

太湖春季水-气界面碳通量日变化观测研究

张发兵^{1,2}, 胡维平¹, 杨龙元¹

1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要: 利用静态箱观测法对春季太湖不同生态类型(藻型、草型)的湖区春季水-气界面碳通量进行了昼夜连续观测, 结果表明, 水-气界面碳通量存在显著日变化规律, 其极值均出现在凌晨 5:00 和下午 2:00 左右, 但不同湖区碳通量的日变化存在明显差异。在富营养化较严重的梅梁湾湖区, 昼间主要为大气 CO₂ 的汇, 其平均碳通量为 -7.74 mg/(m²·h), 夜间主要为大气 CO₂ 的源, 其碳通量为 5.32 mg/(m²·h); 湖心区域, 夜间为大气 CO₂ 的源, 日间在源和汇间波动。而在水质较好的东太湖区域, 昼夜均为大气 CO₂ 的源, 其平均碳通量为 11.63 mg/(m²·h)。

关键词: 太湖; 水-气界面; 碳通量; 日变化

中图分类号: X142

文献标识码: A

文章编号: 1672-2175 (2004) 02-0186-05

CO₂ 是温室效应的主要气体^[1], 因此大气 CO₂ 源汇问题一直是众多学者研究的重点。湖泊面积虽然只占地球表面面积的 0.5%, 但由于其和大气的碳交换量变化受人类活动影响较大, 且具有指示作用, 所以仍然引起了众多学者的注意。Downing 等^[2]研究认为, 贮存在湖泊的生物体内有机碳 (C) 大约为 0.036 Gt/a, 如溶解态有机碳 (DOC) 沉积率以 30% 计, DOC 将有 C 0.015 Gt/a 沉积在湖泊中, 故全球范围内总有机碳 (TOC) 则有约 C 0.051 Gt/a 滞留在湖泊中, 其中有 C 0.035 Gt/a 是来源于大气 CO₂, 加上碳酸盐的沉积等, 湖泊对大气 CO₂ 的总汇达 C 0.053 2 Gt/a^[2]。由此可见, 湖泊对大气 CO₂ 浓度的影响不容忽视^[3]。虽然国外有众多学者对湖泊水-气界面的 CO₂ 交换进行了大量研究^[4,5], 但是绝大部分的工作都集中在湖泊水-气界面碳交换的模式研究和总量估算, 缺乏定量精确观测数据作为支撑。本文尝试把水稻田静态箱观测方法应用于太湖水-气界面碳通量的观测, 以期对湖泊水-气界面碳交换及湖泊对大气 CO₂ 定量精确估算提供第一手资料和方法。

1 材料与方法

1.1 采样点布设

不同类型区域观测点的分布情况见图 1。**1 号点 (120°10'02.9"E, 31°29'00.3"N) 处在藻型湖区**, 该区底泥厚度约为 50 cm, 湖底无沉水植物, **是太湖中富营养化较严重的湖区**。在春夏季节该区域水体中叶绿素 a (chl a) 总氮 (TN) 总磷 (TP) 质量浓度分别可达 196 μg/L、5 mg/L 和 0.25 mg/L; 水质普遍为超 类, 在藻类“水华”暴发时, 该湖区为太湖藻类“水华”最严重的区域。**2 号点 (120°13'13.1"E, 31°13'53.5"N) 位于太湖中部偏东水域**。该点及附近区域底泥厚度约为 5 cm, 湖底有零星分布的沉水植物, 叶绿素 a 和各营养盐含量均低于 1 号点所在的梅梁湾湖区。春夏季节其叶绿素 a (chl a) 最高质量浓度为 65 μg/L, 总氮 (TN) 总磷 (TP) 最高质量浓度分别可达 3.5 mg/L 和 0.15 mg/L; 水质多为 类。**3 号点 (119°30'30"E,**

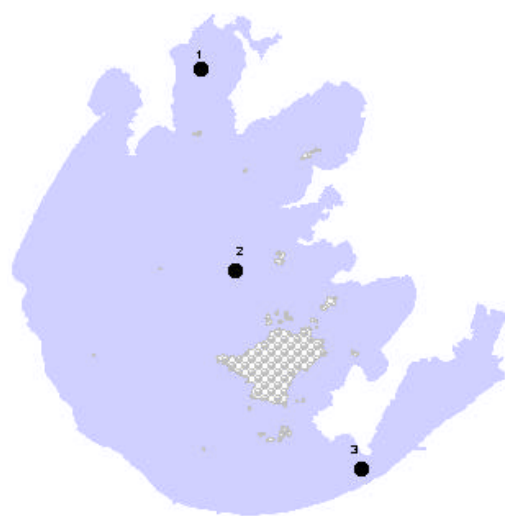


图 1 采样点分布

119°30'30"N) 位于太湖南部动太湖湾口附近水域, 底泥厚度在 100 cm 以上, 湖底沉水植物茂盛。水质较好, 多为 类, 甚至更好, 基本无藻华。春夏季节其叶绿素 a (chl a) 质量浓度的变化范围为 5~20 μg/L, 总氮 (TN) 质量浓度的变化范围为 1~2 mg/L, 总磷 (TP) 质量浓度的变化范围为 0.05~0.15 mg/L (太湖湖泊生态系统研究站 2001 年年报)。

1.2 样品采集

采样箱主体设备见参考文献[6]。采样箱箱口朝下悬挂于固定在汽车内胎上的铁支架上。采样前让箱口朝上, 以便箱内充满空气, 采样时将采样箱 (3 个) 置于水面, 箱开口的一面浸入水中, 浸入水中的深度根据风浪情况而定, 条件是保证箱内空气与外界隔绝。启动箱内混合设备, 待箱内气体混合均匀后, 用医用针筒通过采气管抽取桶内空气 100 ml。三箱同步采样, 隔 15 min 采样一次, 每箱采集四次。并在最后一针采样结束时, 采集桶外空气样。每次开始采气样的同时采一次水样, 并对湖面两米高的风速风向, pH, 总碱度, 水温, 透明度等其它水环境要素进行同步观测。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40271100); 中科院知识创新工程项目 (KZCX1-SW-01-15)

作者简介: 张发兵 (1976 -), 男, 硕士研究生, 主要从事环境研究。

收稿日期: 2003-10-07

1.3 样品分析通量计算

采集的气样迅速运回实验室,用 Hp 公司生产的 4890 型气相色谱仪来分析计算气样中 CO_2 的质量分数。由于已知 CO_2 浓度的标准空气在使用过程中浓度会变化,因此在分析一组气样(13个)的前、中、后分别注入两针标准空气,以6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。

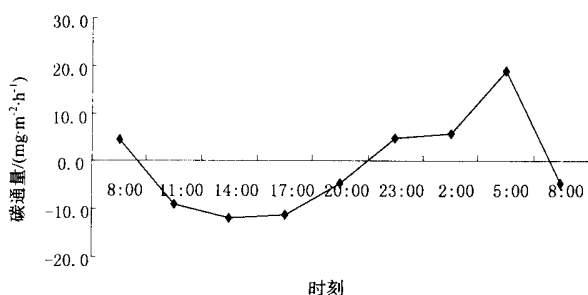
水-气界面碳通量的计算公式^[7-10]如下:

$$F = \rho(V/A) \times (P/P_0) \times (T/T_0) \times (\Delta C/\Delta t)$$

式中 F 为 CO_2 气体的交换通量,其中 V 为箱内空气体积, ρ 是标准状态下 CO_2 气体密度, A 是箱子覆盖面积, P 是采样地点的气压, P_0 、 T_0 为标准状态的空气绝对温度和气压, T 为采样时的绝对温度, Δt 为采样时间间隔, ΔC 为气体在采样时间间隔内的浓度差。

2 结果

梅梁湾湖区(1号点)的观测始于4月26日早晨8:00,观测的初始时刻天气为阴,10:00左右天气转为晴朗,并一直持续到观测结束。该区域水-气界面碳通量24h连续观测结果见图2。湖区昼间吸收大气中的 CO_2 ,夜间向大气

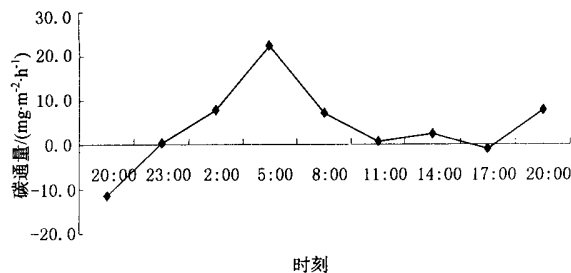


(负值表示 CO_2 从空气进入水中,正值表示 CO_2 从水中进入空气)

图2 1号点水-气界面碳通量随时间的变化

排放 CO_2 ,昼间的平均吸收通量为 $7.74 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,夜间的平均排放通量为 $-5.32 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,一天24h内梅梁湾湖区水-气界面碳交换总通量向下,水体为大气 CO_2 的汇。观测的初始时刻由于是早晨且为阴天,太阳辐射较弱。随着10:00后天气的好转,到达水面的太阳辐射逐渐增加,光合作用逐步增强,水体中 CO_2 大量被植物利用,含量逐渐降低。水体和大气 CO_2 交换由8:00的向上通量转变为向下通量,且强度逐渐增加,11:00时达到 $-8.99 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。11:00~17:00光合作用一直保持较高的强度, CO_2 的通量一直维持在 $-11 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 左右。17:00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,向下的 CO_2 通量逐渐减小,并于晚间21:30开始变为向上,水体开始向大气释放 CO_2 ,其释放量随时间的推移逐渐增加,于凌晨5:00达到最大值 $18.91 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

叶绿素含量相对较低的湖心区域(2号点)的观测始于21日晚20:00,21日整天都为多云,下午16:00至22日凌晨5:00风速一直维持在 7 m/s 左右,5:00后风速开始逐步下降。该点观测结果见图3,其昼夜24h水-气界面碳的交换

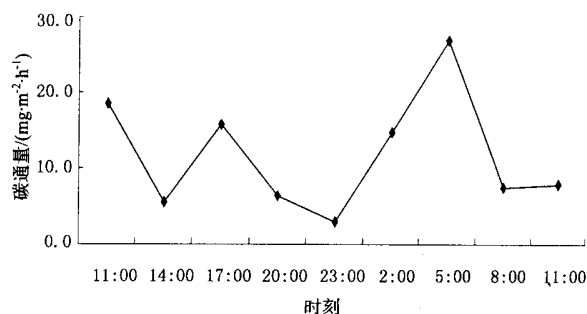


(负值表示 CO_2 从空气进入水中,正值表示 CO_2 从水中进入空气)

图3 2号点水-气界面碳通量随时间的变化

总通量为向上,湖区整体上为大气 CO_2 的源。其水-气界面碳通量的变化趋势为:水体夜间向大气排放 CO_2 ,平均排放通量为 $7.82 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,昼间水体在排放和吸收 CO_2 间波动。在刚开始观测时(20:00)湖区是大气 CO_2 的汇,23:00后湖区从汇转变到源,且 CO_2 的排放通量逐渐增大,到凌晨5:00,排放通量达到最大值 $22.447 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,此后排放通量开始逐渐降低。22日湖区天气为阴天,从凌晨开始湖区向大气排放的 CO_2 量开始逐渐降低,到17:00左右,湖区转换为大气 CO_2 的汇,但其通量仅为 $-1.05 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。17:00后湖区再次转变为大气 CO_2 的源。

东太湖区(3号点)的观测始于23日11:00,观测期间湖区一直为阴天或下小雨的天气,其观测结果见图4)。该湖区昼夜均为大气 CO_2 的源。水-气界面碳通量变化的趋势为:昼间排放量低,夜间排放量高,但昼间通量存在波动。从上午11:00点开始湖泊水体排放量逐渐下降,到下午14:00出现一个极小值 $5.49 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,而后排放量开始增加,到下午17:00左右出现排放量的一个极大值 $15.82 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,这以后排放量又开始下降,直到夜间23:00左右,排放量达到一天中的最小值 $2.97 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。23:00以后排放量开始再次增加,到第二天凌晨5:00,排放量达到一天中的最大值 $26.89 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。与梅梁湾、湖心区等藻型湖区相比,属草型湖区的东太湖水-气界面碳通量的变化规律略有不同,特别是昼间通量波动明显,这主要由于观测期间该湖区一直是阴雨天气,云层影响光强,从而影响沉水植物光合作用的结果。另外3号点离岸边较近,而沿岸是经济较发达的苏州地区,而该点日间碳通量出现较大波动的原因,可能是人类活



(负值表示 CO_2 从空气进入水中,正值表示 CO_2 从水中进入空气)

图4 3号点水-气界面碳通量随时间的变化

动影响大气中的 CO_2 分压频繁变化的结果。

在监测期内太湖湖体总体为大气 CO_2 的源,其中梅梁湾湖区(1号点)的平均通量为 $2.42 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,湖心区(2号点)平均通量为 $5.04 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,东太湖区(3号点)平均碳通量为 $11.63 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。而海洋系统(东海)碳通量为 $-5.02 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (负号表海洋吸收二氧化碳)^[11],森林系统(暖温带落叶阔叶林)碳通量为 $-54.79 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (吸收大气中的二氧化碳)^[12]。由此可见,春季湖泊是大气 CO_2 的重要源之一。

3 讨论

3.1 碳通量与水温的关系

太阳辐射影响水温,同时太阳辐射影响水生植物光合作用,进而影响水-气界面碳通量。计算结果显示在梅梁湾(1号点,图5),湖心区(2号点,图6),东太湖区域(3号点,

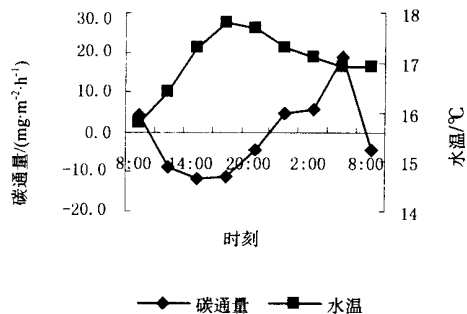


图5 梅梁湾温度与碳通量

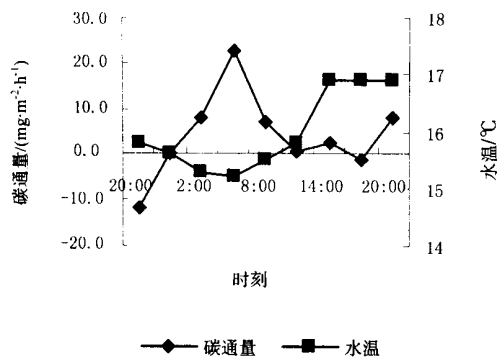


图6 湖心区温度与碳通量

图7)水温与碳通量的相关系数分别为-0.295, -0.313, -0.181。它表明碳通量与温度间没有明显的相关关系。观测结果显示小幅度的温度变化几乎不能对碳通量的变化趋势产生影响,只有在叶绿素含量较高或沉水植物较茂盛的湖区,温度波动相对较大的情况下,碳通量与温度的对应关系才较明显。在梅梁湖区(图5)和东太湖区域(图7),当温度变化幅度较小时,水-气界面碳通量和温度之间没有明显的相关关系,而当温度变化幅度较大时,二者间才体现出非常明显的对应关系。日间水温升高,表示太阳辐射增强,水生植物的光合

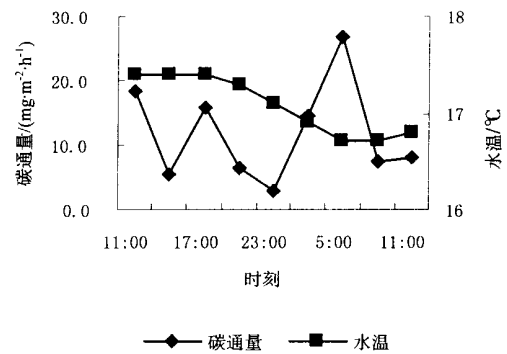
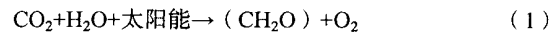


图7 东太湖区温度与碳通量

作用增强,有利于 CO_2 从大气进入水体;太阳辐射减弱,水温降低,光合作用减弱,有利于水体中的 CO_2 进入大气。夜间温度升高,水生植物呼吸作用相对增强,有利于水中的 CO_2 进入大气,反之则有利于大气 CO_2 进入水体。但由于碳通量主要由水气间 CO_2 的分压差决定,又由于在人类活动影响较小的区域大气中 CO_2 分压相对稳定,因此碳通量的方向主要由水中 CO_2 分压决定^[13],而水中 CO_2 分压主要由水中碳酸盐浓度与水生植物光合作用的强弱决定,而由于水体比热较大,其温度的变化对太阳辐射并不敏感,因而温度的变化不能很好的反应水生植物光合作用的强弱,所以温度与水-气界面碳通量之间只有较弱的相关关系。

3.2 碳通量与水体叶绿素含量的关系

叶绿素含量是水体浮游植物数量的重要标志,根据光合作用原理,在光照条件下,水生植物将吸收水中 CO_2 ,其具体过程见式(1)



由此可见,水体中叶绿素含量是决定水体吸收或排放 CO_2 量的决定因素之一。计算结果表明在梅梁湾(1号点,图8),湖心区(2号点,图9)碳通量与水体叶绿素含量间

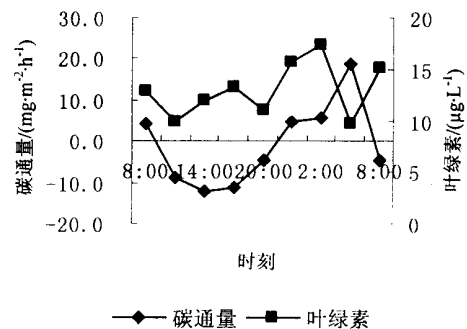


图8 梅梁湾叶绿素与碳通量

有较好的相关关系,其相关系数分别为0.595, 0.746。而东太湖区(3号点,图10),湖底有大量沉水植物,而水体叶绿素含量很低,因此碳通量与叶绿素含量间的相关关系较差,其相关系数仅为0.268。观测结果也显示叶绿素含量最

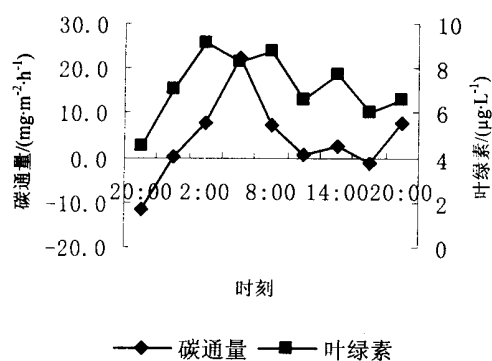


图9 湖心区叶绿素与碳通量

高的梅梁湾湖区和湖心区叶绿素和碳通量间的对应关系相对较好(图8,图9)。日间水体叶绿素含量增加,水中 CO_2 分压变低,碳通量向 CO_2 进入水体方向发展。夜间叶绿素含量增加,水中 CO_2 分压增加,碳通量向 CO_2 进入大气方向发展。但是在东太湖(图10),叶绿素含量的变化和碳通量的变化间则没有很好的对应关系。

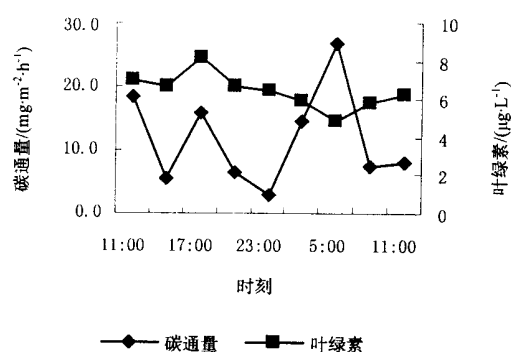


图10 东太湖区叶绿素与碳通量

3.3 碳通量和风速的关系

风速是另一个影响水-气界面碳通量的重要因素,特别在研究海洋水-气界面碳通量时,风速更是通量公式必不可少的重要参数。Wanninkhof等^[14-15]提出了风速与海-气界面碳通量的计算公式。从监测结果(图11~13)来看,在淡水湖泊-太湖的不同湖区中,碳通量与风速间的对应关系也相当明显。不论是在藻型还是草型湖区,风速增大,水-气界面 CO_2 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-气界面的碳通量相应的增加和减小。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 CO_2 进入大气而风浪过后,藻类大量漂浮于水面,藻类的光合或呼吸作用将使表层水 CO_2 分压降低或增加,从而使水-气界面碳通量明显得增大或减小。

4 结语

本次观测的目的是观测不同生态类型湖区水-气界面碳通量的日变化情况,观测结果较好的反映出各湖区水-气界

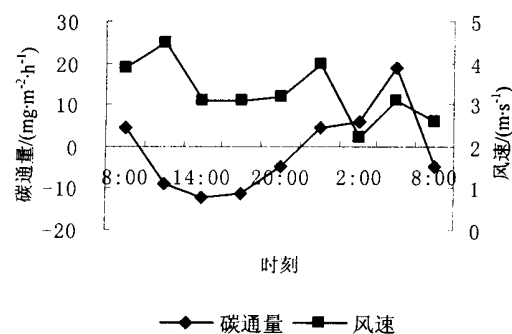


图11 梅梁湾碳通量与风速

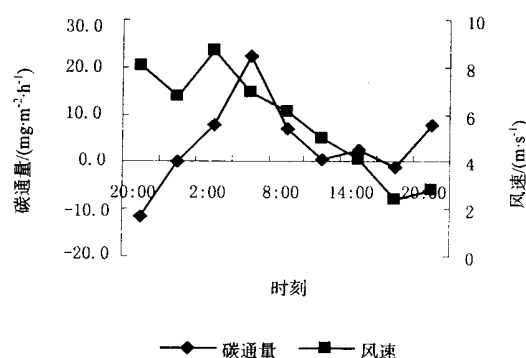


图12 湖心碳通量与风速

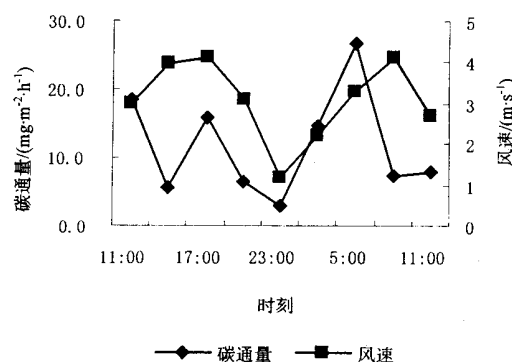


图13 东太湖碳通量与风速

面碳通量日变化的差异。但由于水-气界面碳通量的变化受众多因素的影响,除温度、叶绿素含量和风速外,其他因素的影响也不可忽视。本次采样选择在4月,各湖区水环境仅能代表春季的情况,而太湖不同季节各湖区水环境变化较大,不同季节各湖区水-气界面碳通量差异可能有较大不同,因此要反映全年的差异应该在不同季节分别观测采样,这样才能较准确的反映出不同湖区水-气界面碳通量的在不同季节的日变化规律及差异。

参考文献:

- [1] 王明星. 大气化学[M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- [2] DOWNING J P, MCYBCK M, ORR J, *et al.* Land and water interface zones[J]. *Water, Air and Soil Pollut*, 1993, 70: 123-137.
- [3] 严国安, 刘永定. 水生生态系统的碳循环及对大气 CO₂ 的汇[J]. *生态学报*, 2001, 21(5): 827-833.
- [4] KAMIUTO K. A simple global carbon-cycle model[J]. *Energy*, 1994, 19(8): 825-829.
- [5] EMERSON S. Gas exchange rate in small Canadian shield lakes[J]. *Limnology and Oceanography*, 1975, 20(5): 754-761.
- [6] 曹景蓉, 洪业汤. 贵阳郊区水稻田甲烷释放通量的研究[J]. *土壤通报*, 1996, 27(1): 19-22.
- [7] 贾复. 关于水气界面的气体传输[J]. *力学进展*, 2000, 30(1): 66-76.
- [8] 陈毅凤, 张军, 万国江. 贵州草海湖泊系统碳循环简单模式[J]. *湖泊科学*, 2001, 13(1): 15-19.
- [9] 金心, 石广玉. 生物泵在海洋碳循环中的作用[J]. *大气科学*, 2001, 25(5): 683-688.
- [10] MUKHERJEE B, PANDEY P N, SINGH S N. Mathematical modeling and system analysis of inorganic carbon in the aquatic environment[J]. *Ecological Modelling*, 2002, 152: 129-143.
- [11] 张辉远, 黄自强. 东海表层水二氧化碳及其海气通量[J]. *台湾海峡*, 1997, 16(1): 68-75.
- [12] 桑卫国, 马克平, 陈灵芝. 暖温带落叶阔叶林碳循环的初步估算[J]. *植物生态学报*, 2002, 26(5): 543-548.
- [13] 韩舞鹰, 容荣贵, 黄西能, 等. 西太平洋赤道海域海气界面二氧化碳交换的计算[J]. *热带海洋*, 1989, 8(4): 16-21.
- [14] BATES N R, MERLIVAT L. The influence of short-term wind variability on air-sea CO₂ exchange[J]. *Geophys Res Lett*, 2001, 28(17): 3 281-3 284.
- [15] MACLINTYEE S, WANNINKHOF R, CHANTON J P. Trace gas exchange across the air-water interface in freshwater and coastal marine environments[A]. In: *Biogenic Trace Gases: Measuring Emissions from Soil and Water*[M]. Oxford, England: Blackwell, 1995: 52-97.

Daily variation of carbon dioxide flux on the water-air interface of the Taihu lake in spring

ZHANG Fa-bing^{1,2}, HU Wei-ping¹, YANG Long-yuan¹

1. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract: With the statistic box, daily variation of the carbon dioxide flux on the water-air interface for different types of habitat (algae and grass) of the Taihu lake was monitored continuously for every 24~48 hours in spring. The results show that the maximum and minimum flux values are about 5:00 am and 2:00 pm respectively, but for different parts of the lake, different rules exist. For the eutrophic part (Meiliang bay) of the lake, the water is the sink for the atmospheric carbon during the daytime and the average carbon flux is -7.74 mg/(m²·h), while at night it's the carbon source with the average flux of 5.32 mg/(m²·h). For the center part of the lake, the water is the source for the atmospheric carbon at night, while during the daytime, it becomes the sink or the source inconstantly for the atmospheric carbon. The eastern part of the lake, where the water quality is relatively high, remains as the big carbon source for the atmosphere with the average flux of 11.63 mg/(m²·h).

Key words: Taihu lake; carbon dioxide flux; daily variation; spring

(上接第 179 页)

Investigation on water quality of multi-city river sections in Guangdong

WEN Li-rong^{1,2}, LIU Yi-min¹, LIU Guo-guang², CUI Guang-qi¹

1. Guangdong Provincial Center of Environmental Protection Monitoring, Guangzhou 510045, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China

Abstract: The variation of water quality index including NH₃-N, BOD₅, and COD_{Mn} of 25 multi-city river sections in Guangdong from 1994 to 2001 was analyzed. Results showed that the concentration of NH₃-N, BOD₅, and COD_{Mn} was decreasing in most of the multi-city river sections and was keeping at a high pollution level in 6 monitored sections, which include Xi-hu village section, Qiping section, Shangyang section, Shibi section, Qingyang bridge section and Yantian section. NH₃-N was a key pollutant.

Key words: water quality; multi-city river; sections; Guangdong province