

2016年10~11月宜昌莲心湖水—气界面 CO₂排放通量

吴兴熠¹, 肖尚斌^{1*}, 张文丽², 李元正³, 王 炜⁴

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学生物与制药学院, 湖北 宜昌 443002;

3. 洪湖市水利勘测设计院, 湖北 荆州 433299; 4. 长江生态环保集团有限公司, 湖北 武汉 430062)

摘要: 为了解池塘水—气界面的CO₂排放通量, 于2016年10月18日~11月30日, 在湖北省宜昌市三峡大学校园内的富营养化景观池塘——莲心湖内, 采用静态浮箱法, 对水—气界面CO₂排放通量进行了观测。研究表明, 各观测日水—气界面日平均CO₂排放通量范围为-54.93~17.80 mg/(m²·h), 水体多表现为CO₂的源; CO₂排放通量日变化大致呈单谷型变化, 最大值多出现在8:00, 最小值多出现在15:00; 在少云到多云天气下, 水体昼夜几乎都表现为CO₂的汇, 日平均CO₂排放通量为(-54.93±63.76) mg/(m²·h); 在少云到小雨天气下, 水体大多表现为CO₂的源, 日平均CO₂排放通量为(6.03±21.47) mg/(m²·h); 在中雨到小雨天气下, 水体基本都表现为CO₂的源, 日平均CO₂排放通量为(3.69±2.51) mg/(m²·h)。

关键词: CO₂排放通量; 池塘; 水—气界面

中图分类号: X83 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-5948(2020)03-368-06

由于化石燃料的燃烧和土地利用方式的改变, 自工业革命以来, 全球大气中的CO₂含量增加了40%^[1]。在碳循环中, 进入湖泊和池塘的碳大部分以CO₂的形式返回大气, 而受人类活动的影响, 湖泊和池塘对CO₂排放的贡献比例发生了改变^[2-4]。由于池塘的面积较小, 很少被视为碳循环的重要组分^[5]。但是, 池塘的水较浅、周长面积比大、大气与水体之间混合频繁, 这些特性增加了CO₂在池塘水中的过饱和度, 导致池塘对碳通量的贡献很大^[6]。

在稳定的水文条件下, 随着昼夜交替, 很多生物地球化学过程在日尺度上的变化与年度尺度上的变化相当^[7]。在自然气候条件下, 水—气界面的CO₂排放通量呈现出昼夜变化, 但是, 现有的一些研究以3~4 h作为监测的间隔时间, 不能完整地表征CO₂排放通量的昼夜特征^[8]。

本研究采用静态浮箱法, 连接温室气体分析

仪, 在不同的天气条件下, 对湖北省宜昌市莲心湖水—气界面CO₂排放通量进行了观测, 以期系统地认识富营养化池塘的CO₂排放通量积累基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区

位于湖北省宜昌市三峡大学校园内的莲心湖(30°43'N, 111°19'E)是一个水体已经富营养化的景观池塘。该池塘大致呈矩形, 长为100 m, 宽为20 m, 水域面积约为2 000 m², 平均水深为1.52 m, 最大水深为1.75 m, 底泥平均厚度为5~8 cm。该池塘中的水主要来自大气降水和生活污水, 底泥富集了大量污染物, 池塘尾端有长约2 m的放水闸口, 全年水流流速极小。在实验期间, 该池塘水体中的总氮和总磷质量浓度分别为1.68 mg/L和0.09 mg/L, 叶绿素a质量浓度为85 μg/L, 水体严重

收稿日期: 2019-08-30; 修订日期: 2020-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807513)、国家自然科学基金青年基金项目(51979148)和湖北省教育厅科研计划项目(Q20151209)资助。

作者简介: 吴兴熠(1995-), 女, 汉族, 湖北省神农架人, 硕士研究生, 主要从事生态水利方面的研究。E-mail: 354389873@qq.com

*通讯作者: 肖尚斌, 教授。E-mail: shangbinx@163.com

富营养化。

1.2 监测方法

利用悬浮箱,连接G2301温室气体分析仪(Picarro,美国),在线同步监测莲心湖水—气界面的CO₂排放通量。悬浮箱由有机玻璃构成,外部附着一层隔热膜,悬浮箱内径为0.38 m,高为0.50 m^[9](图1)。悬浮箱顶部和中部分别安装了小型风扇,促进箱体内气体的混合。悬浮箱外安装高2.5 m、长和宽都为1.5 m的立方体支架,支架底部嵌于沉积物中,固定在池塘中心。

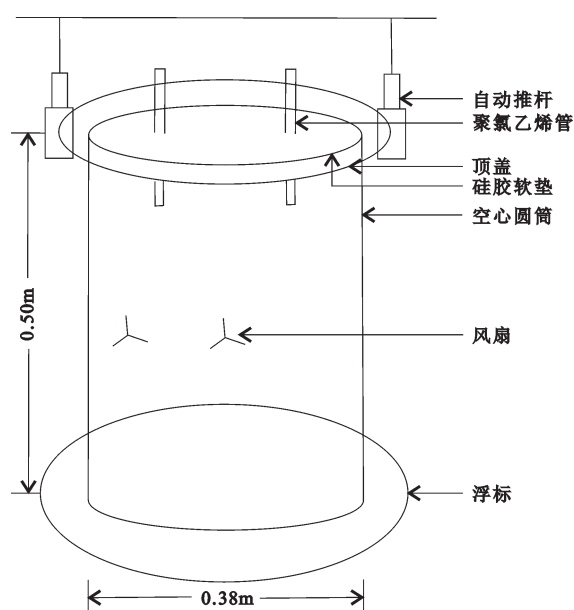


图1 悬浮箱结构示意图

Fig.1 The sketch map of the static floating chamber

于2016年10月18日~11月30日,采用静态悬浮箱法,测定莲心湖水—气界面的CO₂排放通量。由于仪器故障,10月21~22日和10月28日~11月2日的数据缺失,共得到36 d的CO₂排放通量数据。在每个监测日的8:00~次日8:00期间的整点时间,测定CO₂排放通量,单次测量时间为30 min,包括25 min的分析仪测量时间和5 min的自动推杆升起顶盖后箱体内气体与大气交换的时间。根据CO₂气体浓度随时间的变化率,计算箱体所覆盖范围内水—气界面CO₂气体交换速率。

分别于11月8~9日、15~16日和20~21日,对水环境因子进行了测定。在距离悬浮箱2 m、水深约为1.6 m的栈桥处,每隔30 min,利用Hydro-lab DS5 (HACH,美国)多参数水质分析仪,测定水下约20 cm处的水温、pH、溶解氧含量和叶绿素a

含量。同时,利用手持气象站(YGY-QXY,武汉),测定气温、风速、湿度和气压。利用有机玻璃采水器,采集水样,带回实验室;在实验室中,采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法和钼酸铵分光光度法,分别测定水样的总氮和总磷含量。

1.3 水—气界面CO₂排放通量计算

当悬浮箱内没有气泡或只有很少的气泡时,箱体內的CO₂浓度会随着时间逐渐增大或减小,时间与气体浓度线性相关^[10]。因此,采用线性回归分析方法^[11],计算CO₂释放速率和排放通量。CO₂排放通量的计算公式为:

$$F=(\alpha \times F_1 \times F_2 \times V)/(S \times F_3) \quad (1)$$

公式(1)中, F [mg/(m²·h)]为CO₂排放通量; α (10⁻⁶/min)为悬浮箱内气体通量的变化率; F_1 为CO₂排放的转化系数,为1 798.45 μ g/m³; F_2 为小时到分钟的转化系数,为60; V (m³)为悬浮箱的体积; S (m²)为悬浮箱的底面积; F_3 为微克到毫克的转化系数,为1 000。

2 结果与分析

2.1 主要环境指标

在气象指标观测期间,莲心湖区的气温为3.51~20.20 $^{\circ}$ C,气压稳定,平均风速为0.00~1.67 m/s,池塘水体为碱性(表1)。受气温影响,11月8~9日的水温较低;11月8~9日和15~16日水中溶解氧含量相对稳定,11月20~21日其变化幅度较大;叶绿素a质量浓度为24.79~170.09 μ g/L。

2.2 日平均CO₂排放通量

各观测日日平均CO₂排放通量范围为-54.93~17.80 mg/(m²·h)(表2)。

受天气条件影响,不同观测日日平均CO₂排放通量变化情况较为复杂,无明显的变化规律且变化幅度较大。

2.3 不同天气条件下CO₂排放通量日变化

水—气界面CO₂排放通量的日变化明显受天气条件的影响。选择11月8~9日、15~16日和20~21日,其天气条件分别为少云到小雨、少云到多云和中雨到小雨天气,分析不同天气条件下CO₂排放通量的日变化。

在少云到小雨天气的11月8~9日,日照时数为0 h,降水量为0.2 mm,24 h内莲心湖多表现为CO₂的源(图2a)。12:00的水—气界面CO₂排放通

表1 各观测日的主要环境指标

Table 1 The main environmental factors on different observation days

观测日期	统计值	气温(°C)	水温(°C)	水体pH	水体中溶解氧 质量浓度(mg/L)	水体中叶绿素a 质量浓度(μg/L)	风速(m/s)	气压(kPa)
11月8~9日	最大值	8.35	9.36	9.41	20.87	151.31	0.98	102.11
	最小值	3.51	8.13	8.55	18.17	45.78	0.00	101.60
	平均值	5.47	8.64	9.19	19.34	97.38	0.11	101.88
	标准差	1.52	0.32	0.13	0.72	28.37	0.21	0.14
	变异系数	0.28	0.04	0.01	0.04	0.29	1.91	0.00
11月15~16日	最大值	20.20	21.48	9.94	16.21	105.64	1.67	101.65
	最小值	15.10	13.22	8.35	11.45	24.79	0.00	100.96
	平均值	16.81	16.28	9.29	13.71	62.98	0.26	101.28
	标准差	1.68	2.42	0.38	1.11	21.36	0.41	0.20
	变异系数	0.10	0.15	0.04	0.08	0.34	1.58	0.00
11月20~21日	最大值	18.12	17.78	9.73	25.72	170.09	0.71	101.21
	最小值	14.30	16.20	7.88	7.79	48.52	0.00	100.57
	平均值	16.25	16.93	8.76	15.58	96.46	0.11	100.92
	标准差	0.94	0.40	0.57	5.35	24.90	0.18	0.20
	变异系数	0.06	0.02	0.07	0.34	0.26	1.64	0.00

表2 各观测日日平均CO₂排放通量

Table 2 Daily average carbon dioxide emission flux for each observation day

观测时间	天气条件 [云量,降水量(mm)]	日平均CO ₂ 排放通量 [mg/(m ² ·h)]	观测时间	天气条件 [云量,降水量(mm)]	日平均CO ₂ 排放通量 [mg/(m ² ·h)]
10月18日	多云(6成,0)	-8.25	11月13日	少云(5成,0)	-20.18
10月19日	阴(8成,0)	-1.43	11月14日	阴(8成,0)	17.80
10月20日	小雨(8成,8.2)	6.83	11月15日	少云(4成,0)	-54.93
10月23日	小雨(8成,1.4)	5.44	11月16日	多云(7成,0)	7.35
10月24日	小雨(8成,0.1)	-0.24	11月17日	小雨(8成,1.2)	1.50
10月25日	少云(5成,0)	-7.53	11月18日	少云(5成,0)	-16.93
10月26日	少云(4成,0)	-11.45	11月19日	多云(7成,0)	-9.32
10月27日	小雨(8成,5.0)	5.22	11月20日	中雨(8成,16.3)	3.69
11月3日	少云(5成,0)	-18.85	11月21日	小雨(8成,1.0)	3.47
11月4日	阴(8成,0)	11.14	11月22日	阴(8成,0)	6.50
11月5日	阴(8成,0)	16.04	11月23日	小雨(8成,0.3)	6.92
11月6日	小雨(8成,5.8)	6.17	11月24日	多云(7成,0)	-2.77
11月7日	多云(6成,0)	-9.72	11月25日	小雨(8成,0.1)	6.30
11月8日	少云(5成,0)	-13.41	11月26日	多云(7成,0)	7.24
11月9日	小雨(8成,0.2)	6.03	11月27日	少云(5成,0)	3.70
11月10日	阴(8成,0)	16.77	11月28日	少云(5成,0)	1.37
11月11日	晴(3成,0)	-48.03	11月29日	小雨(8成,1.3)	10.45
11月12日	多云(7成,0)	3.18	11月30日	阴(8成,0)	8.27

量增大到一天中的最大值,为31.89 mg/(m²·h),此后CO₂排放通量迅速减小,17:30达到一天中的最小值,为-35.29 mg/(m²·h),17:30至次日2:30水—气界面CO₂排放通量整体上升,次日2:30~8:00期间,水—气界面CO₂排放通量在17.19~30.25 mg/(m²·h)范围内波动变化。日平均CO₂排放通量为(6.03±21.47) mg/(m²·h)。

在少云到多云天气的11月15~16日,日照时数为3.9 h,降水量为0 mm,24 h内莲心湖多表现为CO₂的汇(图2b)。8:00~15:30,水—气界面

CO₂排放通量从最大值20.79 mg/(m²·h)减小至最小值-191.44 mg/(m²·h),此后至次日8:00,CO₂排放通量逐渐增大。日平均CO₂排放通量为(-54.93±63.76) mg/(m²·h)。

在中雨到小雨天气的11月20~21日,日照时数为0 h,降水量为16.3 mm,24 h内莲心湖都表现为CO₂的源(图2c)。8:00~17:00,水—气界面CO₂排放通量从最大值10.12 mg/(m²·h)波动减小至最小值0.12 mg/(m²·h),17:00至次日8:00水—气界面CO₂排放通量缓慢波动增加。日平均CO₂

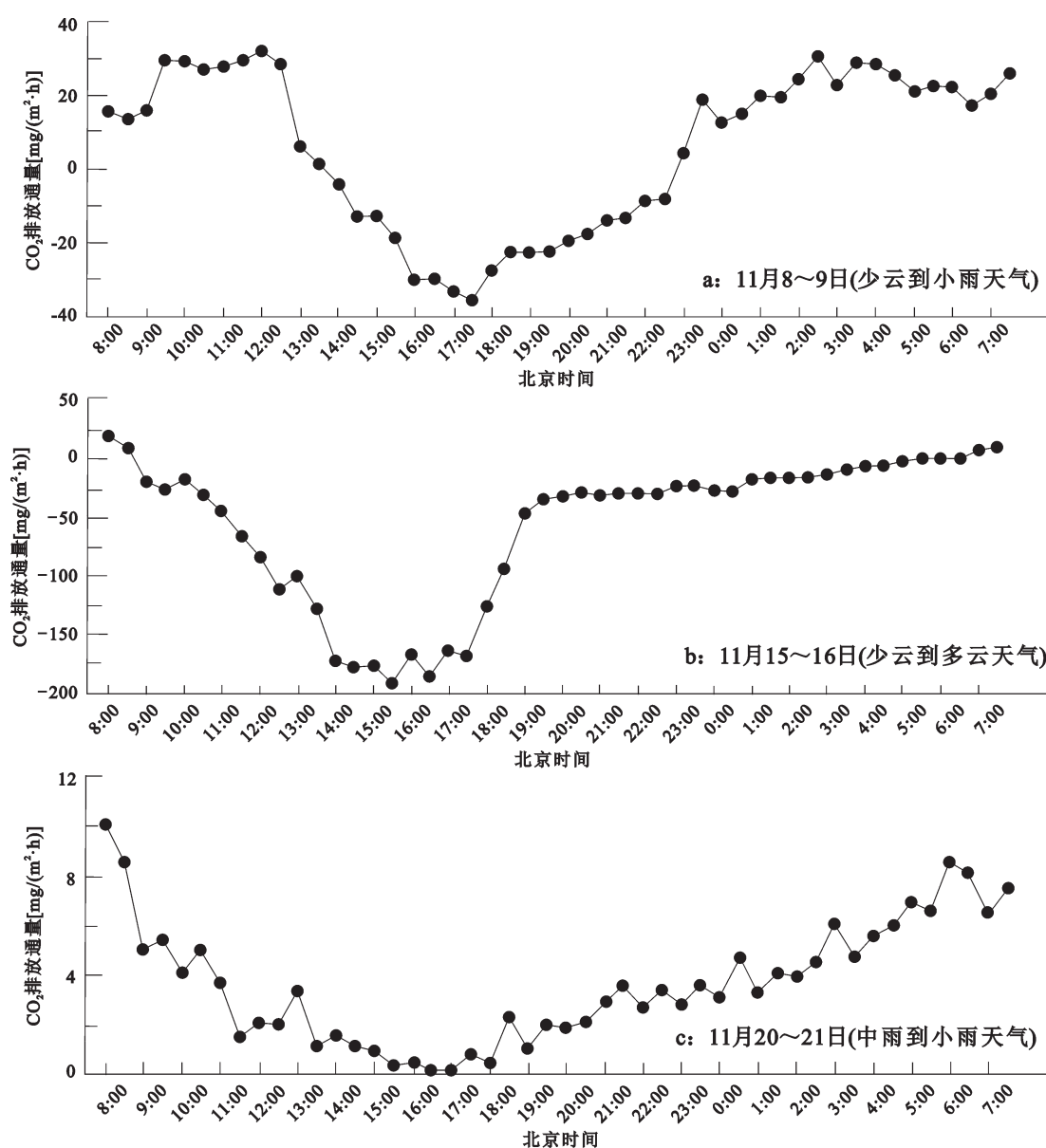


图2 少云到小雨(a)、少云到多云(b)和中雨到小雨(c)天气条件下CO₂排放通量的日变化

Fig.2 Daily variation of carbon dioxide emission flux on the partly cloudy to light rainy day (a), partly cloudy to cloudy day (b) and moderate rainy to light rainy day (c)

排放通量为 $(3.69 \pm 2.51) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

根据日出、日落情况,将6:45~17:45划分为白天,17:45至次日6:45划分为夜晚。在不同天气条件下,夜晚的 CO_2 排放通量平均值都高于白天(表3)。

表3 不同天气条件下昼夜 CO_2 排放通量

Table 3 Statistics of carbon dioxide emission flux under different weather conditions during the day and night

观测日期	CO_2 排放通量 $[\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$	
	白天(6:45~17:45)	夜晚(17:45~次日6:45)
11月8~9日	5.01 ± 23.10	6.20 ± 19.97
11月15~16日	-87.90 ± 78.96	-25.49 ± 27.96
11月20~21日	3.47 ± 3.26	4.05 ± 2.07

3 讨论

晴天,太阳辐射较强,水生生物可以充分进行光合作用,消耗了水中的 CO_2 ^[12]。在本研究中,当日照条件良好时,莲心湖水体几乎都表现为 CO_2 的汇。因为自9:00开始,太阳辐射逐渐增强,水中的浮游植物光合作用增强,吸收 CO_2 的量增大;14:00~17:30太阳辐射仍较强,溶解氧含量处于一天中的较高水平,水—气界面 CO_2 排放通量则持续较低;17:30后太阳辐射逐渐减弱,水生生物光合作用减弱,呼吸作用增强,水—气界面 CO_2 排放通量开始逐渐增大,在5:30逐渐转为 CO_2 的源。在少云到小雨天气条件下,因太阳辐射较弱,浮游植物的光合作用较弱,此时呼吸作用占主导,导致水体中 CO_2 浓度增加;在中雨到小雨天气条件下,水—气界面 CO_2 排放通量日变化规律与少云到小雨天气条件下基本相似,水体基本为 CO_2 的源。

4 结论

2016年10月18日~11月30日,湖北省宜昌市莲心湖水体日平均 CO_2 排放通量为 $-54.93 \sim 17.80 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, CO_2 排放通量日变化呈单谷型变化, CO_2 排放通量最大值多出现在8:00,最小值多出现在15:00,水体多表现为 CO_2 的源。

天气状况是影响水—气界面 CO_2 排放通量日变化的重要因素。在少云到多云天气条件下,水体昼夜几乎都为 CO_2 的汇;在少云到小雨天气条

件下,大部分时间水体为 CO_2 的源;在中雨到小雨天气条件下,水体基本为 CO_2 的源。

参考文献

- [1]IPCC. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Summary for Policymakers[R/OL]. 2013-10-28.
- [2]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[J]. 湿地科学, 2012, **10**(2): 235-242.
- [3]AUFDENKAMPE A K, MAYORGA E, RAYMOND P A, *et al.* Riverine coupling of biogeochemical cycles between land, oceans, and atmosphere[J]. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 2011, **9**(1): 53-60.
- [4]STETS E G, STRIEGL R G, AIKEN G R, *et al.* Hydrologic support of carbon dioxide flux revealed by whole-lake carbon budgets [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, **114**(G1): G01008.
- [5]HOLGERSON M A, RAYMOND P A. Large contribution to inland water CO_2 and CH_4 emissions from very small ponds[J]. *Nature Geoscience*, 2016, **9**(3): 222-226.
- [6]COLE J J, PRAIRIE Y T, CARACO N F, *et al.* Plumbing the Global Carbon Cycle: Integrating Inland Waters into the Terrestrial Carbon Budget[J]. *Ecosystems*, 2007, **10**(1): 171-184.
- [7]王洋,刘景双,孙志高,等. 湿地系统氮的生物地球化学研究概述[J]. 湿地科学, 2006, **4**(4): 311-320.
- [8]RENATA G R, LILIANNA B, PIOTR K. The influence of environmental factors on the carbon dioxide flux across the water-air interface of reservoirs in south-eastern Poland[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017(6): 290-299.
- [9]于国熙,李元正,张军伟,等. 水气界面无扰动全自动通量箱[P]. 2017-03-15.
- [10]MCGILLIS W R, EDSON J B, WARE J D, *et al.* Carbon dioxide flux techniques performed during GasEx- 98[J]. *Marine Chemistry*, 2001, **75**(4): 267-280.
- [11]LAMBERT M, JEANLOUIS Fréchet. Analytical Techniques for Measuring Fluxes of CO_2 and CH_4 from Hydroelectric Reservoirs and Natural Water Bodies[M]. Heidelberg: Springer, Berlin, 2005: 37-60.
- [12]邹定辉. 潮间带海藻光合作用及其与大气 CO_2 浓度升高关系的研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2001.
- [13]刘凯,杨继松,袁晓敏,等. 辽河口盐沼和光滩 CO_2 排放通量及其影响因素[J]. 湿地科学, 2017, **15**(6): 855-861.
- [14]付晓泰,王振平,卢双舫. 气体在水中的溶解机理及溶解度方程[J]. 中国科学: 化学(中文版), 1996, **26**(2): 124-130.
- [15]程炳红,郝庆菊,江长胜. 水库温室气体排放及其影响因素研究进展[J]. 湿地科学, 2012, **10**(1): 121-128.
- [16]严国安,刘永定. 水生生态系统的碳循环及对大气 CO_2 的汇

- [J]. 生态学报, 2001, **21**(5): 827-833.
- [17]张发兵, 胡维平, 杨龙元. 太湖春季水—气界面碳通量日变化观测研究[J]. 生态环境, 2004, **13**(2): 186-190.
- [18]DUCHEMIN E, LUCOTTE M, CANUEL R, *et al.* Production of the greenhouse gases CH₄ and CO₂ by hydroelectric reservoirs of the boreal region[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1995, **9** (4): 529-540.
- [19]安克敬. 水体中溶解氧的含量变化及相关问题[J]. 生物学教学, 2005, **30**(6): 70-71.
- [20]PAASCHE E. On the Relationship between Primary Production and Standing Stock of Phytoplankton[J]. ICES Journal of Marine Science, 1960, **26**(1): 33-48.

Carbon Dioxide Emission Flux of Water-Air Interface of Lianxinhu in Yichang from October to November, 2016

WU Xingyi¹, XIAO Shangbin¹, ZHANG Wenli², LI Yuanzheng³, WANG Wei⁴

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, P.R.China;
2. College of Biotechnology & Pharmaceutical Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, P.R.China;
3. Honghu Water Resources Survey and Design Institute, Jingzhou 433299, Hubei, P.R.China; 4. Yangtze Ecology and Environment Co. Ltd., Wuhan 430062, Hubei, P.R.China)

Abstract: In order to understand the CO₂ emission flux of water-air interface of pond, a field experiment was carried out in Lianxinhu in China Three Gorges University in Yichang, Hubei province by static pontoon method from October 18 to November 30, 2016. The results showed that during the monitoring period, the mean daily CO₂ emission fluxes were $-54.93-17.80 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, and the water was a source of CO₂ for the atmosphere most of the experiment periods. The CO₂ emission flux changed as a single valley within 24 hours. Most of the maximum and minimum flux values were appeared at 8 : 00 and 15 : 00, respectively. On the partly cloudy to cloudy day, the water was almost a sink of atmospheric CO₂ all day long, while on the partly cloudy to light rainy day, it became a source of atmospheric CO₂, with the mean values of CO₂ emission flux which were $(-54.93 \pm 63.76) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ and $(6.03 \pm 21.47) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. In addition, the pond was a source of atmospheric CO₂ on the moderate rainy to light rainy day on the whole with the mean values of CO₂ emission flux which was $(3.69 \pm 2.51) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$.

Keywords: carbon dioxide emission flux; pond; water-air interface