

太湖梅梁湾冬季水-气界面二氧化碳通量 日变化观测研究^{*}

李香华¹ 胡维平^{2,*} 杨龙元² 张发兵³ 胡志新^{2,4}

(¹江苏省水文水资源勘测局南京分局, 南京 210008; ²中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008;

³上海市环境监测中心, 上海 200030; ⁴中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 应用静态箱式法对太湖梅梁湖区冬季(2003 年 12 月 23 日 8:00~26 日 6:00)的水气界面 CO₂ 通量进行了昼夜连续观测,共测得 60 组数据,分析了梅梁湾湖区 CO₂ 通量的冬季日变化规律。结果表明,在光照条件较好,风速较小情况下,白天梅梁湾湖区为 CO₂ 的汇,极大值出现在 14:00 时,其平均 CO₂ 通量为 $-3.01 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$;夜间梅梁湾湖区 CO₂ 通量值为 $-0.897 \sim -1.006 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,其平均通量为 $-0.02 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$;在阴天、风速较大时,湖区 CO₂ 通量日变化与前面有较大差异,表现为 CO₂ 的强源,最大 CO₂ 通量达到 $76.53 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

关键词 太湖梅梁湾,水-气界面,CO₂ 通量,日变化

中图分类号 Q148

文献标识码 A

文章编号 1000-4890(2005)12-1425-05

Diurnal variation of carbon dioxide flux on water-air interface of Meiliang Bay, Taihu Lake in wintertime.
LI Xianghua¹, HU Weiping², YANG Longyuan², ZHANG Fabing³, HU Zhixin^{2,4} (¹Jiangsu Hydrology & Resources Survey Bureau, Nanjing Branch, Nanjing 210008, China; ²Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; ³Shanghai Environmental Monitoring Centre, Shanghai 200030, China; ⁴Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(12):1425~1429.

Employing statistic box method, this paper monitored 72 h continuously the diurnal variation of carbon dioxide flux on the water-air interface of Meiliang Bay, Taihu Lake in wintertime. The results showed that in clear and breezy days, water was the sink of atmospheric carbon dioxide at daytime, and its carbon dioxide flux was about zero at night, with the mean values of carbon dioxide flux being -3.01 and $-0.02 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, respectively. But, in cloudy days and after a durative gale, water was a strong source of atmospheric carbon dioxide, with the maximum value $76.53 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. It could be concluded that wind speed had a significant effect on CO₂ flux in wintertime.

Key words Meiliang Bay of Taihu Lake, water-air interface, carbon dioxide flux, diurnal variation.

1 引 言

自工业革命开始后,随着人为 CO₂ 排放量的增加,大气中 CO₂ 含量也正逐年增加,CO₂、CH₄ 等气体的“温室效应”已成为影响气候变化的一个不可忽视的重要因素^[2,10,13]。据估计,到下世纪,人类活动将使大气 CO₂ 浓度增加 1 倍,到那时,全球平均温度将升高 2~3 °C^[7]。这将使全球产生一系列可怕的变化,例如,冰雪融化,海平面升高,陆地面积变小等^[23]。

陆地生态系统的碳循环和碳蓄积是全球变化科学中一个重要组成部分^[1],湖泊生态系统作为陆地生态系统的一部分,其水-气界面、水-陆界面、水-沉积物界面的碳交换不可忽视^[17,19]。据初步研究,全

球湖泊对大气 CO₂ 的贡献达每年 $1.4 \times 10^{14} \text{ g}$,这个量相当于由陆地江河向海洋输入有机碳和无机碳总和的一半^[16]。特别是 20 世纪 50、60 年代以来,湖泊富营养化问题越来越突出,湖泊对大气汇的作用越来越明显,研究湖泊水-气界面 CO₂ 通量不仅对碳循环规律的研究具有非常重要的作用,而且对研究湖泊富营养化也具有一定的意义。

我国是个湖泊众多的国家,湖泊总面积达 $9.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ 以上^[3],所以研究湖泊碳循环对我国有很重要的意义,这将关系到我国未来的能源政策和农业政策的制定,以及怎样履行联合国气候变化框

^{*} 中国科学院知识创新工程项目(ZCX1-SW-01-15)和国家自然科学基金资助项目(40271160)。

^{**} 通讯作者

收稿日期:2004-12-13

改回日期:2005-02-28

架公约。

本文应用静态暗箱法,对太湖富营养化较严重的梅梁湖区进行了单点水-气界面 CO₂ 通量冬季日变化观测,并分析了其成因和影响因子。

2 材料与方法

2.1 采样点设置

采样点设在中国科学院南京地理与湖泊研究所太湖生态系统研究站附近,位于梅梁湖区。梅梁湖区是太湖富营养化最严重的湖区,藻类水华暴发频繁。2003 年 8 月份该湖区总氮含量达到 3.88 mg·L⁻¹,总磷含量达到 0.302 mg·L⁻¹,叶绿素含量达到 90.1 μg·L⁻¹,为超 5 类水。

2.2 样品采集-分析方法

样品采集-分析方法采用静态箱-气相色谱法^[10],静态箱-气相色谱法的基本工作原理与农田静态箱法类似是用已知容积和底面积的密闭无底箱体(一般由不锈钢制成)将要测定的水表面罩起来,每隔一段时间抽取箱内气体,用气相色谱仪测定其中目标气体的浓度,然后根据气体浓度随时间的变化率,计算被罩表面水-气间微量气体的交换速率。该方法具有易操作、结构简单、成本低廉和灵敏度高等优点。

本次实验的采样设备主要由采样箱、导气管和针筒组成^[6,12]。采样箱为高 50 cm、直径 30 cm 的不锈钢铁桶,由于水具有流动性,部分光合作用的产物也能进入采样箱内,因此采用暗箱观测水-气界面 CO₂ 通量与观测陆地有所不同。采样前先使桶内充满空气,然后倒置于固定在水面上的支架上。采样时开启箱内混合设备,使箱内气体混合均匀。然后用针筒抽取桶内气体 100 ml。3 箱同步采样,相邻两次间隔时间为 15 min,3 个桶采完一遍后,即进行下一轮采样,共采集 4 次。在最后一针采气的同时采集桶外空气样。完成一次完整采样需 60 min。

每次采气过程中,同时采集表层湖水,与样气一起送入实验室,分析其 pH 值、电导率、碱度、叶绿素含量,实验分析方法参见文献^[9]。

2.3 计算方法

根据分析结果(气体的浓度值),求出气体浓度随时间的变化率(ΔC/Δt),再根据下式计算水气界面 CO₂ 的交换通量^[6,8,11,12,20]

$$F = \rho \frac{V}{A} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \times \frac{\Delta C}{\Delta t}$$

式中, F 为气体的交换通量,其中 V 为箱内口气体体积, ρ 为标准状态下各气体的密度, A 为箱子覆盖面积, P 为采样点处的大气压, P_0 和 T_0 为标准状态下的空气绝对温度和气压。 T 为采样时该点的绝对温度, ΔC 为气体在采样时间间隔内的浓度差, Δt 为采样时间间隔。

3 结果与分析

3.1 CO₂ 通量及部分水质状况

太湖梅梁湾湖区的初始观测时刻(12 月 23 日 8:00)天气晴好,水面风平浪静,12 月 23 日 8:00~25 日 5:00 之间大部分时间风速为零,最大风速在 3.0 m·s⁻¹左右,直到 25 日凌晨 6:00 开始刮大风,风力骤增至 5.95 m·s⁻¹,最大风速达到 8.15 m·s⁻¹,而且天气也开始由晴转阴。3 d 来该测点的风速、水温、叶绿素含量、碱度及 CO₂ 通量见表 1(文中所有的 CO₂ 通量值正值均代表 CO₂ 从水体进入大气,负值均代表 CO₂ 从大气进入水体)。

表 1 12 月 23 日 8:00~26 日 6:00 梅梁湾湖区风速、水温、叶绿素、碱度及碳通量
Tab.1 Values of wind speed, temperature, Chla, alkalinity and CO₂ flux in Meiliang Bay from 8:00 of 23 to 6:00 of 26 December

时间	风速 (m·s ⁻¹)	叶绿素 (μg·L ⁻¹)	碱度 (mg·L ⁻¹)	CO ₂ 通量 (mg·m ⁻² ·h ⁻¹)
23 日 8:00	2.00	9.90	2.31	1.97
10:00	0.65	11.38	2.36	-3.47
12:00	0.35	17.33	2.34	-4.63
14:00	3.00	5.78	2.23	-8.90
16:00	0	9.90	2.26	-5.36
18:00	0.33	10.46	2.26	0.36
21:00	0	2.89	2.30	0.26
0:00	0.23	2.29	2.25	-0.34
3:00	0	3.18	2.26	-0.66
6:00	0	2.23	2.28	-1.95
24 日 8:00	0.65	2.93	2.28	-1.25
10:00	2.00	13.06	2.26	-6.70
12:00	0.85	8.48	2.24	-3.08
14:00	0	6.03	2.28	-4.17
16:00	0	9.49	2.29	0.38
18:00	0.10	2.23	2.27	-1.24
21:00	1.67	2.26	2.30	-1.69
0:00	2.67	0.00	2.23	0.34
3:00	5.90	1.98	2.25	-0.10
6:00	7.15	0.00	2.28	3.97
25 日 8:00	8.00	0.00	2.30	-3.81
10:00	8.15	2.12	2.30	0.43
12:00	7.00	2.12	2.30	-4.29
14:00	6.00	0.00	2.32	10.97
16:00	5.43	13.06	2.48	59.49
18:00	3.23	17.63	2.46	76.53
21:00	2.10	19.59	2.38	39.66
0:00	4.50	17.02	2.43	57.05
3:00	6.50	10.04	2.40	33.03
6:00	7.15	15.23	2.32	7.37

从表 1 可见,第一个 24 h 的观测通量与第二个 24 h 观测通量比较相似,白天均为 CO₂ 的汇,夜间 CO₂ 通量几乎接近零值。这表明在日照较好风速较小时,冬季梅梁湖区为 CO₂ 的汇,早晨随着日照逐渐增强,水体中浮游植物光合作用增强,水体吸收 CO₂ 的量逐渐增多,到 14:00 时左右 CO₂ 通量达到极大值为 -6.54 mg·m⁻²·h⁻¹,后随着光合作用的减弱,呼吸作用的增强,水体由 CO₂ 的汇逐渐转为源。且由于冬季水生生物较少,呼吸作用较弱,温度变化导致的 CO₂ 的溶解度变化对 CO₂ 通量的影响也较大,夜间温度的降低,CO₂ 在水中的溶解度增加,所以夜间部分时间仍为 CO₂ 的汇,到凌晨 6:00 左右,达到一天源的极大值为 1.006 mg·m⁻²·h⁻¹。在风力较强、日照较弱情况下,梅梁湾湖区 CO₂ 通量呈现明显不同的变化规律,由于天气转阴,光合作用较弱,8:00~12:00,CO₂ 通量为弱的汇,12:00 以后,湖区逐渐转为 CO₂ 的强源,到晚上 6:00 达到源的极大值为 76.53 mg·m⁻²·h⁻¹。之后风速下降,CO₂ 通量也开始下降,26 日早晨 6:00 时 CO₂ 通量为 7.37 mg·m⁻²·h⁻¹。

3.2 影响 CO₂ 通量的主要因素

大气与水体之间 CO₂ 的交换通量受风速、水温、碱度、碳酸盐的分解及生物泵等多种因素的影响^[15]。在一般情况下,并不能得出一个生态系统是纯粹的源或汇的结论^[21]。由这次水-气界面 CO₂ 通量观测结果可见,风速是影响水-气界面 CO₂ 通量的重要因素。在风速较小且天气晴朗时,冬季梅梁湾为大气 CO₂ 的汇,但在风速较大的阴天,则为大气 CO₂ 的强源。Wanninkhof^[22]认为风速与海-气界面 CO₂ 通量的计算公式可表达为:

$$F_{CO_2} = k87.6a([CO_2W] - \beta[CO_2a])$$

式中,β为 CO₂ 的溶解系数,α为 CO₂ 的化学加速系数,k 为气体交换系数,k 与风速有密切关系,其与风速关系的表达式为:

$$k = 0.17u \quad u < 3.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$
$$k = 2.85u - 9.65 \quad 3.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} < u < 13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

式中,u 为风速^[14,18,22]。由此可见,风速与海-气界面 CO₂ 通量的绝对值成正比关系。从观测结果来看,在浅水富营养化湖泊-太湖梅梁湾湖区中,CO₂ 通量绝对值与风速间的对应关系在风速较小时相当明显(图 1a)。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 CO₂ 通量相应地增加和减小。这主要是因为风应力将使水表面破碎,增加水气接触面积,易于溶于水中的 CO₂ 进入大气,而风浪过后,藻类漂浮于水面,藻类的光合或呼吸作用将使表层水 CO₂ 分压降低或增加,从而使水-气界面 CO₂ 通量明显得增大或减小^[6]。但在风速>3.6 m·s⁻¹时,CO₂ 通量与风速之间没有明显的相关性(图 1b),刚起风时,CO₂ 通量数值与前面相差不多,但在大风持续一段时间后,CO₂ 通量大幅度增大,这可能由于在浅水湖泊,较大的风速持续一段时间后,可使水体风浪随之大幅度增大,搅动水体,引起底泥悬浮,底泥中碳酸盐溶解于水体,造成水体碱度升高,碱度升高后,促使更多的 CO₂ 由水体释放到空气。

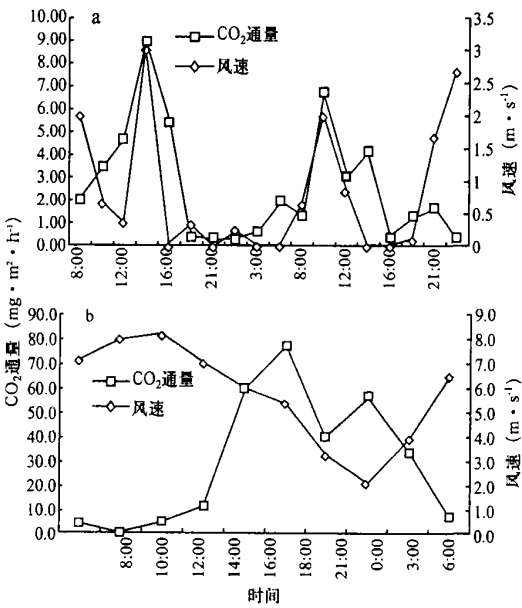


图 1 CO₂ 通量与风速的变化
Fig.1 Variation of CO₂ flux and wind speed
a)12月23~25日;b)12月25,26日.

由图 2a 可见,随风速的变化,CO₂ 通量与碱度具有相同的变化趋势,在风速较大时,太湖梅梁湾水体的碱度逐渐升高,CO₂ 通量也随之升高,CO₂ 通量与碱度的相关性达到 0.78(图 3a),说明在浅水富营养化湖泊太湖梅梁湾 CO₂ 通量与碱度具有明显的相关性。

温度为影响 CO₂ 溶解度的另一重要因素。温度一方面可影响植物的光合作用,白天太阳光辐射增强,水体温度升高,植物的光合作用也增强,有利于 CO₂ 从大气进入水体;太阳光辐射减弱,水温降低,光合作用减弱,有利于水体中的 CO₂ 进入大气。另一方面气体在水体中的溶解度与温度成反比,温

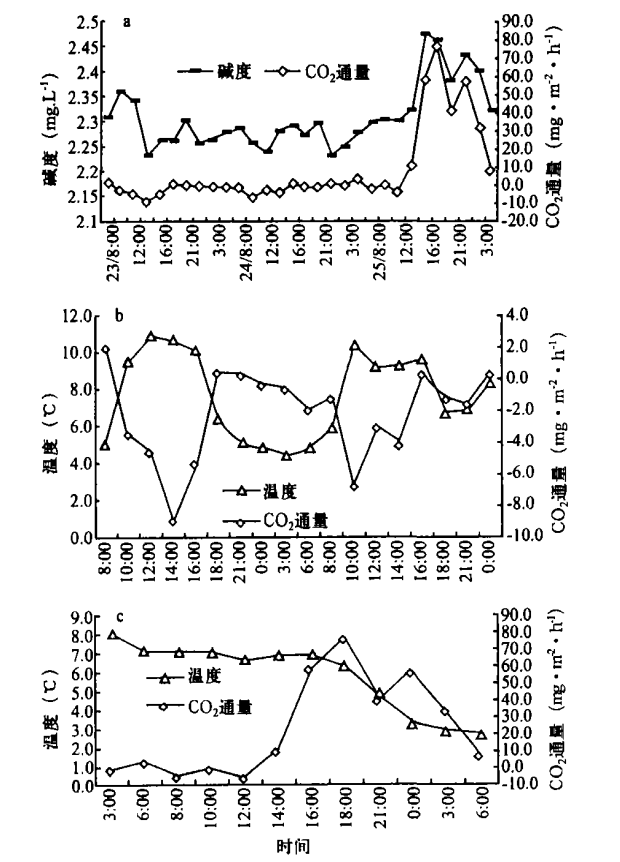


图 2 水体温度、碱度与 CO₂ 通量随时间变化
Fig. 2 Temporal variation of alkalinity, water temperature and CO₂ flux
a) 碱度与 CO₂ 通量; b) 12 月 23~25 日水体温度与 CO₂ 通量; c) 12 月 25, 26 日水体温度与 CO₂ 通量.

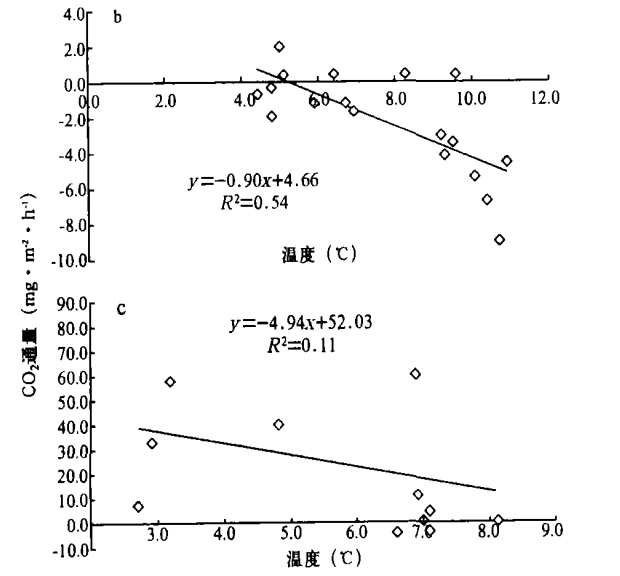


图 3 水体温度、碱度与 CO₂ 通量的相关性
Fig. 3 Correlations between CO₂ flux and alkalinity and water temperature
a) 碱度与 CO₂ 通量; b) 12 月 23~25 日水体温度与 CO₂ 通量; c) 12 月 25, 26 日水体温度与 CO₂ 通量.

度升高,气体在水中的溶解度减小,有利于 CO₂ 从水体进入大气;温度降低,气体在水中的溶解度增加,有利于 CO₂ 从大气进入水体。由图 3b 可见,在风速较少情况下,CO₂ 通量与温度呈现一定的负相关性。说明在冬季水体温度对气体在水体中的溶解度的影响较小,对光合作用影响较大。在风速较大时,CO₂ 通量与温度几乎不再具有相关性。

CO₂ 在水体表面和大气圈之间交换的另一个重要控制因子是水生生物的生物泵作用^[4,5]。生物泵主要依靠水生生物(尤其是浮游植物)的光合作用和呼吸作用,湖泊水体的浮游植物通过光合作用将湖泊水体中溶解的无机碳转化为有机碳,水体 CO₂ 分压降低,大气中的 CO₂ 进入水体。在湖泊的初级生产过程中,还需从湖水中获取磷酸盐和硝酸盐,这将使水的碱度降低,并导致 CO₂ 分压降低,促使 CO₂ 从空气进入水体。而水生生物的呼吸作用刚好相反,它释放 CO₂,使水中 CO₂ 的分压增加,进而使 CO₂ 从水体进入空气。

此次实验结果可看出在风浪较小情况下,CO₂ 通量与水体表面的叶绿素含量呈明显的负相关性(图 4a),其负相关性达到 0.70,这主要由于白天太阳辐射增强,藻类趋光上浮,并利用光合作用,吸收水体的 CO₂,水体 CO₂ 含量减少,导致 CO₂ 从大气

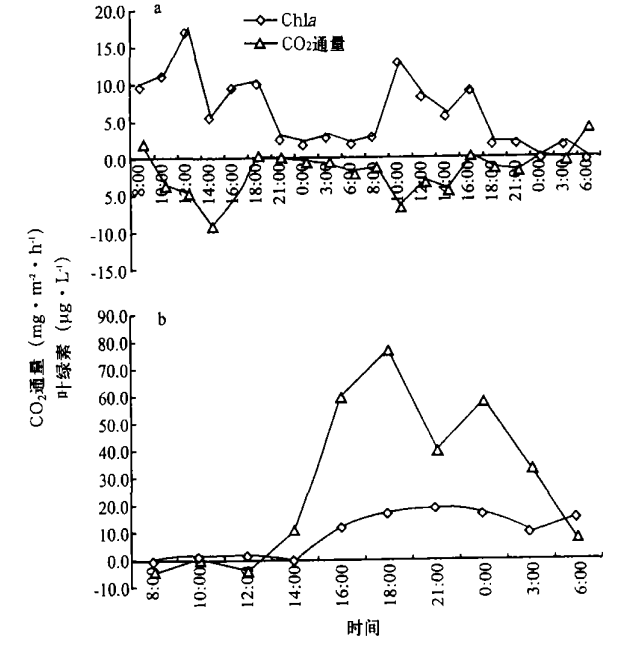


图 4 碱通量与叶绿素变化
Fig. 4 Temporal variation of CO₂ flux and Chl a
a) 12 月 23~25 日; b) 12 月 25, 26 日.

进入水体。夜间水体的 CO_2 通量主要由水生生物的呼吸作用控制,呼吸作用释放 CO_2 , 导致 CO_2 从水体进入空气。而在风浪较大情况下,叶绿素与 CO_2 通量没有明显的相关性(图 4b)。

4 结 论

由上述分析可知,在冬季晴好天气,太湖梅梁湾水-气界面 CO_2 通量具有明显的日变化特征,表现为白天是 CO_2 的汇,夜间则接近为零,总体上仍为大气 CO_2 的汇。在水面风速较大时,由于受底泥悬浮后底泥中碳酸盐溶解的影响,太湖梅梁湾湖区主要为 CO_2 的源。从此次 CO_2 通量观测实验分析结果可看出,在湖面风速较大时, CO_2 通量日变化趋势与风速较小时已完全不一样,可见风速对浅水湖泊 CO_2 通量的影响颇为重要。其次,按照生物泵原理夜间水生生物的光合作用已停止,其呼吸作用产生 CO_2 气体,此时水体应该为大气 CO_2 的源,但从此次结果来看,夜间 CO_2 通量有部分为负值,即为大气 CO_2 的汇。这主要由于在冬季,水生生物相对较少,生物泵对 CO_2 通量的影响相对较弱,夜间水体温度降低,水体中 CO_2 的溶解度升高,导致 CO_2 由空气进入水体。这同时也说明在冬季自然因素风速、碱度、温度等对 CO_2 通量的作用明显比春季藻类较多情况下^[6]要高得多。

参考文献

- [1] 于贵瑞. 2003. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积[M]. 北京:气象出版社, 2~3.
- [2] 王伟强,黄宣宝,张远辉. 1997. 东印度洋海-气二氧化碳分压差及其通量研究[J]. 台湾海峡, **16**(4): 403~408.
- [3] 王苏民,窦鸿身. 1998. 中国湖泊志[M]. 北京:科学出版社, 1~2.
- [4] 孙云明,宋金明. 2002. 中国海洋碳循环生物地球化学过程研究的主要进展(1998-2002)[J]. 海洋科学进展, **20**(3): 110~118.
- [5] 严国安,刘永定. 2001. 水生生态系统的碳循环及对大气 CO_2 的汇[J]. 生态学报, **21**(5): 827~833.
- [6] 张发兵,胡维平. 2004. 太湖春季水-气界面碳通量日变化研究

- [J]. 生态环境, **13**(2): 27~33.
- [7] 张 滨,马黎明,乔 然. 1996. 海水中总溶解 CO_2 的测试方法和计算[J]. 海洋预报, **13**(1): 76~79.
- [8] 金 心,石广玉. 2001. 生物泵在海洋碳循环中的作用[J]. 大气科学, **125**(5): 683~688.
- [9] 金相灿,等. 1990. 湖泊富营养化调查规范(第二版)[M]. 北京:中国环境科学出版社.
- [10] 陈泮勤,郭裕福. 1993. 全球气候变化的研究和进展[J]. 环境科学, **4**: 16~23.
- [11] 陈毅凤,张 军,万国江. 2001. 贵州草海湖泊系统碳循环简单模式[J]. 湖泊科学, **13**(1): 15~19.
- [12] 曹景蓉,洪业汤. 1996. 贵州郊区水稻田甲烷释放通量的研究[J]. 土壤通报, **27**(1): 19~22.
- [13] 詹滨秋,赵永平. 1989. CO_2 、海洋和气候[J]. 海洋与湖沼, **20**(1): 92~99.
- [14] Bates NR, Merlivat L. 2001. The influence of short-term wind variability on air-sea CO_2 exchange [J]. *Geophys. Res. Lett.*, **28**(17): 3281~3284.
- [15] Biswas H, Mukhopadhyay SK, De TK. 2004. Bio-genic controls on the air water carbon dioxide exchange in the Sundarban mangrove environment, northeast coast of Bay of Bengal, India [J]. *Limnol. Oceanogr.*, **49**(1): 95~101.
- [16] Coleetal JJ, Caraco NF, Kling GW, et al. 1994. Carbon dioxide supersaturation in the surface waters of lakes [J]. *Science*, **265**: 1568~1570.
- [17] Frankignoulle M, Abril G, Borges A, et al. 1998. Carbon dioxide emission from European estuaries [J]. *Science*, **282**: 434~436.
- [18] MacIntyre S, Wanninkhof R, Chanton JP. 1995. Trace gas exchange across the air-water interface in freshwater and coastal marine environments [A]. In: Maston PA, eds. *Biogenic Trace Gases: Measuring Emissions from Soil and Water* [C]. UAS. Blackwell Science, 52~97.
- [19] Meybeck M. 1993. Riverine transport of atmospheric carbon; Source, global typology and budget [J]. *Water Air Soil Poll.*, **70**: 443~463.
- [20] Mukherjee B, Pandey PN, Singh SN. 2002. Mathematical modeling and system analysis of inorganic carbon in the aquatic environment [J]. *Ecol. Model.*, **152**: 129~143.
- [21] Mukhopadhyay SK, Biswas H, De TK, et al. 2002. Impact of sundarban mangrove biosphere on the carbon dioxide and methane mixing ratio at the NE coast of Bay of Bengal, India [J]. *Atmos. Environ.*, **36**: 629~638.
- [22] Wanninkhof R. 1992. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean [J]. *Geophys. Res.*, **97**: 7373~7382.
- [23] Wong CS. 1983. Marine carbon research [A]. In: Page JS, eds. *Annual Review of Activities* [C]. Sidney: Institute of Ocean Sciences, 48~49.

作者简介 李香华,女,1974年11月生,主要从事水环境研究。E-mail:xiangzi0011@sina.com

责任编辑 李凤芹