

太湖水-气界面 CO₂ 交换通量观测研究

嵇晓燕^{1,2}, 崔广柏¹, 杨龙元², 王跃思³

(1. 河海大学水资源环境学院, 南京 210024; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 3. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要:基于2003-01~2005-06利用静态箱法对太湖水-气界面 CO₂ 交换通量的观测, 对太湖水-气界面交换通量的变化特征进行了分析研究. 结果表明: 太湖水-气界面 CO₂ 交换通量存在明显的日变化, 春、夏、秋、冬4季日平均通量分别为 $-0.79 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $-4.89 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 $-4.06 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $-2.56 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 太湖均是 CO₂ 的汇. 一般污染越重的区域, CO₂ 通量值越大. 藻型湖区水-气界面 CO₂ 交换通量季节变化不明显, 草型湖区水-气界面 CO₂ 交换通量季节变化很明显, 夏秋季高, 冬春季低. CO₂ 通量变化的可能相关因子还有天气情况、太阳辐射、风速及水温、pH、TA、Chla、TC、TN 和 TP 等.

关键词:太湖; 水-气界面; CO₂ 通量; 日变化; 相关因子

中图分类号: X511 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2006)08-1479-08

Measurement of the CO₂ Flux on the Water-Air Interface of Taihu Lake

Ji Xiao-yan^{1,2}, Cui Guang-bai¹, Yang Long-yuan², Wang Yue-si³

(1. Water Resources and Environment College, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Based on the measurement of the CO₂ flux on the water-air interface of Taihu Lake by closed chamber technique from January 2003 to June 2005, variation characteristics of the CO₂ flux on the water-air interface in Taihu Lake are analyzed. Diurnal variation of the CO₂ flux on the water-air interface is obvious. The CO₂ flux is $-0.79 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ in spring, $-4.89 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ in summer, $-4.06 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ in autumn and $-2.56 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ in winter. Taihu Lake is the sink of carbon dioxide. The CO₂ flux gets larger in severer polluted area of the lake. Seasonal variation is not apparent in the algae type lake, but obvious in grass type lake. It is high in summer and autumn, and low in spring and winter. Correlative factors of CO₂ flux on the water-air interface of Taihu Lake possibly include weather, solar radiation, wind velocity, temperature, pH, TA, Chla, TC, TN and TP.

Key words: Taihu Lake; water-air interface; CO₂ flux; diurnal variation; correlative factors

近百年来, 大气中温室气体含量的增加及其可能导致的气候变化和生态环境问题, 已经引起人类社会日益广泛的关注^[1-5], 而 CO₂ 是大气中除水气以外浓度最高的一种温室气体^[6-8]. 人类活动所释放的 CO₂ 中, 只有 40%~60% 存在于大气之中, 除海洋吸收外, 另有 20%~30% 存在于何处, 人们仍然不清楚^[9-11]. 陆地生态系统, 被普遍认为可能是 CO₂ 一个明显的汇^[12-14]. 目前对陆地生态系统的 CO₂ 通量研究大部分在森林、草原等生态系统内, 对内陆水体的研究则很少^[15]. 湖泊是内陆水体的自然单元之一, 陆地生态系统的重要组成部分, 其水-气界面、水-陆界面、水-沉积物界面的 CO₂ 交换, 以及其生态系统内部的循环过程对大气温室气体含量变化的影响还不是十分清楚. 特别是 50~60 年代以来, 人类活动排入湖泊氮、磷等营养盐的增加, 湖泊对大气汇的作用越来越明显, 使得研究湖泊 CO₂ 的排放与吸收具有重要意义. 目前 Richey、Downing 等

对湖泊碳的来源^[16,17]、Cole et al、Emerson、Hope 等对 CO₂ 在水表层行为^[18-20]、Giorgio 等对碳与水生生物的关系^[21]等方面进行了一些研究, 但这些工作绝大多数集中于生产力不高的中小型湖泊、深水湖, 生态类型和水文特性也较简单, 对人类活动影响较为复杂的大中型湖泊的研究尚未见文献报道, 且没有对湖泊的水-气界面之间 CO₂ 交换通量进行过实验观测研究.

太湖流域位于长江三角洲, 地处长江下游尾间与钱塘江、杭州湾之间, 总面积^[22,23] 36 895 km². 本文利用静态箱/气相色谱法对太湖水-气界面的 CO₂ 交换通量进行观测和研究, 可以在一定程度上反映我国大型富营养化浅水湖泊水-气界面的 CO₂ 交换

收稿日期: 2005-09-05; 修订日期: 2005-11-20

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-01); 国家自然科学基金项目(50239030)

作者简介: 嵇晓燕(1981~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为环境保护, E-mail: jixiaoyan6@163.com

通量特征.

1 材料与方法

1.1 采样点布设

如图 1 中所示,太湖生态系统研究站(31°25.167'N, 120° 12.840' E)和东太湖测站(31°01.830'N,120°25.727'E)是 2 个长期观测点.太湖生态系统研究站代表藻型湖区,该区平均水深约 2m,底泥厚度约为 50cm,湖底无沉水植物,是太湖中富营养化较严重的湖区,蓝藻水华频繁暴发,水体透明度在 20~50cm 波动.东太湖测站代表太湖水域内典型的草型湖区,该区平均水深 0.9m,底泥厚度在 100cm 以上,湖区内生长着繁茂的伊乐藻、苦草、微齿眼子菜、狐尾藻、荇菜、野菱、茭草、芦苇等沉水植物,主要湖区水色澄清,透明度高,光线可直射至湖底^[23].在北太湖的梅梁湾还进行了面上观测,5 个测点分布如图 1 中方框内所示,具体位置见表 1.



图 1 太湖水-气界面 CO₂ 交换通量采样点分布

Fig. 1 Sites of the CO₂ flux on the water-air interface of Taihu Lake

表 1 面上观测点位置

Table 1 Sites of areal distribution

采样点	代表水域	经纬度
1	开阔水面,湖心区	31°21.534'N, 120°11.144'E
2	梅梁湾口	31°24.221'N, 120°11.110'E
3	梅梁湾中心区	31°26.267'N, 120°11.200'E
4	近污染源区	31°29.656'N, 120°11.806'E
5	污染水源入湖区	31°32.259'N, 120°13.213'E

1.2 样品采集

采用静态箱法收集水-气界面的 CO₂ 气体.由于

水面的特殊性,其采样箱不像陆地上可以固定,本次研究设计了浮船式采样箱,将箱口朝下悬挂于固定在汽车内胎上的铁支架上,以便于采样箱可以浮于水面.每次平行 3 个采样箱一组进行气样采集,便于对比研究.每个采样箱为直径 30cm,高 50cm 的圆筒.箱上安装一个通风管,主要用于平衡箱内外的压力,通风管一般是细长小管,绕于箱体的顶部,使内外空气直接相通.试验表明,这一通风管引起的内部气体扩散量极小,可忽略不计.在一个箱顶配有 JM624 便携式测温表一套,可测量箱内空气、箱外空气、水面和水下 0.5m 的水温.准备实验时采样箱要横放,并且开口背向太阳.实验开始时将采样箱立起吊在销轴箱上,启动箱内混合设备,待箱内气体混合均匀后,将采样箱落入水中,其没入水中的深度是 10cm.

采集样品用 100mL 注射器,注射器带三通阀,用三通阀完成采气密封和把气样注入分析仪进样器.1L 标准气体样品气袋备用,在日变化观测时因不能及时分析气样而作暂时存储.应用注射器和 2 路 2 通阀抽箱内气,先 2 次排空,第 3 次开始取 100mL 气体保存.3 个箱每隔 5min 取 100mL 气体保存,每个箱取 4 次,共取 12 个气样,整个采气过程为 1h.取气样的同时要记录温度参数,读取 T1(水下 0.5m)、T2(水面)、T3(箱内空气)、T4(湖面空气)的温度值.第 1 次采样的同时记录起始温度,第 12 次采样时记录结束温度.温度读取方法是依次将温度线的插头插入 JM624 便携式数字温度计的接口,记录显示的温度值.取样结束提起采样箱.

长期观测在太湖生态系统研究站和东太湖测站 2 个站同时进行,采样从 2003-01-05 开始,每 5 d 1 次,一直到 2005-06-30,在北京时间 09:00~10:00 时进行.在太湖生态系统研究站还进行了日变化观测,分别在 2003-04-26~27、07-12~07-13、09-25~09-26 和 12-23~12-24 进行,每隔 2h 采 1 次气.面上观测分别在 2004-02-17、2004-10-17 和 2005-01-17 进行.为了研究水-气界面 CO₂ 交换通量的影响因素,本次研究于 2005-05-27~2005-05-28 在太湖生态系统研究站进行了日变化观测,采气体样品同时采水样进行分析.

1.3 样品分析

采集的气样用中国科学院大气物理研究所的利产品 CA-5 气体样品进样仪和 HP 公司生产 5890 II 型气相色谱仪来分析计算气样中 CO₂ 的量.CA-5 气体样品进样仪的基本原理是通过微机

序发出指令控制电路系统和接受信号,电磁阀通过开关改变管线中气流流量和方向以达到给色谱仪自动进样、分析和清洗的目的^[24]. 色谱仪气体样品的检测分析中 CO_2 检测器为 FID(氢焰离子化检测器),由于 FID 仅对有机物有强的响应信号,而对一般的无机成分没有响应,因此在 CO_2 进入 FID 前要先经镍触媒转化器(Ni),在 H_2 的作用下转化生成 CH_4 而被检测. 用高纯氮气为载气,氢气为燃气,空气为助燃气,流速分别为:30 mL/min,30 mL/min,400 mL/min. 检测器、柱箱和接触媒温度分别为 200℃、55℃、375℃. 据有关文献,采用这种方法对 CO_2 的测量精度已经接近通常用于测量 CO_2 的红外吸收技术(NDIR)的精度水平^[24,25].

分析用的标准气体来自中国国家标准物质中心,在分析 1 组气样的前后分别注入 2 针标准空气,以 4 针标准空气 CO_2 的浓度平均值作为标准空气 CO_2 的浓度值. 计算出峰面积后与标准空气 CO_2 的浓度相比,就可得出该气样的浓度.

根据气体浓度的变化率计算水-气界面的 CO_2 交换通量,计算公式为:

$$F = \rho \times (V/A) \times (p/p_0) \times (T_0/T) \times (\Delta c/\Delta t)$$

式中, F 为 CO_2 气体的交换通量, ρ 为标准状态下 CO_2 气体密度, V 为箱内空气体积, A 为箱子覆盖面积, p 为采样时大气压, T_0 、 p_0 为标准状态下的空气绝对温度和气压, T 为采样时间内的绝对温度, Δt 为采样时间间隔, Δc 为气体在采样时间间隔内的浓度差.

采集的水样用 PHS-3C 型酸度计测 pH,用滴定法测 TA,用过硫酸盐氧化法同时测定水中的 TN 和 TP,用丙酮萃取分光光度法测叶绿素,用非分散红外吸收法测定总有机碳^[26].

2 结果与讨论

2.1 日变化

春季在太湖生态系统研究站水-气 CO_2 交换通量日变化观测见图 2. 此次观测始于 04-26T8:00 点,观测初始时刻天气为阴,10:00 左右天气转为晴,并一直持续到观测结束. 采样当天平均气温为 17.1℃. 从图 2 中可以看出:10:00 左右至 21:30 左右,通量一直是负值,表示 CO_2 从空气进入水中,平均吸收通量为 $-7.74 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;而 26T06:00~10:00 及 21:30 到 27T07:00 左右,通量都是正值,表示 CO_2 从水进入空气中,平均排放通量为 5.32

$\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. 1d 内水-气界面 CO_2 交换通量为 $-0.79 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,水体为大气 CO_2 的汇. 出现这种变化规律,是由于观测初始时刻是早晨且为阴天,太阳辐射较弱,随着 10:00 左右天气好转,到达水面的太阳辐射增加,光合作用逐步增强,水体中 CO_2 被浮游植物利用,含量逐渐降低,水体中的 CO_2 分压也随之降低. 水体和大气 CO_2 交换由 08:00 的水入气转变为气入水,且强度逐渐增加,11:00 达 $-8.99 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. 11:00~17:00 光合作用一直保持较高的强度, CO_2 的交换通量一直维持在 $-11.00 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 左右. 17:00 时后随太阳辐射的减弱,光合作用开始减弱,水体 CO_2 分压开始逐渐上升,气入水的量逐渐减小,并于 21:30 开始变为由水入气,水体向大气释放 CO_2 ,其释放量随时间的推移逐渐增加,于 05:00 达到最大值 $18.91 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$.

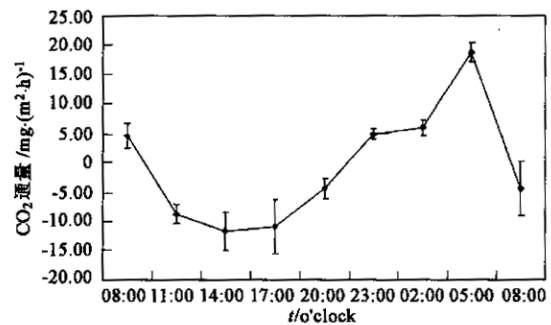


图 2 春季水-气 CO_2 交换通量日变化

Fig. 2 Diurnal variation of the CO_2 flux on the water-air interface of Taihu Lake in spring

夏季在太湖生态系统研究站水-气 CO_2 交换通量日变化观测见图 3. 此次观测从 07-12T14:00~13T14:00,自始至终一直是晴天,采样当天平均气温为 30.7℃. 从图 3 中可以看出:12T14:00~22:00 左右及 13T08:30 左右至 14:00,通量一直是负值, CO_2 从空气进入水中,平均吸收通量为 $-14.73 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;而 12T22:00 至 13T08:30 左右,通量都是正值, CO_2 从水进入空气中,平均排放通量为 $7.40 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. 1d 内水-气界面 CO_2 交换通量平均为 $-4.89 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,水体为大气 CO_2 的汇. 出现这种变化规律,是由于整个观测时段一直为晴天,而且夏季白天太阳辐射强,浮游植物光合作用很强,水体吸收 CO_2 的能力就很强,因此图 3 中 12T14:00~22:00 CO_2 一直是气入水,在 16:00 达最大 $-24.09 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,其后随太阳辐射的减弱逐渐变小,22:00 以后浮游植物的呼吸作用占主导, CO_2 变成

水入气,水体由 CO_2 的汇转为源,13T02:00达到1天中源的极大值为 $12.79 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,接着下降至08:30左右随太阳辐射的增强又开始出现负值。

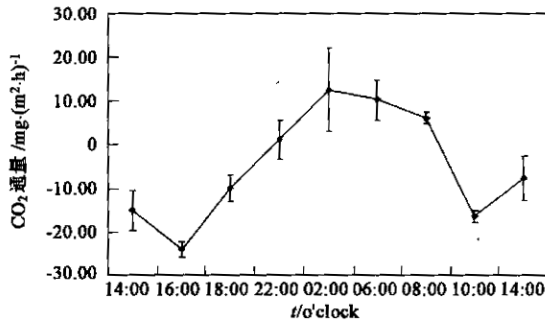


图3 夏季水-气 CO_2 交换通量日变化

Fig.3 Diurnal variation of the CO_2 flux on the water-air interface of Taihu Lake in summer

秋季在太湖生态系统研究站水-气 CO_2 交换通量日变化观测见图4。此次观测从09-25T09:00~26T09:00,整个观测时段一直是晴天,采样当天平均气温为 24.9°C 。从图4中可以看出:25T09:00~26T01:30左右,通量一直是负值, CO_2 从空气进入水中,平均吸收通量为 $-15.0 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;而26T01:30~09:00点左右,通量都是正值, CO_2 从水进入空气中,平均排放通量为 $17.41 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。1天内水-气界面 CO_2 交换通量平均为 $-4.06 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,水体为大气 CO_2 的汇。出现这种变化规律,是由于在晴天的初秋,此时温度相对较高,太阳辐射也较强,浮游植物光合作用仍然旺盛,所以图4中25T09:00~22:00 CO_2 一直是气入水,在15:00达最大 $-23.98 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,其后随太阳辐射的减弱逐渐变小;26T01:30以后浮游植物的呼吸作用占主导, CO_2 变成水入气,水体由 CO_2 的汇转为源,26T06:00达到1d中源的极大值为 $23.34 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,接着随水中植物光合作用的增强而下降。

冬季在太湖生态系统研究站水-气 CO_2 交换通量日变化观测见图5。此次观测从12-23T08:00~24T08:00,整个观测时段一直是晴天,采样当天平均气温为 5.9°C 。从图5中可看出:除了23日观测开始到08:30前及18:00~22:30,通量是很小的正值外,其余时间都是负值,1天内水-气界面 CO_2 交换通量平均为 $-2.56 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,水体仍为大气 CO_2 的汇。出现这种变化规律,是由于在晴天的冬季,白天随着日照逐渐增强,水体内浮游植物光合作用

用增强,水体吸收 CO_2 的量逐渐增多,到14:00光照最强时达最大值,后随光合作用减弱,水体吸收 CO_2 合成有机碳能力减弱,到18:00水体由汇转变成源,但由于冬季水生生物较少,呼吸作用较弱,因此水入气的通量很小,在22:30以后又转变成汇,直至观测结束。

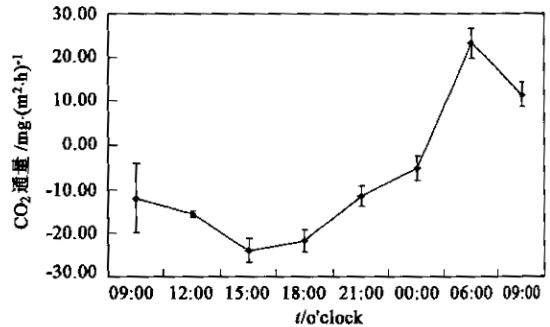


图4 秋季水-气 CO_2 交换通量日变化

Fig.4 Diurnal variation of the CO_2 flux on the water-air interface of Taihu Lake in autumn

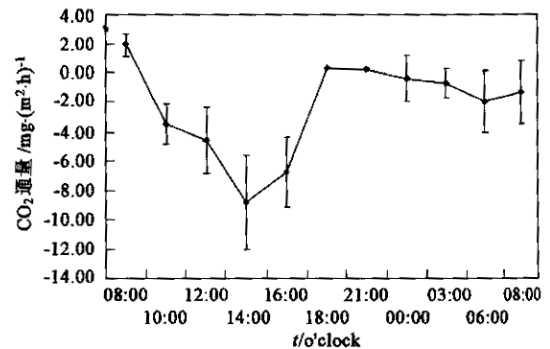


图5 冬季水-气 CO_2 交换通量日变化

Fig.5 Diurnal variation of the CO_2 flux on the water-air interface of Taihu Lake in winter

图2~5反映的是2003年4个季节的太湖生态系统研究站观测到的水-气 CO_2 交换通量日变化特征。从图5中可以得知:总体上4个季节太湖均是大气 CO_2 的汇,且夏秋季节通量值大,春冬季节通量值小。主要是由于夏秋季节太阳辐射强,且水中植物生长旺盛,光合作用和呼吸作用都比较强,水气之间的交换就比较激烈,表现出 CO_2 交换通量大;而春冬季节太阳辐射相对较弱,水中植物也较少,光合作用和呼吸作用都比较弱,水气之间的交换就比较少,表现出 CO_2 交换通量值小。

2.2 面上观测

梅梁湾是整个太湖中富营养化最严重的湖区

本次研究对该区域进行了面上观测,测点分布在前文1.1节中已经介绍.5个点在3次观测的水-气 CO_2 交换通量见图6.

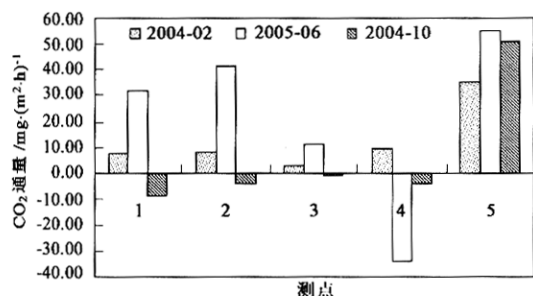


图6 梅梁湾水-气 CO_2 交换通量

Fig. 6 The CO_2 flux on the water-air interface of Taihu Lake in Meiliang Bay

从图6中可以看出:3次观测5号测点均为正值且数值较大,表示 CO_2 从水进入空气中,水体为 CO_2 的源,主要由于该测点位于污染源入湖区,是污染物最重,也是藻类生长最茂盛的地区,有机物含量也高,矿化作用排放出大量的 CO_2 ;4号测点属近污染源区,在2月份是 CO_2 的源,而在6和10月份则为 CO_2 的汇;1、2和3号测点分别位于开阔水面湖心区、梅梁湾口和梅梁湾中心区,这3处都是2月和6月水体为 CO_2 的源,10月为 CO_2 的汇.总体表

现出梅梁湾是大气 CO_2 的源,出现这种情况可能是因为这3次观测都是多云天气,光合作用不强烈,导致呼吸作用强于光合作用,水体表现出 CO_2 源的一面.总体看来污染越严重的地区, CO_2 交换通量就越大.研究还有待于进一步的深入.

2.3 藻草型湖区对比

图7和图8分别给出了在代表藻型湖区的太湖生态系统研究站和代表草型湖区的东太湖测站的水-气界面 CO_2 交换通量的长系列变化图,藻型湖区的观测是从2003-01~2005-06,草型湖区的观测从2003-05~2005-06.从图中可以看出:藻、草型湖区的水-气界面 CO_2 交换通量基本都是正值,很少有几次为负值,表示在观测时段内 CO_2 基本都是从水进入空气中,这可以用前面日变化的规律来解释,主要是因为长系列的观测中都是在上午09:00~10:00之间进行,此时水体生物的呼吸作用强于光合作用,因此水体是 CO_2 的源.对比图7和图8,可以发现:藻型湖区的 CO_2 交换通量大部分都在 $100.00 \text{ [mg/(m}^2\cdot\text{h)]}$ 以内,超出的次数很少,且没有明显的月份变化;而草型湖区的数据分布呈现明显的季节变化,从2003-05后渐渐上升,7月最高,然后逐渐下降,到2004年3、4月份降到最低,接着又逐渐上升,7、8月达到1个极值,再下降至2005年3、4月份的谷值后上升.

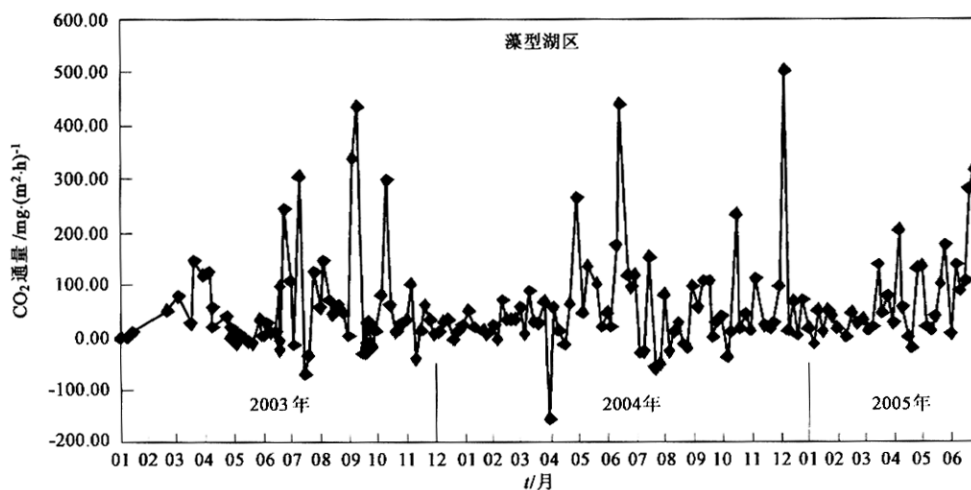


图7 藻型湖区水-气 CO_2 交换通量

Fig. 7 The CO_2 flux on the water-air interface in algal type area of Taihu Lake

图9显示出的是藻、草型湖区4季平均的水-气界面 CO_2 交换通量对比.从图9中可以看出明显的差别:藻型湖区的4个季节平均通量值相差都不大;而草型湖区则曾现明显的季节变化,夏季(6~8月)

明显最高, $134.28 \text{ mg/(m}^2\cdot\text{h)}$,其次是秋季(9~11月)的 $37.85 \text{ mg/(m}^2\cdot\text{h)}$,冬季第3(12~次年2月) $24.7 \text{ mg/(m}^2\cdot\text{h)}$,春季最低 $5.01 \text{ mg/(m}^2\cdot\text{h)}$.可以得出结论:水体中的藻类对于水-气界面 CO_2 交换通

量季节变化没有明显的影响,而水体中的草类对于水-气界面 CO_2 交换通量季节变化有很明显的影响.可能是由于草类对于 CO_2 的作用比藻类明显,草类

的生长存在明显的季节变化,因此 CO_2 交换通量也随季节出现明显的变化.具体原因还有待于进一步的研究.

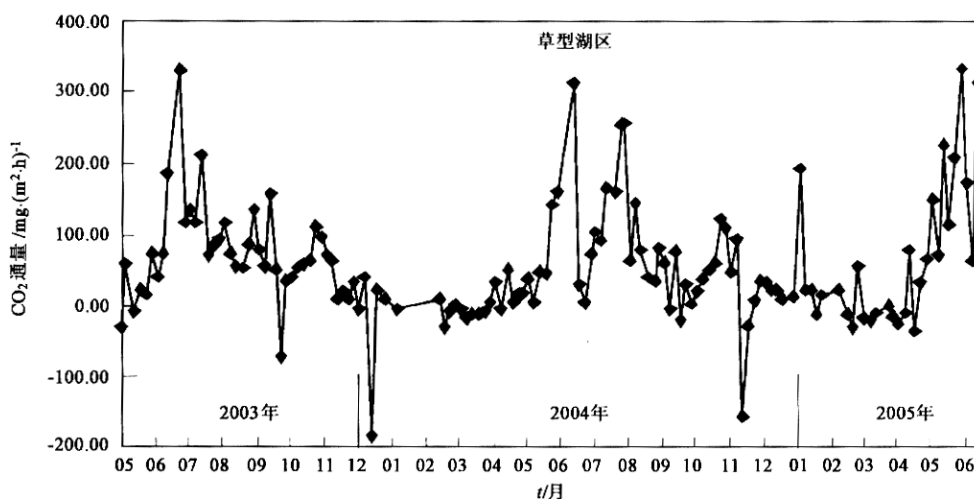


图 8 草型湖区水-气 CO_2 交换通量

Fig. 8 The CO_2 flux on the water-air interface in grass type area of Taihu Lake

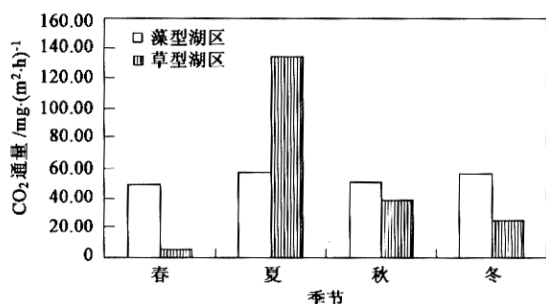


图 9 藻、草型湖区水-气 CO_2 交换通量季节变化

Fig. 9 Seasonal variation of the CO_2 flux on the water-air interface in algae and grass type area of Taihu Lake

2.4 相关因子分析

图 10 显示的是 2005-05-27 ~ 2005-05-28 在太湖生态系统研究站进行的水-气 CO_2 交换通量日变化及其可能相关因子的观测结果,因为观测期间一直是阴雨天气,光合作用很弱,水中生物的呼吸作用强,所以 CO_2 表现出从水中排向大气, CO_2 通量一直都为正值,但变化规律仍于前文日变化的分析相符.从图 10(a)可以看出 CO_2 通量和 pH 值呈一定的相关关系,主要由于 pH 值变高时,此时水体的游离 CO_2 容易溶解于水体成为碳酸盐,水体的游离 CO_2 分压降低,促使 CO_2 由大气向水体的方向发展,图中显示出的 CO_2 通量值也就变小;而当 pH 值变低时,水体的 CO_2 分压相对较高,促使 CO_2 由水体进

入大气,图中显示出的 CO_2 通量值也就变大.图 10(b)中 CO_2 通量和总碱度 TA 的变化也有不太明显的相关性,因为碱度是水中能与强酸发生中和作用的全部物质,总碱度是水中各种碱度成分的总和,TA 越大, HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 也越多, CO_2 也越少, CO_2 由水进入大气的通量值也越小.图 10(c)和 10(d)分别显示的是 CO_2 通量和水体中叶绿素 Chla 及总碳 TC 的关系, CO_2 通量和这两者都成不太明显的相关关系,主要由于 Chla 增加意味着水中的藻类增加,利用光合作用吸收的 CO_2 量也增大,由水中排出的 CO_2 通量就会减少;而由于图 10(d)中表现出 CO_2 通量值变小时, CO_2 从水气中进入大气中的量减少,水中的 TC 向外的输出量也减少.图 10(e)中 CO_2 通量和总氮 TN 的变化规律趋于一致,而图 10(f)中 CO_2 通量和总磷 TP 的变化规律近乎相反,这其中的原因需进一步的研究.图 10(g)中 CO_2 通量和温度的相关关系不是很明显.因为温度一方面与植物的光合作用密切相关,太阳光辐射增强,水体温度升高,植物的光合作用也增强,有利于 CO_2 从大气进入水体,图中显示 CO_2 通量减小;太阳光辐射减弱,水温降低,光合作用减弱,有利于水体中的 CO_2 进入大气,图中显示 CO_2 通量增大.而另一方面气体在水中的溶解度与温度成反比,温度升高,气体在水中的溶解度减小,有利于 CO_2 从水体进入大气,图中显示 CO_2 通量增大;温度降低,气体在水中的溶

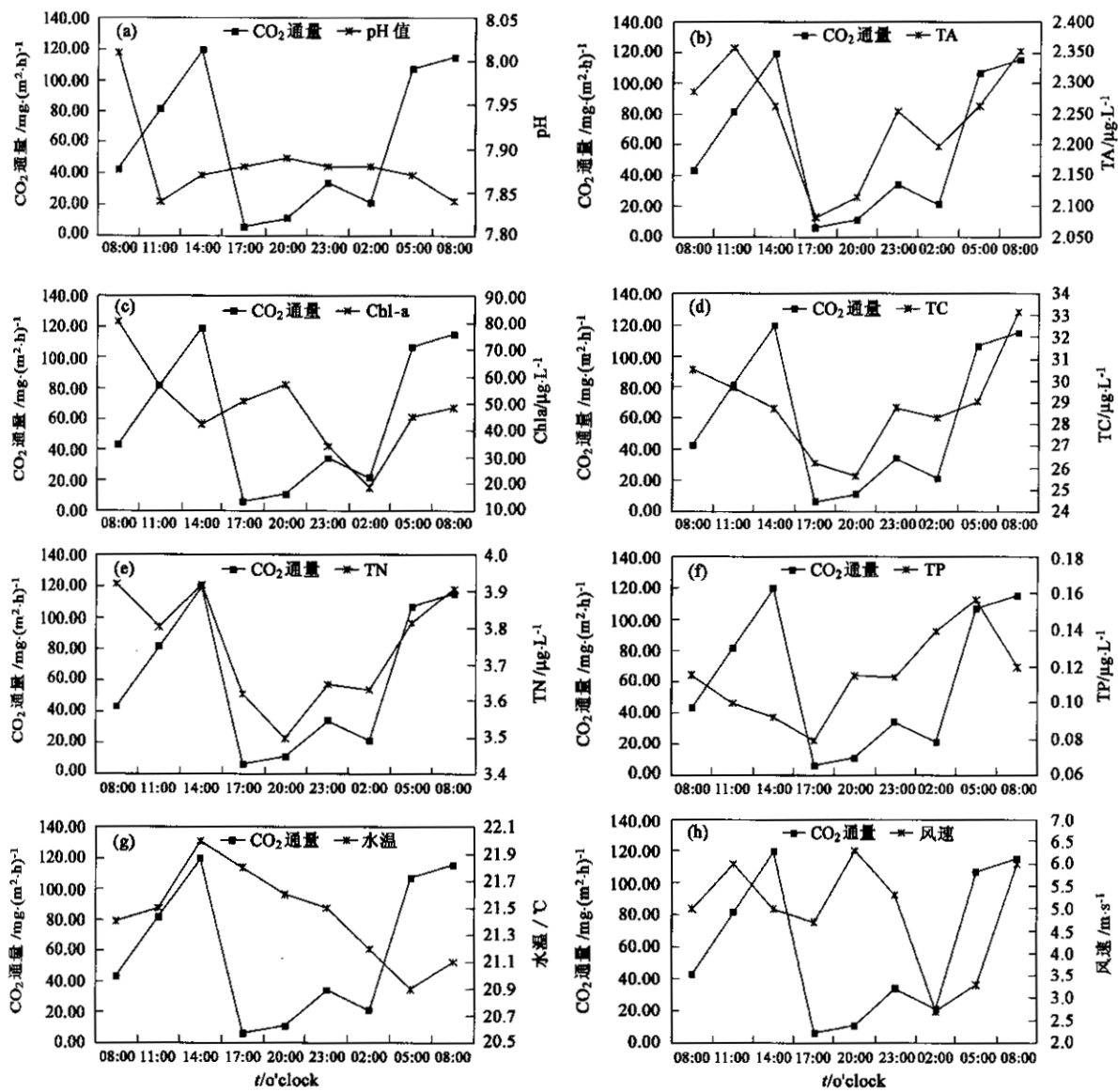


图 10 水-气 CO₂ 交换通量与相关因子

Fig. 10 CO₂ flux on the water-air interface of Taihu Lake and correlative factor

解度增加,有利于 CO₂ 从大气进入水体,图中显示 CO₂ 通量减小.图 10(h)则显示了 CO₂ 通量和风速的相互关系.风速增大,水-气界面 CO₂ 的交换速度都增加,风速减小,其交换速度相应减小,从而使得水-气界面的 CO₂ 通量相应的增加和减小.本文只是对于可能影响水-气界面 CO₂ 通量的相关因子做了初步分析,具体原因都还有待进一步研究.

3 结论

(1)太湖水-气界面 CO₂ 的交换通量一年四季都呈现明显的日变化规律,且在 14:00~16:00 左右达负的最大值;总体上 4 个季节太湖均是大气 CO₂ 的汇,且夏秋季节通量值大,春冬季节通量值小.

(2)对太湖不同污染区域的观测表明:污染越严重的地区,水-气 CO₂ 交换通量就越大.

(3)太湖水体中的藻类对于水-气界面 CO₂ 交换通量季节变化没有明显的影响;而水体中的草类对于水-气界面 CO₂ 交换通量季节变化有很明显的影响,夏季最高,春季最低.

(4)太湖水-气界面 CO₂ 的交换通量和天气情况、太阳辐射、风速及水温、pH、TA、Chla、TC、TN 和 TP 等都有一定的相关关系.

参考文献:

[1] Ramanathan V, Cicerone R J, et al. Trace gas and their potential role in climate change[J]. J. Geophys. Res., 1985, 90: 5547~5566.

- [2] Esserke G. Sensitivity of global climatic impacts[J]. *Tellus*, 1987, **39B**:245~260.
- [3] Kerr R A. It's official: Humans are behind most of global warming[J]. *Science*, 2001, **291**:556.
- [4] Bradley R. 1000 years of climate change[J]. *Science*, 2000, **288**:1353~1355.
- [5] Zwiers F W, Weaver A J. The cause of 20th century warming[J]. *Science*, 2000, **290**:2081~2083.
- [6] IPCC. Climate Change 2001: Synthesis Report[R]. 2001.
- [7] Houghton J. 全球变暖[M]. 北京:气象出版社, 1998. 15~51.
- [8] 吴兑. 温室气体与温室效应[M]. 北京:气象出版社, 2003. 23.
- [9] Michel E. Last millennium atmospheric CO₂[J]. *IGBP Global Change Newsletter*, 1999, **37**:20~21.
- [10] Watson A. The global of pCO₂[J]. *IGBP Global Change Newsletter*, 1999, **37**:6~7.
- [11] Tans P P *et al.* Observational constraints on the global carbon dioxide budget[J]. *Science*, 1990, **247**:1431~1438.
- [12] Denning A S, Collatz G J, Zhang C, *et al.* Simulations of terrestrial carbon metabolism and atmospheric CO₂ in a general circulation model. Part 1: surface carbon fluxes[J]. *Tellus*, 1996, **48**:521~542.
- [13] Fan S M, Gloor M, Mahlman J, *et al.* A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic CO₂ data and models[J]. *Science*, 1998, **282**:442~446.
- [14] Keeling R F, Piper S C and M. Global and hemispheric CO₂ sink deduced from changes in atmospheric CO₂ concentration[J]. *Nature*, 1996, **361**:218~221.
- [15] 王文杰, 石福臣, 祖元刚, 等. 陆地生态系统二氧化碳通量网的建设和发展[J]. *东北林业大学学报*, 2002, **30**(4):57~61.
- [16] Richey J K, Wissmar R C, Devol A H, *et al.* Carbon flow in four lake ecosystems[J]. *A Structural Approach*, 1978, **202**:1183~1186.
- [17] Downing J P, Meybeck M, Orr J. Land and water interface zones[J]. *Water Air and Soil Pollut.*, 1993, **70**:123~137.
- [18] Coleetal J J, Caraco N F, Kling G W, *et al.* Carbon dioxide super saturation in the surface waters of lakes [J]. *Science*, 1994, **265**:1568~1570.
- [19] Emerson S. Gas exchange rate in small Canadian shield lakes [J]. *Limnology and Oceanography*, 1975, **20**(5):754~761.
- [20] Hope D, KRATZ T K, Riera J L. The relationship between CO₂ and dissolved organic carbon in the surface waters of 27 northern Wisconsin Lake [J]. *Environ. Qual.* 1996, **19**:1442~1445.
- [21] Del Giorgio P A, Cole J J, Caraco N F, *et al.* Linking planktonic biomass and metabolism to net gas fluxes in northern temperate lakes [J]. *Ecology*, 1999, **80**(4):1422~1431.
- [22] 王苏民, 奚鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京:科学出版社, 1998. 1~2.
- [23] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民, 等. 太湖水环境演化过程与机理[M]. 北京:科学出版社, 2004:1.
- [24] 王跃思, 刘广仁, 王迎红, 等. 一台气相色谱仪同时测定陆生生态系统 CO₂, CH₄和 N₂O 排放[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2003, **4**(10):84~90.
- [25] 周凌晔, 李金龙, 温玉璞, 等. 瓦里关山大气 CO₂ 及其 δ¹³C 底变化[J]. *环境科学学报*, 2003, **23**(3):135~139.
- [26] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京:中国环境科学出版社, 1990. 144~146, 162~164, 206~207, 268~270.