography*, 2001, 46(5): 1054-1064.
- [13] Kortelainen P, Rantakari M, Huttunen J, et al. Sediment Respiration and Lake Trophic State are Important Predictors of Large  $\text{CO}_2$  Evasion from Small Boreal Lakes[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(8): 1554-1567.
- [14] Lambert M, Fréchet J L. Analytical Techniques for Measuring Fluxes of  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  from Hydroelectric Reservoirs and Natural Water Bodies[M]. *Greenhouse Gas Emissions-Fluxes and Processes*, 2005:37-60.
- [15] 温程璐, 李 姮, 王蓬勃, 等. 藻类细胞趋光性机理研究及其显微操作技术进展[J]. *自然科学进展*, 2007, 17(2): 141-147.
- [16] Nimick D A, Gammons C H, Parker S R. Diel Biogeochemical Processes and Their Effect on the Aqueous Chemistry of Streams: A Review[J]. *Chemical Geology*, 2011, 283(1-2): 3-17.
- [17] Wanninkhof R. Relationship Between Wind Speed and Gas Exchange Over the Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1992, 97(C5): 351-362.
- [18] Gudas C, Bastviken D, Steger K, et al. Temperature-controlled Organic Carbon Mineralization in Lake Sediments[J]. *Nature*, 2010, 466(7305): 478.
- [19] Xiao S, Yang H, Liu D, et al. Gas Transfer Velocities of Methane and Carbon Dioxide in a Subtropical Shallow Pond[J]. *Tellus Series B-chemical & Physical Meteorology*, 2014, 66(1):23795.
- [20] 张 成, 龙 丽, 吕新彪, 等. 某富营养化池塘夏季温室气体通量的昼夜变化[J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(8): 28-33.
- [21] 彭凤姣, 葛继稳, 李艳元, 等. 神农架大九湖泥炭湿地  $\text{CO}_2$  通量特征及其影响因子[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(3): 453-460.
- [22] 张海宏, 李 林, 周秉荣, 等. 青藏高原高寒湿地  $\text{CO}_2$  通量特征及影响因子分析[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(1): 54-60.
- [23] 陈永根, 李香华, 胡志新, 等. 中国八大湖泊冬季水-气界面  $\text{CO}_2$  通量[J]. *生态环境学报*, 2006, 15(4): 665-669.
- [24] 王 亮, 肖尚斌, 刘德富, 等. 香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2012, 33(5): 1471-1475.
- [25] Huttunen J T, Vaisanen T S, Heikkinen M, et al. Corrigendum: Exchange of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  Between the Atmosphere and Two Northern Boreal Ponds with Catchments Dominated by Peatlands or Forests [J]. *Plant & Soil*, 2003, 256(2): 481-482.

[责任编辑 周文凯]