

太湖藻型湖区 CH_4 、 CO_2 排放特征及其影响因素分析

贾磊, 蒲旖旎, 杨诗俊, 苏荣明珠, 秦志昊, 张弥*

(南京信息工程大学气候与环境变化国际合作联合实验室大气环境中心, 南京 210044)

摘要: 为明确太湖藻型湖区温室气体 CH_4 、 CO_2 排放特征及其影响因素, 本研究利用便携式温室气体分析仪改进的静态箱法, 对太湖梅梁湾春、夏季的 CH_4 、 CO_2 通量进行观测, 并分析其影响要素. 主要结果为: 观测地点春、夏季 CH_4 、 CO_2 通量具有明显日变化动态. 春季, CH_4 通量白天大于夜间, 夏季夜间大于白天; 春、夏季, CO_2 吸收通量均白天大于夜间. 梅梁湾藻型湖区春、夏季为 CH_4 源, 且 CH_4 释放通量在夏季明显高于春季, 春、夏季的平均通量分别为 $4.047 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 和 $40.779 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$; 该区域春、夏季为 CO_2 汇, 且春季 CO_2 吸收大于夏季, 春、夏季的平均通量分别为 $-0.160 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 和 $-0.033 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$. 在小时尺度上, CH_4 释放通量与气温和水温呈显著正相关 ($r=0.20$, $P<0.01$; $r=0.34$, $P<0.01$), 当风速 $<6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 与风速呈显著正相关 ($r=0.71$, $P<0.01$); CO_2 吸收通量与气温和风速呈显著正相关 ($r=0.14$, $P<0.01$; $r=0.33$, $P<0.05$), 与气压和太阳辐射呈显著负相关 ($r=-0.41$, $P<0.01$; $r=-0.35$, $P<0.01$); CO_2 释放通量与风速呈显著正相关 ($r=0.40$, $P<0.05$), 与太阳辐射呈显著负相关 ($r=-0.35$, $P<0.01$). 在日尺度上, CH_4 释放通量与水温呈显著正相关 ($r=0.83$, $P<0.01$; $r=0.78$, $P<0.01$).

关键词: 太湖藻型湖区; 静态箱法; 温室气体; 通量; 排放特征; 影响因素

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-2316-14 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201708123

Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Their Influencing Factors in the Algae Zone of Lake Taihu

JIA Lei, PU Yi-ni, YANG Shi-jun, SU Rong-ming-zhu, QIN Zhi-hao, ZHANG Mi*

(Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, International Joint Laboratory on Climate and Environment Change (ILCEC), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to identify CH_4 and CO_2 emission flux characteristics and their impact factors in the algal lake zone of Lake Taihu, CH_4 and CO_2 fluxes were observed by the improved closed chamber method in Meiliang Bay in Lake Taihu. The relationships between CH_4 and CO_2 flux and meteorological factors were analyzed. The results showed that CH_4 and CO_2 fluxes had obvious diurnal variations. The CH_4 flux in the daytime was higher than that in the nighttime in spring; however, the CH_4 flux in the nighttime was higher than that in the daytime in summer. The CO_2 uptake flux in the daytime was higher than that in the nighttime in spring and summer. The algae zone of Lake Taihu was a CH_4 source for the atmosphere. The average CH_4 flux was $4.047 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ and $40.779 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ in spring and summer, respectively. The zone was the CO_2 sink for the atmosphere in spring and summer. The average CO_2 flux was $-0.160 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ and $-0.033 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ in spring and summer, respectively. On an hourly scale, the CH_4 emission flux was positively correlated with air temperature and water temperature ($r=0.20$, $P<0.01$ and $r=0.34$, $P<0.01$, respectively). When wind speed was lower than $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the CH_4 flux was positively correlated with wind speed ($r=0.71$, $P<0.01$). The CO_2 uptake flux had a significant positive correlation with air temperature and wind speed ($r=0.14$, $P<0.01$ and $r=0.33$, $P<0.05$, respectively). However, the CO_2 uptake flux was negatively correlated with air pressure and solar radiation ($r=-0.41$, $P<0.01$ and $r=-0.35$, $P<0.01$, respectively). The CO_2 efflux had a significant positive correlation with wind speed ($r=0.40$, $P<0.05$). The CO_2 efflux was negatively correlated with solar radiation ($r=-0.35$, $P<0.01$). On a daily scale, the CH_4 emission flux had a significant positive correlation with air temperature and water temperature ($r=0.83$, $P<0.01$ and $r=0.78$, $P<0.01$, respectively).

Key words: algal lake zone of Lake Taihu; closed chamber; greenhouse gases; flux; emission characteristics; influencing factors

IPCC 第五次报告指出, 大气中对全球温室效应贡献率最高的温室气体 CO_2 、 CH_4 在大气中的体积分数已经达到 391×10^{-6} 、 1803×10^{-9} , 这是过去 80 万年以来前所未有的水平^[1]. 温室气体增加导致的温室效应造成全球表面平均温度普遍上升, 自然灾害和极端天气现象频发, 给人类生存和社会发展带来严重威胁. 研究发现, 湖泊相对大气 CO_2

通常是过饱和的, 在大气碳循环中扮演着“源”的角色^[2], 并且, 湖泊也是大气 CH_4 的重要来源^[3], 因此, 湖泊与大气间的温室气体交换已经受到了全球

收稿日期: 2017-08-15; 修订日期: 2017-11-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41575147)

作者简介: 贾磊(1993~), 男, 主要研究方向为地-气交换, E-mail: 13062527289@163.com

* 通信作者 E-mail: zhangm.80@nuist.edu.cn

广泛的关注。

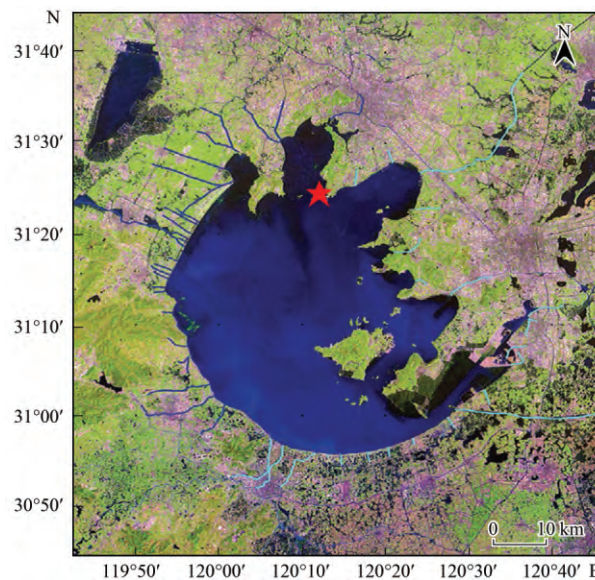
要获得湖泊与大气之间 CO₂、CH₄ 交换的准确信息,需要行之有效的观测方法。目前,湖泊 CO₂、CH₄ 通量的观测方法有水平衡方法、箱式法以及微气象学方法^[4]。其中,静态箱-气相色谱法以能同时观测多种气体的通量、精度高、采样点设置较为灵活等优点,得到了广泛的应用。传统的静态箱-气相色谱方法通过在水面扣置一个顶部密闭、底部中通的箱体,每隔一段时间人工收集箱体内的气体并使用气相色谱仪测量得到温室气体的浓度,根据浓度随时间的变化率求得温室气体的通量。在对武汉东湖、太湖、中国八大湖泊、Shingobee Lake、Katanuma Lake、Daming Lake 等研究中均采用了静态箱-气相色谱法^[5-10]。但该方法存在一定的局限:在取样时采用人工操作,可能导致不同程度的人为误差;将气体样本送至实验室进行分析的过程中,气体样本成分可能因保存不善、泄漏而发生改变,导致最终计算得到的通量结果产生误差;采样过程与气体浓度分析过程分离,无法得到实时连续的温室气体通量信息。因此,利用可自动观测温室气体浓度的分析仪替代气相色谱对静态箱-气相色谱法进行改进,实现温室气体 CO₂、CH₄ 实时原位连续观测,从而得到湖泊与大气之间连续的 CO₂、CH₄ 通量信息,这对于明确湖泊 CO₂、CH₄ 通量的时间变化动态,特别是日变化动态是十分必要的。

我国五大淡水湖之一的太湖,是典型的亚热带大型浅水湖泊,湖泊面积 2 427.8 km²^[11]。太湖处在经济发达、人口稠密的长江中下游地区,是该地区主要生活生产用水取水地^[12]。近年来,由于人为造成的工业和生活污染,太湖富营养状态严峻,蓝藻暴发严重。当水体中溶解氧充足时,有机质分解产生 CO₂,待溶解氧耗尽后,有机物可被水中厌氧微生物进行分解从而产生大量 CH₄,尤其是在底泥的厌氧条件中^[13]。明确太湖,特别是受污染严重的藻型湖区温室气体 CH₄、CO₂ 排放特征及其影响因素是准确估算太湖流域温室气体通量的重要基础。因此,本研究选择地处太湖富营养化较为严重的藻型湖区的梅梁湾为观测站点,基于便携式温室气体分析仪改进的静态箱法,对该区域春、夏季水-气界面 CH₄ 和 CO₂ 通量进行观测,从而得到该区域 CH₄ 和 CO₂ 排放特征及气象要素对其的影响,以期评价湖泊富营养化对 CH₄、CO₂ 排放的影响提供一定的理论支持,同时也为其他富营养化湖泊温室气体排放研究提供方法借鉴和参考。

1 材料与方法

1.1 观测站点概况

本研究观测地点设在中国科学院南京地理与湖泊研究所太湖湖泊生态系统研究站的栈桥附近(31°21′00″N, 120°10′57″E),该地点位于太湖梅梁湾湖区,离岸大约 300 m(图 1)。梅梁湾是太湖北部一个半封闭的大湖湾,南北长约 14 km,东西宽约 7 km,水域面积 120 km²^[14],平均水深 2.45 m^[15]。太湖处于北亚热带向中亚热带过渡的东南季风气候区,夏季温暖多雨,多偏南风,冬季寒冷干燥,多偏北风。太湖年平均气温 16.5 ~ 17.1℃,最高温度出现在 7 或 8 月,最低温度出现在 1 月;年平均降水量 931.1 ~ 1 376 mm;年累计日照时数 1 630.2 ~ 1 846.4 h^[12];梅梁湾湖区湖水平均温度 18℃^[15]。该湖区是典型的富营养化藻型湖区,其周边有两条较大的入湖河流——直湖港和武进港,给该区带来较大外源碳输入。



★标注观测点的位置

图 1 采样点位置^[16]

Fig. 1 Location of the observation site

1.2 静态箱的改进与观测

本研究基于静态箱通量观测原理,对箱体内存体的测量方法进行了改进,采用便携式温室气体分析仪(915-0011-CUSTOM, Los Gatos Research, SF, USA)(LGR)对箱体内 CH₄、CO₂ 浓度进行在线实时测量。LGR 可以同时测定 CH₄ 和 CO₂ 的浓度,该仪器对两种气体 100 s 测量精度分别为体积分数 0.6 × 10⁻⁹ 和 100 × 10⁻⁹。

本研究对静态箱的设计改进如图 2 所示。箱体

采用有机玻璃板粘合成的长方体箱体(长 50 cm × 宽 50 cm × 高 30 cm); 采用高密度泡沫板提供浮力使箱体漂浮在水面上; 箱体内顶部装有风扇, 风扇与箱底之间夹角 45°, 用以使箱体中气体混合均匀; 进气管和出气管被粘贴固定在箱体内顶部, 分别连通 LGR 进气口和出气口, 即在持续抽出箱体内部的气体进行分析的同时将分析后的气体通过管道排回箱体内, 以保证箱体内部环境不因 LGR 的分析过程而改变, 从而实现 CH₄、CO₂ 浓度的实时测量. 同时, 为防止箱内气体积累导致水-气界面气体交换受阻以及箱内温湿条件与箱外差异过大, 每隔一段时间利用箱体上加装的气囊将箱体掀起, 使之与外界环境进行气体交换. 气囊连通气泵进行充气 and 抽气, 气囊充气后, 箱体掀开, 箱内与外界大气进行气体交换, 气囊抽气后, 箱体扣下, 保证箱体与水面之间完全密封; 箱体外表使用锡箔胶带覆盖, 用于阻挡太阳辐射, 避免箱内温度与外界差异过大. 图 3 显示了利用改进的静态漂浮箱在观测点进行观测时的情景.

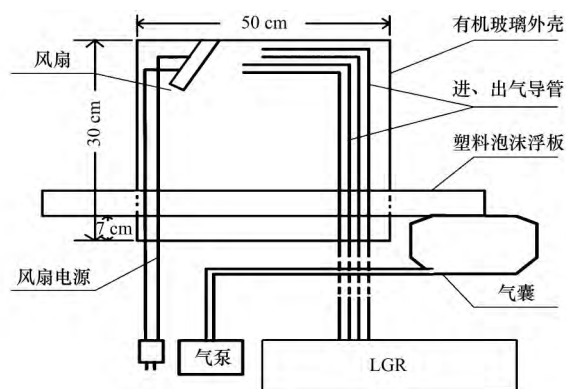


图2 静态箱示意

Fig. 2 Schematic diagram of the floating chamber

本研究选择微生物活跃、浮游植物生长旺盛的春、夏季开展试验. 春季试验观测时间为2017年4月14~25日, 连续12 d 观测. 观测期间除4月的16、19、21日晚间有小雨, 其余时间天气基本晴朗, 风浪较大, 4月18、22日出现水面被大量蓝藻覆盖的现象. 夏季试验观测时间为2016年8月25~29日, 连续5 d 观测. 观测期间天气晴朗或多云, 水中蓝藻生长旺盛. 除因大风、降雨存在缺测外, 试验均是全天24 h 观测. 本试验每间隔1 h, 通过给气囊充气使箱体掀开, 当LGR测定的箱体内CH₄、CO₂浓度趋于稳定时, 即认为箱体内气体与大气混合均匀. 之后, 通过给气囊抽气使箱体扣下并与水面贴合.



图3 实际观测

Fig. 3 Actual observation

1.3 通量计算

将静态箱扣置于水面上, 通过测定一段时间间隔内箱内气体浓度的变化量从而计算得到温室气体的通量, 计算公式如下:

$$F = \frac{(c_2 - c_1) \cdot h}{t \cdot V_m} \quad (1)$$

式中, F 为气体通量, 其中 CO₂ 通量单位 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, CH₄ 通量单位 $\text{nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$; c_1 、 c_2 为 t_1 、 t_2 时刻的气体浓度, 单位 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$; t 为 $t_2 - t_1$ 的时间间隔, 单位 s; h 为箱体高度, 单位 m, 本研究箱体高度为 0.3 m; V_m 为气体摩尔体积, 本研究取 $V_m = 22.4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$.

LGR 的原始采样频率为 1 Hz, 首先计算每分钟浓度的平均值. 然后选取连续 3 点做线性回归, 求出回归直线的 R^2 , 并依次滑动进行回归, 直到 $R^2 < 0.9$, 其后的点则被认为由于箱体内气体积累造成误差. 选取该点之前的数据以 3 min 为时间间隔, 利用公式(1), 计算得到 3 min 内气体平均通量. 再用整点或半点时刻前后各 15 min 共 30 min 的通量数据进行平均, 得到该整点或半点的通量数据, 最终得到每半小时的 CH₄ 和 CO₂ 通量时间序列.

1.4 其他观测数据

梅梁湾站点安装有小气候观测系统仪器 (Dynakmet, Dynamax Inc., Houston, TX, USA), 可以同时获取气温、风速和辐射等气象数据, 仪器位

于栈桥中部,距离静态箱约 50 m. 同时站点还安装有水温计(109-L, Campbell Scientific Inc. Logan, UT, USA)用以获取 20、50、100、150 和 200 cm 处的水温数据^[12]. 本文所使用的是 20 cm 处的水温数据. 这些观测数据用于后续分析温室气体 CH_4 、 CO_2 通量与气象因子的关系.

2 结果与分析

2.1 CH_4 通量的时间变化特征

2.1.1 春季 CH_4 通量日变化

春季 CH_4 通量的日变化动态如图 4 所示. CH_4 通量大部分集中在 $0.1 \sim 100 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 最大值为 $171.222 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 出现在 4 月 25 日 07:30, 最小值为 $0.015 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 出现在 4 月 24 日 02:00. 观测期间每日的峰值出现在 07:00 ~ 09:00, 每日的谷值出现在 18:00 左右. 并且白天的 CH_4 通量大于夜间. 此外, 观测期间 CH_4 通量波动明显, 特点是波动频率低但对于整体通量的贡献大. 在观测期间, 有 95% 的时间 CH_4 通量 $< 12.000 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 仅有 5% 的时间 CH_4 通量 $> 12.000 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 如 4 月 24 日 18:30, 但这

部分高值对整个通量的贡献可达 64.86%. 出现该现象说明有冒泡形式排放的甲烷, 导致通量突然增加. 冒泡是水-气界面 CH_4 释放的 3 种主要形式之一, 另外两种为扩散和植物介导, 因采样点无大型挺水植被生长, CH_4 则主要以扩散和冒泡两种形式排放. CH_4 冒泡排放随机出现且不连续, 但通量往往较高, 对整个 CH_4 通量贡献很大, 因此, 当冒泡产生时, 会导致通量的突然增加.

通过春季多日平均 CH_4 通量日变化动态图可以看出(图 5), CH_4 在全天均呈现释放状态, 且通量存在昼夜差异. 将 06:00 ~ 18:00 定为白天, 其余时间定为夜间, 计算得到白天和夜间的 CH_4 平均通量分别为 $5.610 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 和 $2.647 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 白天占全天 CH_4 释放的 67.94%, 夜间占 32.06%, 可见 CH_4 白天通量大于夜间. 其中, 03:00 ~ 11:30、15:30 ~ 24:00 这两个时间段由于存在冒泡排放, 导致 CH_4 通量出现了高值和波动. 此外, 在昼夜过渡时期由于湖水上层温度低, 下层温度高, 这种热力差异导致湖水垂直运动, 进而导致 CH_4 冒泡增加, 通量波动较大. 12:00 ~ 15:00 以及 00:00 ~ 03:00 期间

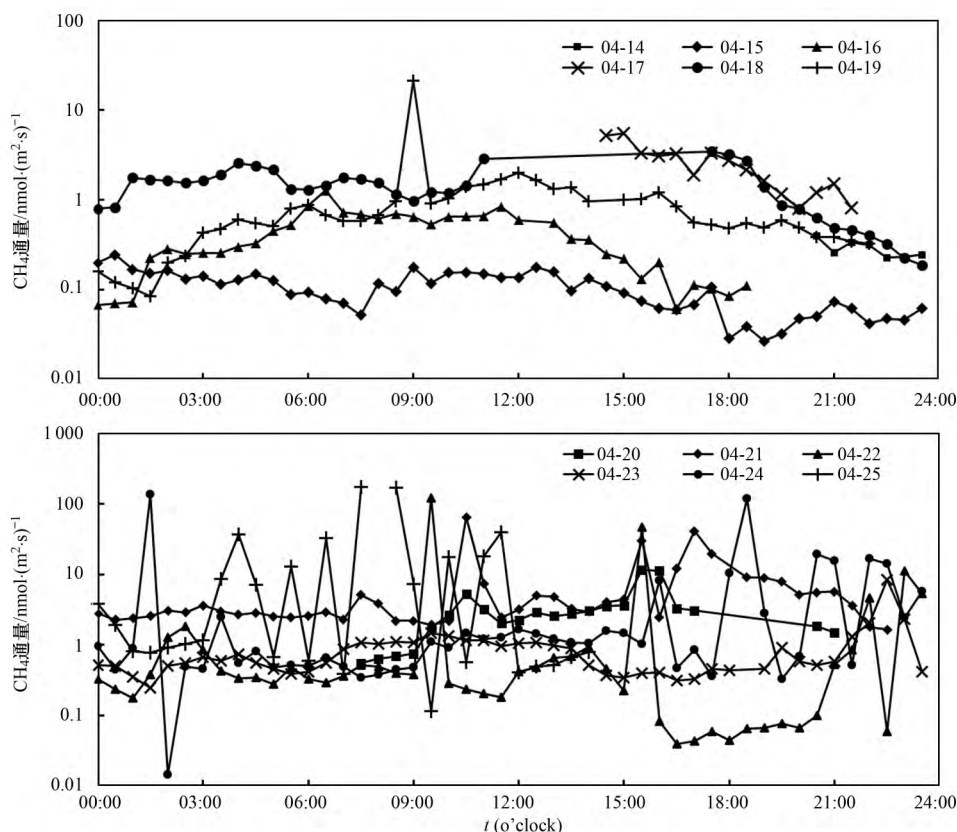


图 4 2017 年 4 月 14 ~ 25 日太湖梅梁湾 CH_4 通量日变化

Fig. 4 Diurnal variation of CH_4 flux at the MLW site in Lake Taihu from April 14-25, 2017

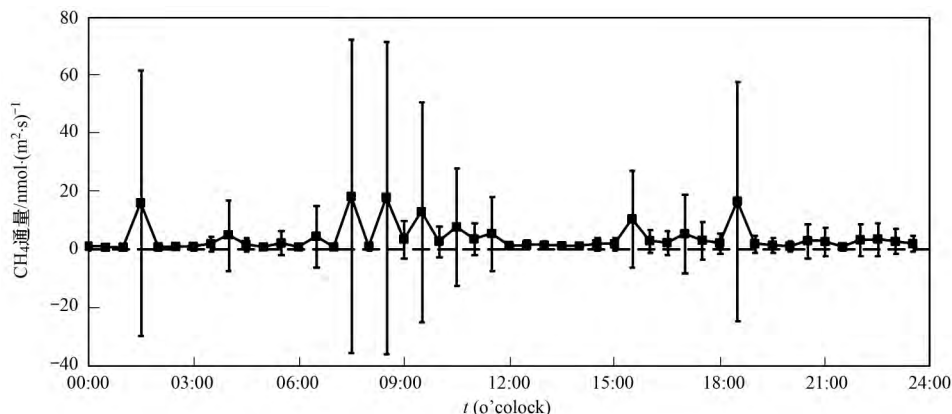


图 5 2017 年 4 月 14~25 日太湖梅梁湾 CH_4 通量多日平均日变化

Fig. 5 Average diurnal variation of CH_4 flux at the MLW site in Lake Taihu from April 14-25, 2017

CH_4 通量较为稳定,这两个时间段内水体的温度层结稳定,因此 CH_4 冒泡排放减少,以扩散形式为主,通量较稳定.

2.1.2 夏季 CH_4 通量日变化

夏季 CH_4 通量的日变化动态如图 6 所示. CH_4 通量大部分集中在 $1 \sim 100 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,最大值为 $544.977 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,出现在 8 月 25 日 21:00,最小值为 $0.052 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,出现在 8

月 25 日 20:30. 观测期间每日的峰值出现在 09:00 左右,谷值出现在 03:00 左右. 值得注意的是,8 月 25 日的观测从 15:00 开始, CH_4 通量就呈现下降的趋势,在 20:30 降至谷值 $0.052 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,后由于冒泡排放导致 CH_4 通量急剧增加至峰值 $544.977 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$.

夏季 CH_4 通量多日平均日变化动态如图 7 所示. 可以看出, CH_4 在全天均呈现释放状态,且通

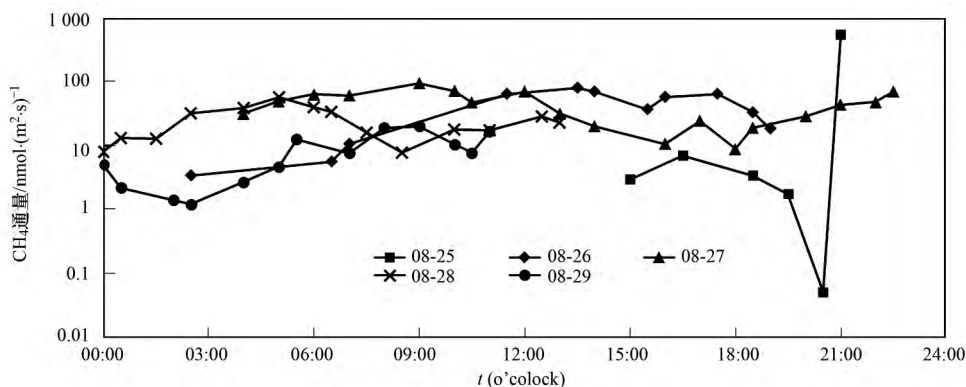


图 6 2016 年 8 月 25~29 日太湖梅梁湾 CH_4 通量日变化

Fig. 6 Diurnal variation of CH_4 flux at the MLW site in Lake Taihu from August 25-29, 2016

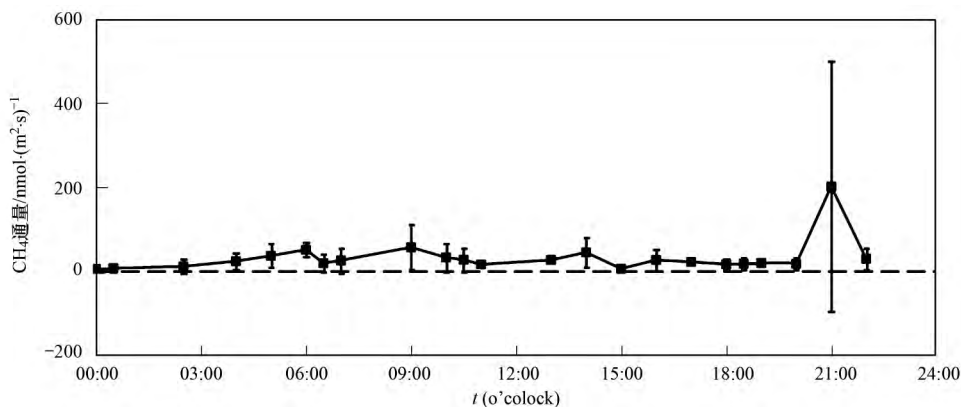


图 7 2016 年 8 月 25~29 日太湖梅梁湾 CH_4 通量多日平均日变化

Fig. 7 Average diurnal variation of CH_4 flux at the MLW site in Lake Taihu from August 25-29, 2016

量存在昼夜差异. 白天和夜间的通量平均值分别为 $25.860 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 和 $44.897 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 白天占全天 CH₄ 释放的 36.55%, 夜间占 63.45%, 可见夜间通量大于白天. 夏季 CH₄ 通量 1 d 之中最大值为 $202.072 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 出现在 21:00, 最小值为 $0.052 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 出现在 20:30. 从整体上看, 中午 CH₄ 通量较大, 凌晨和傍晚通量较小, 全天均有冒泡现象出现, 导致 CH₄ 通量在一天之中出现不同程度的波动.

2.1.3 春、夏季 CH₄ 通量比较

由表 1 可以看出, 春、夏季 CH₄ 通量均为正值, 即水体在排放 CH₄, 表现为大气 CH₄ 的源. 分别计算得到春、夏季 CH₄ 平均通量为 $4.074 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 和 $40.779 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 可见夏季 CH₄ 排放明显高于春季.

2.2 CO₂ 通量的时间变化特征

2.2.1 春季 CO₂ 通量日变化

春季 CO₂ 通量的日变化动态如图 8 所示, 除 4 月的 15、18、19、21 和 22 日出现了 CO₂ 释放现象, 其余天数 CO₂ 均呈全天吸收状态. CO₂ 释放通量最大值为 $0.510 \text{ } \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 出现在 4 月 22 日

表 1 春、夏季太湖梅梁湾 CH ₄ 、CO ₂ 通量日均值			
Table 1 Daily average CH ₄ and CO ₂ flux in spring and summer at the MLW site in Lake Taihu			
季节	日期(月-日)	气体通量 <i>F</i>	
		CH ₄	CO ₂
		$/\text{nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$	$/\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$
春季	04-14	0.286	-0.138
	04-15	0.105	-0.115
	04-16	0.407	-0.181
	04-17	2.495	-0.208
	04-18	1.444	-0.065
	04-19	1.196	-0.004
	04-20	3.223	-0.266
	04-21	7.030	0.033
	04-22	4.262	-0.139
	04-23	0.929	-0.350
	04-24	7.955	-0.279
	04-25	19.228	-0.210
夏季	平均	4.047	-0.160
	08-25	93.386	-0.130
	08-26	35.666	-0.123
	08-27	44.365	-0.040
	08-28	21.844	0.055
	08-29	8.635	0.071
	平均	40.779	-0.033

21:30, 吸收通量最大值 $-0.540 \text{ } \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 出现在 4 月 23 日 13:30. 观测期间每日的吸收

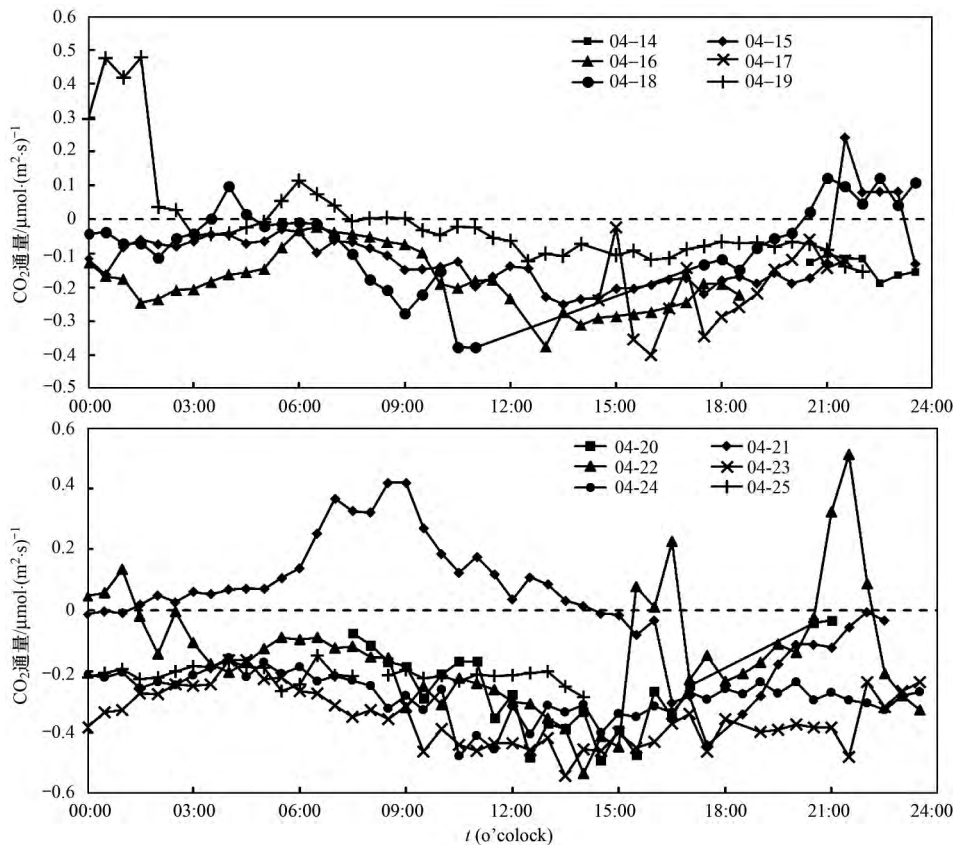


图 8 2017 年 4 月 14~25 日太湖梅梁湾 CO₂ 通量日变化

Fig. 8 Diurnal variation of CO₂ flux at the MLW site in Lake Taihu from April 14-25, 2017

峰值出现在 14:00 左右,吸收谷值出现在 06:00 左右. 值得注意的是,4 月 21 日 00:00 ~ 15:00 时间段内 CO_2 一直呈释放状态,此后才转为吸收状态.

春季 CO_2 通量多日平均日变化动态如图 9 所示. 可以看出, CO_2 在全天均呈现吸收状态,且通量存在昼夜差异. 白天和夜间的通量平均值分别为 $-0.200 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 和 $-0.112 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 白天占全天 CO_2 吸收的 64.07%, 夜间占 35.93%, 可见白天吸收通量大于夜间. 日出前是一天中气温最低的时刻,此时湖水上层温度低于湖底,湖水出现翻转现象,导致上层碳含量升高,因此日出左右出现 CO_2 吸收通量谷值. 水中的浮游藻类可通过光合作

用吸收 CO_2 制造有机物,日出后太阳辐射逐渐增强,光合作用逐渐增强, CO_2 吸收通量也逐渐增大. 午后藻类吸收 CO_2 的能力最强,因此在 14:30 出现了 CO_2 吸收峰值,通量为 $-0.316 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 随后太阳辐射开始减弱,光合作用也开始减弱, CO_2 吸收通量也开始减小. 夜间没有太阳辐射,光合作用停止,浮游藻类的呼吸作用以及水中微生物分解有机质均会产生 CO_2 ,使夜间 CO_2 排放增加,但同时水中的一些藻类例如微囊藻(太湖蓝藻中的优势种类)在夜间会采用景天酸途径(CAM)代谢来吸收 CO_2 ,因此,抵消一部分 CO_2 的排放,最终净的 CO_2 通量在夜间也表现出吸收的现象^[16],但吸收量小于白天.

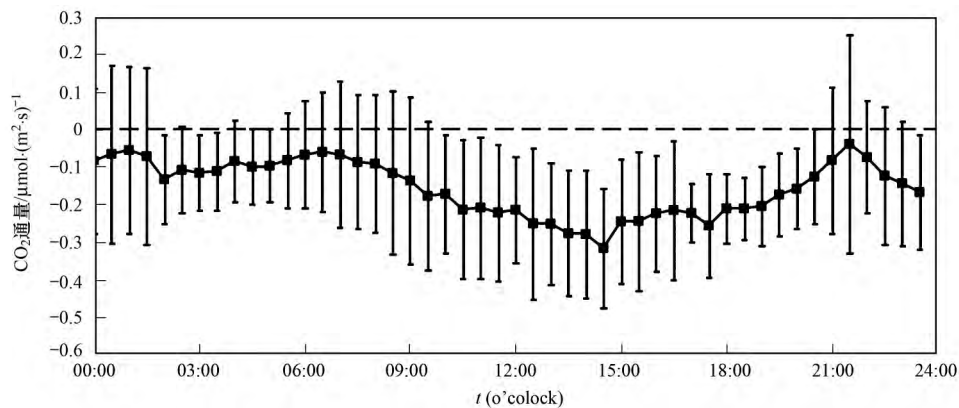


图 9 2017 年 4 月 14 ~ 25 日太湖梅梁湾多日平均 CO_2 通量日变化

Fig. 9 Average diurnal variation of CO_2 flux at the MLW site in Lake Taihu from April 14-25, 2017

2.2.2 夏季 CO_2 通量日变化

夏季 CO_2 通量的日变化动态如图 10 所示,除 8 月的 25、26 日全天均呈现吸收状态,其余天数均兼有吸收和释放现象. CO_2 吸收通量最大值为 $-0.189 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 出现在 8 月 26 日 14:00, CO_2 释放通量最大值为 $0.313 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 出

现在 8 月 28 日 05:30. 观测期间每日的释放峰值出现在 06:00 左右,吸收峰值出现在 14:00 左右.

从夏季多日平均 CO_2 通量日变化动态可以看出(图 11), CO_2 在全天既有吸收也有释放现象. 白天和夜间的通量平均值分别为 $-0.038 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 和 $-0.030 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 白天占

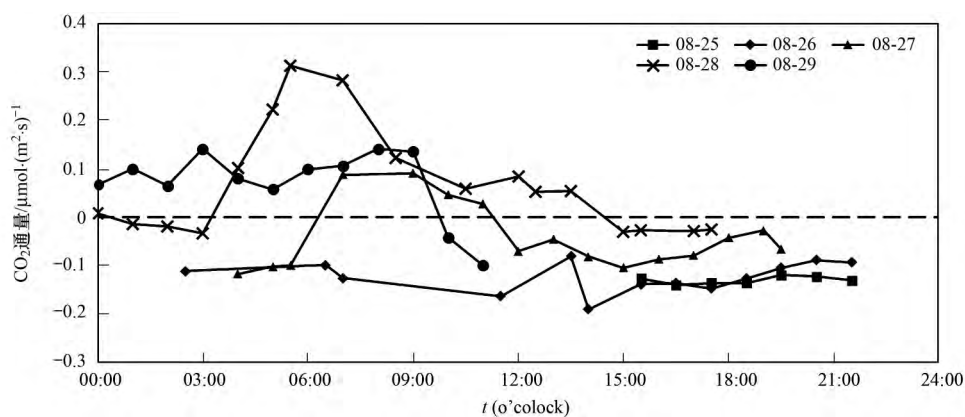


图 10 2016 年 8 月 25 ~ 29 日太湖梅梁湾 CO_2 通量日变化

Fig. 10 Diurnal variation of CO_2 flux at the MLW site in Lake Taihu from August 25-29, 2016

全天 CO₂ 吸收的 55.76%, 夜间占 44.24%, 可见白天吸收通量大于夜间. 00:00 ~ 09:00 时间段内 CO₂ 一直呈现释放状态, 之后随着太阳辐射增强, CO₂ 释放通量减小并在 11:00 左右转为吸收状态, 在 16:30 达到吸收峰值 $-0.137 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 之后吸收通量减小. 造成 CO₂ 呈现这种日变化的原因可能是夏季生物代谢旺盛, 水中生物的呼吸作用较强, 导致水体释放 CO₂. 此外, 日出前是一天中气温最低的时刻, 水体底层温度高于表层温度,

这种水层温度分布不稳定导致湖水翻转效应增强, 底层的 CO₂ 和碳酸盐被带到湖水表层, 使表层水体中碳含量升高, 更利于 CO₂ 排放, 因此在日出左右出现 CO₂ 释放峰值. 09:00 之后, 随着太阳辐射增强, 藻类光合作用逐渐增强, CO₂ 释放通量逐渐减小, 当水中生物的光合作用大于呼吸作用时, 水体开始呈现 CO₂ 吸收状态, 午后温度升高和太阳辐射增强的共同作用导致在午后出现 CO₂ 吸收峰值.

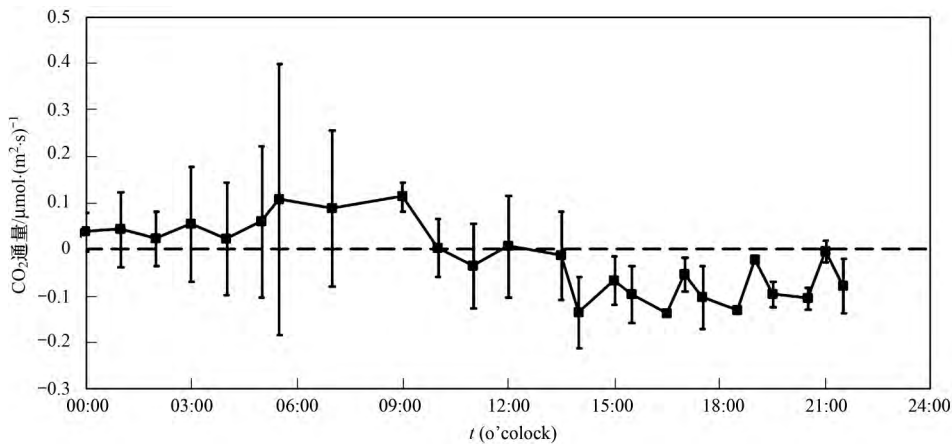


图 11 2016 年 8 月 25 ~ 29 日太湖梅梁湾 CO₂ 通量多日平均日变化

Fig. 11 Average diurnal variation of CO₂ flux at the MLW site in Lake Taihu from August 25-29, 2016

2.2.3 春、夏季 CO₂ 通量比较

由表 1 可以看出, 春季 CO₂ 通量为负值, 即水体在吸收 CO₂, 表现为大气 CO₂ 的汇, 春季 CO₂ 平均通量为 $-0.160 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$. 夏季 CO₂ 通量既有正值也有负值, 平均通量为 $-0.033 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$. 可见对于 CO₂, 夏季湖水的吸收作用弱于春季, 甚至会成为 CO₂ 的源.

2.3 气象要素对温室气体通量的影响

2.3.1 气象要素对 CH₄ 通量的影响

各个气象要素对 CH₄ 通量的影响如表 2 所示. 在小时尺度上, CH₄ 通量与水温 ($r = 0.20$, $P <$

0.01 , $N = 496$)、气温 ($r = 0.34$, $P < 0.01$, $N = 496$) 之间呈显著正相关, 且与水温的相关性大于气温. 该结果表明, 气温影响水温, 但是水温直接影响水体中 CH₄ 的产生与释放, 即水温越高, CH₄ 释放通量越大. 这是因为温度升高, CH₄ 在水体中溶解度降低, 部分储存在水柱中的 CH₄ 向外释放, 并且, 温度升高时, 厌氧微生物生命活动更加旺盛, CH₄ 产生速率也会增加. 从图 12(a) 和 12(b) 中也可以看出, CH₄ 随着气温与水温的增加而增加. 在日尺度上, CH₄ 通量与水温 ($r = 0.83$, $P < 0.01$, $N = 17$) 和气温 ($r = 0.78$, $P < 0.01$, $N = 17$) 均呈正相关.

表 2 春、夏季不同时间尺度 CH₄ 通量与气象因子的相关分析¹⁾

Table 2 Correlation analysis between CH₄ flux and meteorological factors in spring and summer at different temporal scales

时间尺度	通量类型	水温	气温	气压	风速 ($< 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)	太阳辐射
小时尺度	CH ₄ 通量	0.34 **	0.20 **	0.01	0.71 **	0.01
日尺度	CH ₄ 通量	0.83 **	0.78 **	-0.44	-0.32	-0.01

1) ** 表示在 0.01 上显著相关

由表 2 还可发现, 在小时尺度上, 当风速 $< 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, CH₄ 通量与风速之间呈显著正相关 ($r = 0.71$, $P < 0.001$, $N = 61$). 图 12(c) 按照 $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为间隔对风速进行平均并分段统计 CH₄ 通量, 由图

也可以看出, 当风速 $< 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, CH₄ 通量随着风速的增加而增加. 这主要是由于风速增大, 水-气界面间的扩散阻力减小, 湍流交换加强, 有利于水体中的 CH₄ 加速扩散到大气中. 同时, 较大的风速可

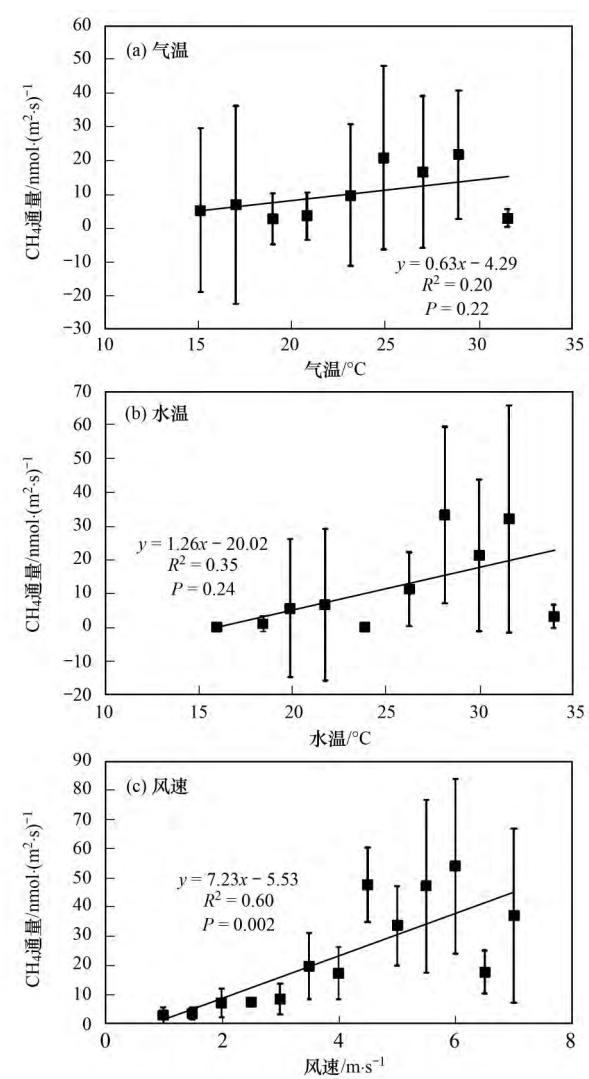


图 12 小时尺度太湖梅梁湾 CH₄ 通量随气温、水温 and 风速的变化
Fig. 12 Changes in CH₄ flux with air temperature , water temperature , and wind speed on an hourly scale at the MLW site in Lake Taihu

表 3 春、夏季不同时间尺度 CO₂ 通量与气象要素的相关分析

Table 3 Correlation analysis between CO₂ flux and meteorological factors in spring and summer at different temporal scales

时间尺度	通量类型	水温	气温	气压	风速	太阳辐射
小时尺度	CO ₂ 释放通量	-0.16	-0.19	0.30	0.40 **	-0.48 **
	CO ₂ 吸收通量	0.07	0.14 **	-0.41 **	0.33 **	-0.35 **
	CO ₂ 通量	0.08	0.08	-0.04	0.24 *	-0.29 **
日尺度	CO ₂ 通量	0.36	0.37	-0.32	0.24	0.02

1) ** 表示在 0.01 上显著相关, * 表示在 0.05 上显著相关

间 CO₂ 释放现象出现较少,期间气压的变化很小,因此难以得到显著的相关关系. 当不区分 CO₂ 交换状态时,在小时尺度和日尺度上,CO₂ 通量与气压均无显著相关关系.

太阳辐射主要通过影响藻类的光合作用进而影响 CO₂ 通量. 在小时尺度上,当 CO₂ 呈释放状态

以对水体产生扰动,促使 CH₄ 从底层沉积物或缺氧水体中进入上层水体,从而使 CH₄ 排放得到加强. 但当风速 > 6 m·s⁻¹ 时,CH₄ 通量反而随着风速的增加呈波动式降低. 这可能是因为当风速增大时,大量 O₂ 进入水体,对 CH₄ 的氧化效应增大. 在日尺度上,CH₄ 通量与风速之间无显著相关关系.

但是,CH₄ 通量与气压和太阳辐射之间无论是在小时还是日尺度上均无显著的相关关系.

2.3.2 气象要素对 CO₂ 通量的影响

由于在观测期间,CO₂ 呈现吸收和释放两种状态,因此本研究在分析气象要素对 CO₂ 通量的影响时,对这两种状态分别进行了分析,结果如表 3 所示.

在小时尺度上,当 CO₂ 呈释放状态时,其通量与气温和水温之间均无显著相关关系,当 CO₂ 呈吸收状态时,其通量与气温呈显著正相关($r = 0.14$, $P < 0.01$, $N = 408$). 从图 13(a) 中可以看出,随着气温的升高,CO₂ 吸收通量增加. 而 CO₂ 吸收通量与水温则没有显著相关关系. 当不区分 CO₂ 交换状态时,在小时尺度和日尺度上,CO₂ 通量与水温 and 气温均无显著相关关系. 即,在春、夏季中,CO₂ 通量对温度的变化并不敏感.

气压对 CO₂ 通量的影响主要是通过改变 CO₂ 在水中的溶解度来实现. 由表 3,在小时尺度上,当 CO₂ 呈吸收状态时,其通量与气压呈显著负相关($r = -0.41$, $P < 0.01$, $N = 402$). 从图 13(b) 中也可以看出,随气压的增加,CO₂ 吸收通量增大. 这是因为气压越大,CO₂ 在水中的溶解度越高,CO₂ 吸收通量则越大. 当 CO₂ 呈释放状态时,其通量与气压之间没有显著相关关系,可能的原因是观测期

时,其通量与太阳辐射呈显著负相关($r = -0.48$, $P < 0.01$, $N = 40$) (表 3),从图 14(b) 中也可以看出,太阳辐射越强,CO₂ 释放通量越小; 当 CO₂ 呈现吸收状态时,太阳辐射与 CO₂ 通量之间呈现显著负相关($r = -0.35$, $P < 0.01$, $N = 235$),从图 13(d) 中也可以看出,太阳辐射增强,CO₂ 吸收通量

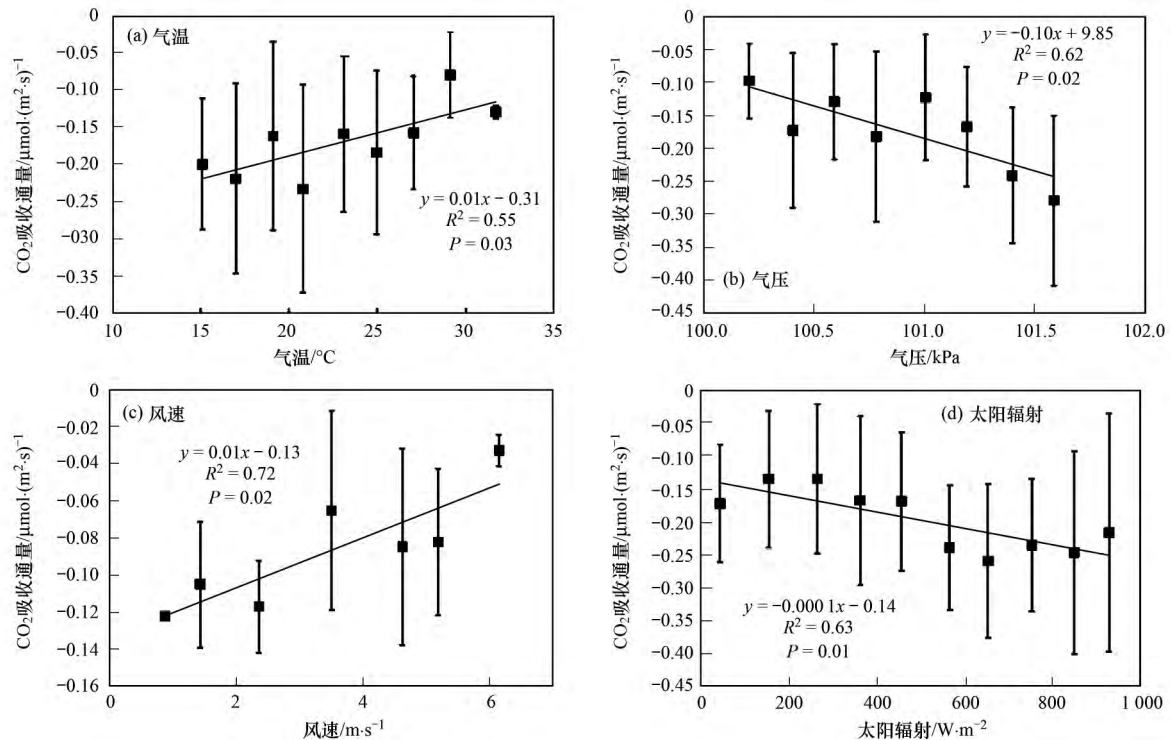
图 13 小时尺度太湖梅梁湾 CO₂ 吸收通量随气温、气压、风速和太阳辐射的变化

Fig. 13 Changes in CO₂ uptake flux with air temperature, air pressure, wind speed, and solar radiation on an hourly scale at the MLW site in Lake Taihu

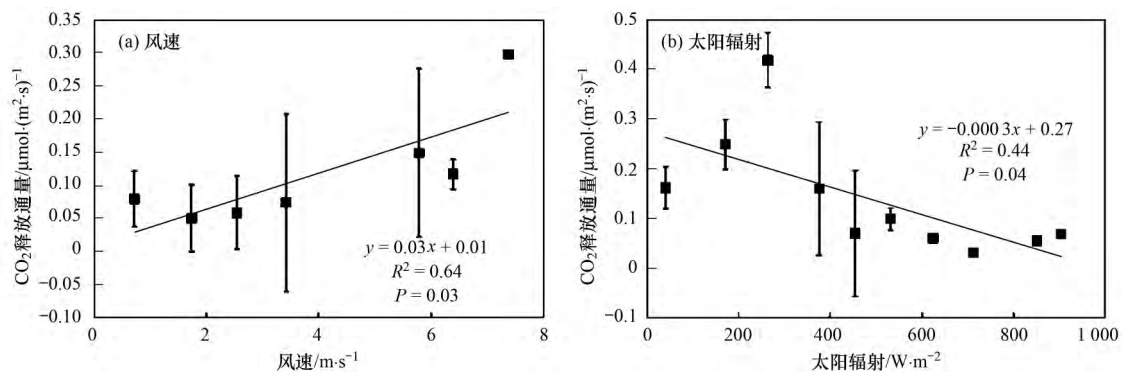
图 14 小时尺度太湖梅梁湾 CO₂ 释放通量随风速和太阳辐射的变化

Fig. 14 Changes in CO₂ efflux with wind speed and solar radiation on an hourly scale at the MLW site in Lake Taihu

线性增加。由此说明,太阳辐射是影响 CO₂ 通量的重要因素。当太阳辐射增强时,藻类光合作用增强,当光合作用大于呼吸作用时,水体表现为从大气吸收 CO₂,CO₂ 吸收通量增加。当不区分 CO₂ 交换状态时,CO₂ 通量在小时尺度上与太阳辐射呈显著负相关($r = -0.29$, $P < 0.01$, $N = 275$),同时结合图 15(b)也可以看出太阳辐射越强,越有利于水体从大气中吸收 CO₂。

风对 CO₂ 通量的影响效应与 CH₄ 相似。由表 3 可知,在小时尺度上,当 CO₂ 呈吸收状态时,其通量与风速之间呈显著正相关($r = 0.33$, $P < 0.05$, N

$= 45$),从图 13(c)中也可以看出,随风速的增加,CO₂ 吸收减弱;当 CO₂ 呈释放状态时,其通量与风速之间呈显著正相关($r = 0.40$, $P < 0.05$, $N = 27$),从图 14(a)中也可以看出,风速越大,CO₂ 释放通量越大。这是由于太湖是一个浅水湖泊,风速增大会引起底泥悬浮,底泥中的碳酸盐溶解在水中,导致水体中的 CO₂ 增加并向大气中排放,并且增大的风速可导致 CO₂ 在水中传输及水面与大气之间的扩散增强,因此 CO₂ 释放通量增大,吸收通量减小。当不区分 CO₂ 交换状态时,CO₂ 通量在小时尺度上与风速呈显著正相关($r = 0.24$, $P < 0.05$, N

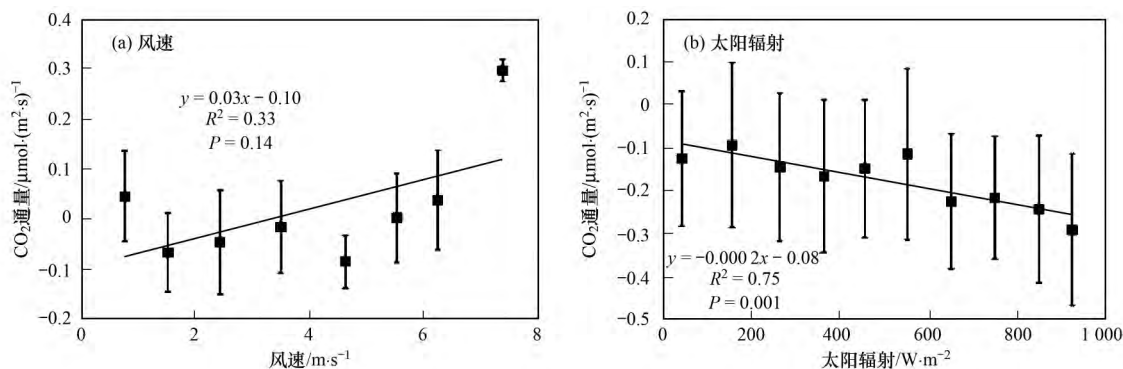
图 15 小时尺度太湖梅梁湾 CO_2 通量随风速和太阳辐射的变化

Fig. 15 Changes in CO_2 flux with wind speed and solar radiation on an hourly scale at the MLW site in Lake Taihu

72), 同时结合图 15(a) 也可以看出风速增大有利于 CO_2 由水体向大气中排放. 在日尺度上, CO_2 通量与风速之间无显著相关关系.

3 讨论

3.1 太湖藻型湖区春、夏季 CH_4 、 CO_2 通量的比较

本研究得到春、夏季 CH_4 平均通量分别为 $4.074 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 和 $40.779 \text{ nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$. 造成这种差异的原因可能是: 与春季相比, 夏季湖水温度更高, O_2 在水中的溶解度更低, 导致缺氧湖水的体积比率增大, 这些更有利于厌氧细菌的生命活动, 因此 CH_4 产生速率更高. 同时, 夏季湖水温度高, CH_4 在湖水中的溶解度降低, 即 CH_4 在水中的存储量更少. 此外, 高温还会促使水-气界面 CH_4 扩散速率增大, 因此, 夏季 CH_4 排放速率比春季更大. 但春、夏季 CH_4 通量的差异并不显著 ($P = 0.064 > 0.05$).

春、夏季 CO_2 平均通量分别为 $-0.160 \text{ } \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 和 $-0.033 \text{ } \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 且两者差异显著 ($P = 0.044 < 0.05$). 造成这种显著季节差异可能是由于春季水中藻类等浮游植物处于有机物质的积累阶段, 光合作用强于呼吸作用, 它们通过光合作用吸收大量的 CO_2 用于制造和积累有机物, 同时, 春季湖水温度较夏季低, 微生物的生命活动较弱, 它们分解有机质释放的 CO_2 较少. 夏季藻类等浮游植物生命活动旺盛, 新陈代谢产生大量 CO_2 . 此外, 梅梁湾地区连接有 4 条入湖河流, 夏季降水增多, 雨水的冲刷作用使得大量外源碳随入湖河水被输送至该区域, 导致水中的可溶性有机碳含量升高^[12], 并在微生物的分解作用下产生大量的 CO_2 . 同时, 本研究在夏季的观测时间正值 8 月末, 此时湖水中蓝藻的光合作用活性已经开始衰退, 通过光合作用吸收 CO_2 的速率降低^[17]. 因此, 夏季湖

水吸收 CO_2 较春季有明显减弱.

3.2 太湖藻型湖区 CH_4 、 CO_2 通量的水平

本研究结果表明, 太湖梅梁湾藻型湖区在春、夏季均为大气 CO_2 的汇, 且 CO_2 吸收通量春季大于夏季; 春、夏季均为大气 CH_4 的源, 且 CH_4 释放通量春季小于夏季. 对比其他研究发现 (表 4), 就 CO_2 而言, 李香华在太湖梅梁湾和吴铭在四川向阳水库的观测得到春、夏季水体为大气 CO_2 的汇^[9, 18], 邢阳平在武汉东湖也观测到夏季 CO_2 呈吸收状态^[10], 这与本研究结果一致, 且 CO_2 吸收通量在春季与四川向阳水库观测结果相近, 但明显比李香华的观测结果高两个数量级; 夏季结果与李香华在太湖以及邢阳平在武汉东湖的观测结果相近, 但比四川向阳水库的观测结果低一个数量级. 其他学者的观测结果与本研究相反. 其中, 肖启涛在梅梁湾观测到 CO_2 在春、夏季均呈释放状态^[12], 与本研究恰恰相反, 这是由于研究方法不同所导致的差异. 西西伯利亚和芬兰北部的观测结果也与本研究相反, 这是因为这些湖泊处于泥炭地和林地, 有机腐殖质丰富, 水体呈酸性, 更利于 CO_2 释放^[19, 20]. 对比发现, 本研究太湖藻型湖区 CO_2 吸收通量春季较高, 夏季处于中等水平.

就 CH_4 而言, 所有观测结果均表明水体是大气 CH_4 的源 (表 4), 这与本研究一致, 且大部分观测得到的 CH_4 通量的季节规律也与本研究相同, 即 CH_4 释放通量春季小于夏季. 其中, 李香华^[9] 和肖启涛^[12] 在梅梁湾观测得到的 CH_4 通量均比本研究低. 前者主要是因为采用水平衡方法, 该方法观测不到以冒泡形式排放的 CH_4 , 导致 CH_4 严重低估. 后者可能是因为采用人工操作取样, CH_4 易被氧化, 同时在气体样本保存过程中 CH_4 成分也可能发生改变, 造成最终结果偏低. 南京团结河春季的

CH₄ 通量比本研究高 3 个数量级,这主要是因为团结河是南京城市内河,受生产生活污染严重,高度富营养化^[21]. 芬兰北部湖泊的 CH₄ 通量季节变化规律与本研究相反,这主要是由于芬兰北部地处寒带,冬季气温极低导致水面结冰,在水底可能形成一个厌氧环境,有利于厌氧微生物分解底泥中的有机质生成 CH₄. 春季冰面开始融化,积累在冰面下的 CH₄ 大量释放,导致春季的 CH₄ 通量极高^[22]. 通过对比发现,本研究太湖藻型湖区 CH₄ 的排放处于中等水平.

此外,除了研究方法、湖水理化性质和研究地气象背景条件差异外,观测时间的不同也会导致试验结果差异. 李香华^[9]和韩洋等^[21]在研究温室气体通量的日变化特征时仅基于 1 d 的试验数据,而本研究春、夏季的观测分别持续了 12 d 和 5 d,因此本研究得到的春、夏季 CH₄ 和 CO₂ 通量日变化特征相比前者的研究代表性更好. 肖启涛^[12]对温室气体的观测时间为每月的 11、12 和 13 日,而本研究观测时间为 4 月和 8 月,且试验日相对集中,对于春、夏季的代表性相比前者的研究而言略差.

表 4 湖泊等水体 CH₄、CO₂ 通量对比分析¹⁾
Table 4 Comparison of CH₄ and CO₂ flux in lakes and other water bodies

观测地点	项目	气体通量 F		文献
		春	夏	
太湖梅梁湾	CH ₄	4. 000	41. 000	本研究
	CO ₂	- 0. 160	0. 030	
太湖梅梁湾	CH ₄	1. 620	2. 431	[12]
	CO ₂	0. 180	0. 346	
太湖梅梁湾	CH ₄	0. 243	1. 597	[9]
	CO ₂	- 0. 005	- 0. 032	
武汉东湖	CH ₄	6. 215	45. 920	[10]
	CO ₂	0. 011	- 0. 017	
南京团结河	CH ₄	3 054. 514		[21]
	CO ₂	6. 831		
南京丁解水库	CH ₄	29. 514		[21]
	CO ₂	0. 162		
北京城市湖泊	CH ₄	10. 712		[23]
	CO ₂	194. 115		
四川崇州市向阳水库	CH ₄	2. 527	4. 549	[18]
	CO ₂	- 0. 139	- 0. 230	
西西伯利亚中部湖泊	CH ₄	0. 796	86. 806	[20]
	CO ₂	0. 000	0. 815	
芬兰北部湖泊	CH ₄	52. 807	5. 877	[19]
	CO ₂	0. 694	0. 140	

1) CH₄ 通量单位 $\text{nmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, CO₂ 通量单位 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$

3.3 气象要素对温室气体通量的影响

本研究得到 CH₄ 通量与水温 and 气温均呈显著正相关,当风速 $< 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,与风速也呈显著正相关,而与气压和太阳辐射无显著相关关系. 在对南京典型水体^[21]、太湖梅梁湾^[12]、三峡水库香溪河库湾^[24]和密云水库^[25]等研究中均得到了 CH₄ 通量与水温 and 气温呈显著正相关的结论,而对养殖性鱼塘的观测发现,CH₄ 通量与水温之间无显著相关关系^[26],这可能是由于该养殖水体有鱼饵投放及人为干扰,这些相比于水温对 CH₄ 通量的影响更大. 肖启涛在太湖梅梁湾观测发现 CH₄ 通量与风速呈

显著正相关^[12],与本研究相同. 而在对南京典型水体的观测中发现 CH₄ 通量与气压呈显著负相关^[21],这可能是因为南京城市内水体 CH₄ 通量远高于太湖梅梁湾,并且冒泡排放的频率和通量较大,因此受气压变化影响较大. 已有研究表明,气压每减小 2%,CH₄ 的冒泡通量增加 10 倍^[27]. 同时,当气压减小时,水中溶解氧减少,对 CH₄ 氧化作用减弱,所以 CH₄ 通量增加.

国内外已有大量研究结果表明,随着风速增大,CO₂ 通量增加^[28-29]. 在对三峡水库香溪河库湾的观测中发现 CO₂ 通量与太阳辐射呈显著负相

关^[24],这与本研究结果一致,而对南京典型水体的研究却得到了相反的结论^[21],这可能是由于不同水体的生化特性不同,南京典型水体金川河水质恶劣,黑臭现象严重^[30],因此不存在正常进行光合作用的水生植物或藻类,因此即使有阳光照射,CO₂也不会表现出吸收的状况.太阳辐射一方面可以影响光合作用,促使水体吸收CO₂,另一方面也可以通过影响水温进而影响水生生物的呼吸作用以及微生物的分解作用,促使水体排放CO₂.CO₂通量与水温间的相关性因湖泊而异,李香华^[9]和肖启涛^[12]的研究表明太湖梅梁湾的CO₂通量与水温呈显著正相关,这与本研究结果一致,而邢阳平^[10]在对武汉东湖的研究中却发现两者并不存在相关关系.东湖属于高度自养型湖泊^[31],辐射相比水温对其光合作用的影响更大,因此,东湖CO₂通量与水温间关系不显著.而太湖的水生植物生物量较低,浮游植物的生产力与国内其他湖泊相比要低得多^[32],属于异养型湖泊,因此温度升高对于水生生物的呼吸作用以及有机质的分解影响很大.对于气压,对南京典型水体的观测发现CO₂通量与气压呈显著负相关,而对三峡水库香溪河库湾的观测却得到相反结论^[21-24].本研究得出CO₂吸收通量与气压呈负相关关系.这可能是因为三峡水库香溪河库湾的观测中,空气中CO₂浓度较低,气压对CO₂的溶解度影响较小,但对O₂的溶解度影响较大.当气压升高时,O₂的溶解度增大,水中的有机碳在好氧细菌的分解下产生更多的CO₂,因此CO₂通量增加^[24].

因此,可以得出水温、气温和风速对CH₄排放具有控制作用,而气温、气压、风速和太阳辐射对CO₂具有控制作用.

4 结论

(1)春、夏季太湖藻型湖区均表现为大气CH₄的源,CO₂的汇.CH₄平均通量分别为4.047 nmol·(m²·s)⁻¹、40.779 nmol·(m²·s)⁻¹,CO₂平均通量分别为-0.160 μmol·(m²·s)⁻¹、-0.033 μmol·(m²·s)⁻¹,均处于中等水平.

(2)在小时尺度上,气温、水温和风速控制CH₄的排放;气温、气压、风速和太阳辐射控制CO₂吸收通量,而风速和太阳辐射控制CO₂排放通量.日尺度上,气温和水温控制CH₄的排放,但CO₂通量与各气象要素未表现出显著的相关性.

然而,要准确评估太湖藻型湖区全年CH₄和CO₂通量的变化特征,还需对该区域秋、冬季的CH₄和CO₂进行观测.此外,在其他研究中还发现了温室气体通量与pH、叶绿素a和溶解氧等水质因子存在相关关系^[21-33].本研究并未涉及水质要素的观测.因此,要准确评价环境要素对太湖藻型湖区CH₄和CO₂气体交换通量的影响,还需就水质要素对CH₄和CO₂通量的影响进行深入分析.

参考文献:

- [1] 沈永平,王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068-1076.
Shen Y P, Wang G Y. Key findings and assessment results of IPCC WGI Fifth assessment report[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5): 1068-1076.
- [2] Cole J J, Caraco N F, Kling G W, et al. Carbon dioxide supersaturation in the surface waters of lakes[J]. Science, 1994, 265(5178): 1568-1570.
- [3] Bastviken D, Tranvik L J, Downing J A, et al. Freshwater methane emissions offset the continental carbon sink[J]. Science, 2011, 331(6013): 50.
- [4] 赵炎,曾源,吴炳方,等. 水库水气界面温室气体通量监测方法综述[J]. 水科学进展, 2011, 22(1): 135-146.
Zhao Y, Zeng Y, Wu B F, et al. Review of methods for measuring greenhouse gas flux from the air-water interface of reservoirs[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(1): 135-146.
- [5] Ding W, Zhu R B, Ma D W, et al. Summertime fluxes of N₂O, CH₄ and CO₂ from the littoral zone of Lake Daming, East Antarctica: effects of environmental conditions[J]. Antarctic Science, 2013, 25(6): 752-762.
- [6] Hernández P A, Mori T, Padrón E, et al. Carbon dioxide emission from Katanuma volcanic lake, Japan[J]. Earth, Planets and Space, 2011, 63(11): 1151-1156.
- [7] Striegl R G, Michmerhuizen C M. Hydrologic influence on methane and carbon dioxide dynamics at two north-central Minnesota lakes[J]. Limnology and Oceanography, 1998, 43(7): 1519-1529.
- [8] 陈永根,李香华,胡志新,等. 中国八大湖泊冬季水-气界面CO₂通量[J]. 生态环境, 2006, 15(4): 665-669.
Chen Y G, Li X H, Hu Z X, et al. Carbon dioxide flux on the water-air interface of the eight lakes in China in winter[J]. Ecology and Environment, 2006, 15(4): 665-669.
- [9] 李香华. 太湖水-气界面温室气体通量及时空变化特征研究[D]. 南京: 河海大学, 2005. 30-82.
Li X H. Study of the greenhouse gas flux of water-air interface and its spatio-temporal change in Taihu Lake[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. 30-82.
- [10] 邢阳平. 浅水湖泊水-气界面碳循环的研究[D]. 海口: 华南热带农业大学, 2004. 13-26.
Xing Y P. Studies on carbon cycle across air-water interface in shallow lakes[D]. Haikou: South China University of Tropical Agriculture, 2004. 13-26.
- [11] 秦伯强. 太湖生态与环境若干问题的研究进展及其展望

- [J]. 湖泊科学, 2009, 21(4): 445-455.
- Qin B Q. Progress and prospect on the eco-environmental research of Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(4): 445-455.
- [12] 肖启涛. 太湖水-气界面温室气体(CO₂、CH₄、N₂O) 通量研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014. 13-80.
- Xiao Q T. Study on greenhouse gases(CO₂, CH₄, and N₂O) fluxes of water-air interface in Lake Taihu[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2014. 13-80.
- [13] 刘靖. 北京城市河湖水体富营养化与蓝藻水华研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2005. 1-3.
- Liu J. Studying on eutrophication and blue-green algae bloom of urban lakes in Beijing[D]. Beijing: Capital Normal University, 2005. 1-3.
- [14] 杨桂军. 太湖三个湖区浮游动物群落结构周年变化的比较研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2005. 6-7.
- Yang G J. Annual comparative studies on structure of zooplankton community in the three area of Lake Taihu [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2005. 6-7.
- [15] 宋晓兰, 刘正文, 潘宏凯, 等. 太湖梅梁湾与五里湖浮游植物群落的比较[J]. 湖泊科学, 2007, 19(6): 643-651.
- Song X L, Liu Z W, Pan H K, et al. Phytoplankton community structure in Meiliang Bay and Lake Wuli of Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2007, 19(6): 643-651.
- [16] Lee X, Liu S D, Xiao W, et al. The Taihu eddy flux network: an observational program on energy, water, and greenhouse gas fluxes of a large freshwater lake [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2014, 95(10): 1583-1594.
- [17] 李大命, 张彤晴, 唐晟凯, 等. 太湖蓝藻光合作用活性周年动态变化研究[A]. 见: 中国科学技术协会. 湖泊湿地与绿色发展——第五届中国湖泊论坛论文集[C]. 长春: 吉林人民出版社, 2015. 143-148.
- [18] 吴铭. 崇州市不同水体 CO₂、CH₄ 和 N₂O 通量变化特征及其影响因素研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016. 22-23.
- Wu M. The Characteristics and influencing factors of green gas emissions in different water bodys in Chongzhou [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2016. 22-23.
- [19] Huttunen J T, Väisänen T S, Heikkinen M, et al. Corrigendum: exchange of CO₂, CH₄ and N₂O between the atmosphere and two northern boreal ponds with catchments dominated by peatlands or forests[J]. Plant and Soil, 2003, 256(2): 481-482.
- [20] Repo E, Huttunen J T, Naumov A V, et al. Release of CO₂ and CH₄ from small wetland lakes in western Siberia[J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 2007, 59(5): 788-796.
- [21] 韩洋, 郑有飞, 吴荣军, 等. 南京典型水体春季温室气体排放特征研究[J]. 中国环境科学, 2013, 33(8): 1360-1371.
- Han Y, Zheng Y F, Wu R J, et al. Greenhouse gases emission characteristics of Nanjing typical waters in Spring [J]. China Environmental Science, 2013, 33(8): 1360-1371.
- [22] Duchemin É, Lucotte M, Canuel R, et al. First assessment of methane and carbon dioxide emissions from shallow and deep zones of boreal reservoirs upon ice break-up [J]. Lakes & Reservoirs: Research and Management, 2006, 11(1): 9-19.
- [23] 艾永平. 城市湖泊的甲烷排放时空变化及其与水文水质关系——以北京市为例[D]. 南昌: 南昌大学, 2009. 33-35.
- Ai Y P. Temporal and spatial variation of methane emission from urban lake and its relationship with the hydrology-water quality [D]. Nanchang: Nanchang University, 2009. 33-35.
- [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.
- Wang L, Xiao S B, Liu D F, et al. Fluxes of greenhouse gases from Xiangxi River in summer and their influencing factors [J]. Environmental Science, 2012, 33(5): 1471-1475.
- [25] 杨萌. 密云水库温室气体通量的时空特征及其影响因素研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011. 27-28.
- Yang M. Spatial-temporal variation of greenhouse gas flux and its environmental factors at Miyun Water Reservoir [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011. 27-28.
- [26] 兰晶. 养殖水体温室气体的溶存与排放及其影响因素研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015. 31-36.
- Lan J. Greenhouse gases concentration, emission and influence factors in farming waters [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015. 31-36.
- [27] Casper P, Maberly S C, Hall G H, et al. Fluxes of methane and carbon dioxide from a small productive lake to the atmosphere [J]. Biogeochemistry, 2000, 49(1): 1-19.
- [28] Macintyre S, Wanninkhof R, Chanton J P. Trace gas exchange across the air-water interface in freshwaters and coastal marine environments [A]. In: Matson P A, Harris R C (Eds.). Biogenic Trace Gases: Measuring Emissions from Soil and Water [M]. Oxford: Blackwell Science Ltd., 1995. 52-97.
- [29] Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean [J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(C5): 7373-7382.
- [30] 李继洲, 牛城, 嵇浩然, 等. 南京城区典型河道水体黑臭现状评价[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2013, 28(2): 53-56.
- Li J Z, Niu C, Ji H R, et al. Malodorous circumstances assessment of representative river water in Nanjing City [J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2013, 28(2): 53-56.
- [31] 邢阳平. 长江中下游地区淡水湖泊水-气界面碳交换及机制研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2007. 20-25.
- Xing Y P. Studies on carbon exchange and mechanism at air-water interface in freshwater lake along the middle and lower reaches of Yangtze River [D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Science, 2007. 20-25.
- [32] 王荐. 太湖浮游植物与富营养化[J]. 无锡教育学院学报, 2000, 20(3): 90-92.
- Wang J. Phytoplankton and eutrophication in Lake Taihu [J]. Journal of Wuxi Education College, 2000, 20(3): 90-92.
- [33] 常思琦, 王东启, 俞琳, 等. 上海城市河流温室气体排放特征及其影响因素[J]. 环境科学研究, 2015, 28(9): 1375-1381.
- Chang S Q, Wang D Q, Yu L, et al. Greenhouse gas emission characteristics from urban rivers in Shanghai [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(9): 1375-1381.