

中国八大湖泊冬季水-气界面 CO<sub>2</sub> 通量

陈永根<sup>1, 2</sup>, 李香华<sup>3</sup>, 胡志新<sup>4</sup>, 刘伟龙<sup>1, 2</sup>, 胡维平<sup>1\*</sup>

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;  
3. 江苏省水文水资源勘测局南京分局, 江苏 南京 210008; 4. 安徽大学生命科学学院, 安徽 合肥 230039

摘要: 采用静态箱-气相色谱法对中国不同地区八个湖泊(洞庭湖、鄱阳湖、巢湖、南四湖、洪泽湖、抚仙湖、洱海、滇池)冬季水体的水-气界面 CO<sub>2</sub> 通量进行了 24 h 连续观测。结果表明: 冬季洞庭湖、巢湖、洱海和滇池 24 h 均为大气 CO<sub>2</sub> 的汇, 其通量分别为-23.78、-16.08、-24.38、-17.94 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>; 鄱阳湖、南四湖水体则为大气 CO<sub>2</sub> 的源, 其通量分别为 35.76、27.64 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>; 洪泽湖和抚仙湖在晴天时为大气 CO<sub>2</sub> 的汇, 夜间或阴天为大气 CO<sub>2</sub> 的源, 但从 24 h 的平均通量来看, 洪泽湖为大气 CO<sub>2</sub> 的汇, 通量为-26.56 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>; 抚仙湖为大气 CO<sub>2</sub> 的源, 通量 16.01 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>。

关键词: 湖泊; 静态箱/气相色谱法; CO<sub>2</sub> 通量; 冬季日变化

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 1672-2175 (2006) 04-0665-05

大气中二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、甲烷(CH<sub>4</sub>)、氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)等温室气体质量浓度的上升和由此导致的增温效应是人类面临的最严峻的全球环境问题之一<sup>[1-2]</sup>。CO<sub>2</sub>的温室效应约占总温室效应权重的50%,其质量浓度已从工业革命前的280×10<sup>-6</sup>增加到现在的365×10<sup>-6</sup><sup>[3-6]</sup>。陆地生态系统的碳循环和碳蓄积是全球变化研究的重要组成部分之一,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。上世纪中期以来,湖泊水-气界面碳交换研究引起了众多学者的关注<sup>[8-10, 12-13]</sup>。据 Downing 等研究,湖泊对大气CO<sub>2</sub>的总汇(以C计)达5.32×10<sup>7</sup> t/a<sup>[7]</sup>。因此,湖泊水-气界面碳通量研究对全球碳循环规律的探索具有重要意义。国内外众多学者对湖泊水-气界面的碳交换已进行了大量研究<sup>[9-10]</sup>,但是绝大部分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,缺乏定量精确的观测研究。

我国是湖泊众多的国家,湖泊总面积达9.1×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>以上,生态类型和地理特点一般较复杂<sup>[11]</sup>。国内学者对湖泊水-气界面的CO<sub>2</sub>通量已进行了定量观测研究,如张发兵、范成新等人<sup>[12-13]</sup>,但是他们的研究主要集中于太湖。至今,对国内其它湖泊的精确观测研究则未见报道。

为精确了解我国大型湖泊冬季水体CO<sub>2</sub>通量的特征,我们用静态密闭箱/气相色谱法,首次对我国八个大型淡水湖泊(洞庭湖、鄱阳湖、巢湖、南四湖、洪泽湖、抚仙湖、洱海、滇池)冬季水-气界面CO<sub>2</sub>通量进行了24 h观测,并对相关影响因素进行了分析,以期获得这些湖泊冬季水-气界面CO<sub>2</sub>通量的精确强度,为估算湖泊水体对大气CO<sub>2</sub>的影响提供依据。

1 材料与方法

1.1 湖泊概况及采样点设置

八个湖泊主要位于长江中下游地区、淮河流域和云南高原,其形态学及水文学特征见表1。这些

表 1 8 大湖泊的形态学及水文学特征<sup>[11,14]</sup>  
Table 1 Morphological and hydrological properties of the eight lakes, China

湖泊名称	湖面面积/km <sup>2</sup>	长度/km	宽度/km		水深/m		容积/10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	流域面积/km <sup>2</sup>	补给系数	换水周期/d
			平均	最大	平均	最大				
洞庭湖	2 625	143.0	17.0	30.0	6.39	23.5	167.0	259 430	105.7	18
鄱阳湖	3 283	173.0	16.9	73.0	8.40	25.1	149.6	162 000	55.0	21
巢湖	770	61.7	12.5	20.8	2.69	3.77	20.7	9 258	12.0	210
南四湖	1 098	119.1	9.2	22.6	1.46	2.76	16.1	30 453	25.9	199
洪泽湖	1 577	65.0	24.3	55.0	1.77	4.37	27.9	156 000	99.0	35
抚仙湖	211	31.5	6.7	11.5	89.60	155	189.0	1 045	5.2	239
洱海	249	42.6	5.8	8.0	10.17	20.7	25.3	2 785	10.2	670
滇池	298	41.2	7.2	13.0	2.93	5.87	11.7	2 866	8.6	282

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX1-SW-01-15); 中国科学院资源与环境领域野外台站基金  
作者简介: 陈永根(1978-), 男, 硕士研究生, 主要从事环境保护方面研究。E-mail: yonggenchen@hotmail.com  
\*通讯作者

湖泊均属于我国的大型湖泊,湖面总面积约占全国湖泊总面积的11.1%。为避免人类活动和陆地生态系统的生物效应对采样结果产生干扰,采样点一般均设置在湖心。

各湖泊采样点的位置分别为:鄱阳湖(116.03467° E, 29.08000° N)、洞庭湖(113.04117° E, 29.36100° N)、南四湖(117.27279° E, 34.65493° N)、洪泽湖(118.64387° E, 33.32857° N)、巢湖(117.40608° E, 31.59634° N)、抚仙湖(102.84463° E, 24.40923° N)、洱海(100.25191° E, 25.70243° N)、滇池(102.66691° E, 24.94837° N)。经度跨度为18.39°,纬度跨度为10.25°。采样时间为2004年12月14日—2005年1月14日。

## 1.2 样品采集

采样箱的主体设备主要由透明的有机玻璃箱组成(直径30 cm,高50 cm),内置微型风扇使箱内气体及时混合均匀,在采样箱的侧面有一连有硅导管的采样通气孔。采样前先使采样箱内充满空气,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。然后用针筒抽取采样箱内气体200 mL,并注入气袋后放入冷藏箱保存。3箱同步采样,同一采样箱采样间隔时间为15 min,3个箱采完一遍后,即进行下一轮采样,共采集4次。采样间隔为3 h。气体样品在7 d内分析完毕。采集气样的过程中,同时测定箱内温度、表层水温和风速,并采集表层水样。

## 1.3 分析方法

现场测定水样碱度和pH;水样经过Whatman GF/C膜过滤后用聚乙烯瓶冷藏,并及时运回实验室分析:TN、TDN、TP、TDP(紫外-可见分光光度计2401型,日本),具体分析方法参见文献[15];TOC(1020A型总有机碳分析仪,美国);叶绿素a和叶绿素b(RF-5301型荧光光度计,日本);CO<sub>2</sub>质量浓度(Hp-4890D型气相色谱仪,美国)。

## 1.4 CO<sub>2</sub>通量计算方法<sup>[10,12]</sup>

根据气相色谱的分析结果(气体的质量浓度值),求出气体质量浓度随时间的变化率( $\Delta C/\Delta t$ ),水-气界面CO<sub>2</sub>交换通量可用下式表示:

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

式中 $F$ 为CO<sub>2</sub>交换通量, $V$ 为箱内空气体积, $\rho$ 为标准状态下CO<sub>2</sub>的密度, $A$ 为箱子覆盖面积, $P$ 为采样点处的气压, $T_0$ 和 $P_0$ 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, $\Delta C$ 为CO<sub>2</sub>气体在采样时间间隔内的质量浓度差, $\Delta t$ 为采样时间间隔。交换通量为正值时表示水体向大气排放CO<sub>2</sub>,为负值时表示水体从大气中吸收CO<sub>2</sub>。

## 2 结果

八个淡水湖泊冬季水-气界面24 h CO<sub>2</sub>通量变化差异明显(图1)。

洞庭湖、巢湖、洱海和滇池冬季水-气界面24 h

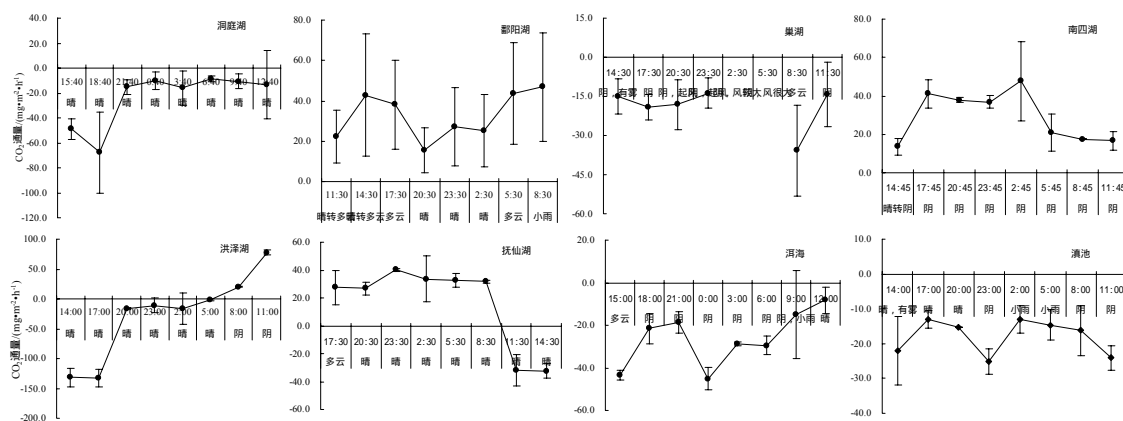


图1 八大湖泊冬季水体水-气界面CO<sub>2</sub>通量24h变化情况

Fig. 1 Day-change of the CO<sub>2</sub> flux at the water-air interface in eight lakes in winter

CO<sub>2</sub>通量均为负值,即水体为大气CO<sub>2</sub>的汇。但是各湖泊汇的大小及昼夜变化差异明显。洞庭湖水体开始时CO<sub>2</sub>通量相对较大,至18:40时达-67.76 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,21:40至观测结束,CO<sub>2</sub>通量变小,且几乎维持不变,通量变化范围为-8.66~67.76 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,昼夜平均为-23.78 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>。巢湖CO<sub>2</sub>通量24 h的变化幅度为-13.74~-19.26 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,平

均值为-16.08 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>。洱海CO<sub>2</sub>通量变化特征为双峰型,最大值出现在15:00和00:00时刻,变化范围为:-8.21~43.50 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,平均值为-24.38 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>。滇池CO<sub>2</sub>通量变化范围为-12.94~25.22 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,平均值为-17.94 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>。

鄱阳湖和南四湖冬季水-气界面24 h CO<sub>2</sub>通量均为正值,即水体为大气CO<sub>2</sub>的源,24 h通量变化

差异也明显。**鄱阳湖** CO<sub>2</sub> 通量变化特征为双峰型，最大值在 8 :30 和 14 :30 时刻，分别为 42.81、46.85 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>，夜间及中午时刻 CO<sub>2</sub> 通量相对较小，通量变化范围为 15.71~46.85 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>，**平均值为 32.72 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>**。**南四湖**夜间 CO<sub>2</sub> 通量较大，而昼间 CO<sub>2</sub> 通量相对较小，通量变化范围为 5.73~41.12 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>，**通量平均值为 27.64 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>**。

洪泽湖冬季水-气界面 24 h CO<sub>2</sub> 通量特征与抚仙湖大致相同：晴天时为大气 CO<sub>2</sub> 的汇，阴天或晚上则为大气 CO<sub>2</sub> 的源。但是，洪泽湖 CO<sub>2</sub> 通量源汇的转变成为渐进型，而抚仙湖的源汇转变为突变型。**洪泽湖** CO<sub>2</sub> 通量变化范围为-133.28~77.70

mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>，24 h 平均 CO<sub>2</sub> **通量为-26.56 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>**；**抚仙湖** CO<sub>2</sub> 通量变化范围为：-32.29~40.22 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>，**平均值为 16.01 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>**。因此，以 24 h 尺度看，洪泽湖为大气 CO<sub>2</sub> 的汇，而抚仙湖则为源。

3 讨论

3.1 CO<sub>2</sub>通量影响因素

水气界面的 CO<sub>2</sub> 交换通量方向及大小主要取决于大气与水表 CO<sub>2</sub> 分压差及大小<sup>[8]</sup>，由于短时间内大气 CO<sub>2</sub> 分压保持恒定，因此水-气界面 CO<sub>2</sub> 通量主要由水表 CO<sub>2</sub> 分压决定。水表 CO<sub>2</sub> 分压主要受风速、碱度、水温、碳酸盐分解和生物泵的影响<sup>[18]</sup>。表 2 为洞庭湖、鄱阳湖、巢湖、南四湖、洪泽湖、

表 2 八大湖泊采样点状况  
Table 2 The site status in the field in the eight lakes

采样点各因素		洞庭湖	鄱阳湖	巢湖	南四湖	洪泽湖	抚仙湖	洱海	滇池
风速/(m·s <sup>-1</sup> )	变幅	0~1.5	0.6~4.5	0~7.5	0~3.0	3.4~5.5	0~6.3	1.5~3.8	1.8~4.8
	平均	0.8	2.6	4.5	1.5	4.9	2.7	2.5	3.4
水温/	变幅	12.0~13.8	12.5~12.7	8.8~9.3	2.1~2.4	2.1~2.7	13.7~15.1	10.2~10.9	9.8~11.7
	平均	12.9	12.5	9.1	2.3	2.3	13.9	10.4	10.3
水深/m		0.46 0.30(次日)	1.80	2.95	2.32	2.56	10.20	4.7	4.7
透明度/m		见底	0.38	0.50	0.78	0.40	6.84	1.90	0.37
pH		6.2	5.8	8.5	6.4	6.2	8.4	8.2	8.5
碱度/(mg·L <sup>-1</sup> )	碳酸盐	/	/	0.08	/	/	/		0.13
	重碳酸盐	1.8	0.69	1.24	3.71	3.11	3.16	2.43	2.50
总氮/(mg·L <sup>-1</sup> )		1.75	1.50	1.14	2.48	2.78	0.57	0.47	2.98
溶解性总氮/(mg·L <sup>-1</sup> )		1.58	1.10	0.64	2.24	2.63	0.35	0.26	2.51
总磷/(mg·L <sup>-1</sup> )		0.055	0.051	0.065	0.032	0.077	0.017	0.03	0.130
溶解性总磷/(mg·L <sup>-1</sup> )		0.037	0.012	0.020	0.015	0.060	0.011	0.01	0.044
总有机碳/(mg·L <sup>-1</sup> )		7.25	3.83	8.18	9.60	8.04	7.47	10.01	16.37
叶绿素 a/(μg·L <sup>-1</sup> )		3.08	0.48	26.54	28.22	3.40	2.06	17.95	116.20

/：表示未检出

抚仙湖、洱海和滇池 8 大湖泊采样点的风速、水温、水深、透明度及水质状况。

风速是影响水-气界面 CO<sub>2</sub> 通量的主要因素之一。除抚仙湖，各湖泊 CO<sub>2</sub> 通量与风速之间具有正相关关系，其中南四湖、洱海和滇池均达显著水平

(表 3)。这主要是因为：1)风应力导致水表面破碎，使水体与空气接触面积增加，从而加速了碳交换；2)风应力使底泥产生扰动，促使底泥中碳酸盐和 CO<sub>2</sub> 进入水体，增加了水表 CO<sub>2</sub> 分压。Wanninkhof 等人认为：风速是影响海洋水-气界面碳通量的重

表 3 八大湖泊冬季水-气界面 CO<sub>2</sub> 通量与影响因素之间的关系  
Table 3 The correlation between the CO<sub>2</sub> flux on the water-air interface and the factors in winter

影响因素	湖泊水-气界面 CO <sub>2</sub> 通量							
	洞庭湖	鄱阳湖	巢湖	南四湖	洪泽湖	抚仙湖	洱海	滇池
风速	0.275	0.429	0.029	0.954*	0.238	-0.317	0.719*	0.833*
水温	-0.714*	-0.206	-0.290	-0.593	-0.910*	-0.349	0.429	0.049
总碱度	-0.323	-0.405	-0.380	0.233	-0.062	-0.575	-0.467	0.036
碳酸盐碱度	/	/	0.577	/	/	/	/	0.491
重碳酸盐碱度	-0.323	-0.405	-0.029	0.233	-0.062	-0.575	-0.467	-0.675
总氮	0.286	0.048	0.143	-0.262	0.619	0.071	-0.119	0.214
溶解性总氮	-0.095	0.119	0.314	-0.429	0.833*	0.571	0.238	0.500
总磷	0.071	0.429	-0.101	-0.156	0.476	0.095	0.357	0.143
溶解性总磷	-0.405	-0.190	0.000	0.205	0.826*	0.071	-0.599	0.214
叶绿素 a	-0.452	0.120	-0.829*	0.310	-0.643	0.240	-0.452	0.143

\*表示在 0.05 水平上显著相关；/：表示未检出

要因素<sup>[19]</sup>。

水温是影响 CO<sub>2</sub> 通量的另一重要因素。它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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 进入大气。另一方面气体在水体中的溶解度与温度成反比，温度升高，有利于 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 从大气进入水体。八个湖泊中，洞庭湖和洪泽湖 CO<sub>2</sub> 通量与水温呈显著负相关。

碱度与水体碳酸盐、重碳酸盐含量密切相关，因此也是影响 CO<sub>2</sub> 通量的主要因素之一<sup>[24]</sup>。八个湖泊中巢湖和滇池的 pH 较高(8.5)，存在碳酸盐碱度，与 CO<sub>2</sub> 通量呈正相关(表 3)；重碳酸盐碱度与 CO<sub>2</sub> 通量之间关系则不明显(表 3)，这可能与冬季温度较低有关。

水体生物泵对水-气界面 CO<sub>2</sub> 交换也具有重要影响<sup>[8,18,21]</sup>。它主要通过水生生物(尤其是浮游植物)的光合作用和呼吸作用对 CO<sub>2</sub> 交换产生影响。当浮游植物进行光合作用时，水体中溶解的无机碳转化为有机碳，水体 CO<sub>2</sub> 分压降低，大气中的 CO<sub>2</sub> 进入水体；呼吸作用时生物释放 CO<sub>2</sub>，使水表 CO<sub>2</sub> 的分压增加，CO<sub>2</sub> 从水体进入空气。氮磷营养盐是浮游植物主要的营养源。洪泽湖 CO<sub>2</sub> 通量与 TDN、TDP 之间的关系达到显著性水平；巢湖 CO<sub>2</sub> 通量与 Chl<sub>a</sub> 之间的关系达显著性水平；其他湖泊 CO<sub>2</sub> 通量与营养盐和 Chl<sub>a</sub> 之间无明显的关系(表 3)。这可能是由于冬季水温较低，且天气基本为阴天，水体中生物活动相对较弱的缘故。

3.2 与相关研究的比较

8 个大型淡水湖泊冬季 24 h 水-气界面 CO<sub>2</sub> 平均通量见表 4。鄱阳湖 CO<sub>2</sub> 通量平均值(绝对值)最大，为 35.76 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>；洪泽湖最小，为-15.10

表 4 八大湖泊冬季水体水-气界面 CO<sub>2</sub> 通量  
Table 4 The carbon dioxide flux on the water-air interface in the eight lakes in winter

湖泊名称	洞庭湖	鄱阳湖	巢湖	南四湖	洪泽湖	抚仙湖	洱海	滇池
通量平均值	-23.78	35.76	-16.08	27.64	-26.56	16.01	-24.38	-17.94

mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>。这 8 个湖泊冬季水体水-气界面 CO<sub>2</sub> 通量均大于太湖<sup>[12]</sup>，但是小于太湖冬季大风、阴天情况的水体 CO<sub>2</sub> 通量<sup>[24]</sup>。

与其他生态系统相比，湖泊生态系统 CO<sub>2</sub> 通量远大于海洋生态系统(东海)(-5.02 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>)<sup>[16]</sup>，但小于森林生态系统(暖温带落叶阔叶林) CO<sub>2</sub> 通量(-54.79 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>)<sup>[17]</sup>。

4 结论

(1) 洞庭湖、巢湖、洱海和滇池 24 h 均为大气 CO<sub>2</sub> 的汇，其通量分别为-23.78、-16.08、-24.38、-17.94 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>；

(2) 鄱阳湖和南四湖 24 h 均为大气 CO<sub>2</sub> 的源，其通量分别为 35.76、27.64 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>；

(3) 洪泽湖和抚仙湖在晴天时为大气 CO<sub>2</sub> 的汇，阴天或者夜间为大气 CO<sub>2</sub> 的源。但从 24 h 平均值来看，洪泽湖为大气 CO<sub>2</sub> 的汇，其通量为-26.56 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>；抚仙湖则为源，通量为 16.01 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>。

由于水-气界面 CO<sub>2</sub> 通量受多种因素的影响，如风速、碱度、水温、碳酸盐分解、生物泵等影响，八个湖泊的面积广阔，湖区水环境特征具有明显空间差异性，因此，上述各湖泊 CO<sub>2</sub> 通量可能仅能代表各湖泊测点附近水域冬季水-气界面 CO<sub>2</sub> 通量变化特征。Mukhopadhyay 等人认为：一般情况下，并不能得出某个湖泊生态系统纯粹是大气 CO<sub>2</sub> 的源或汇的结论<sup>[22]</sup>。因此若要全面掌握各湖泊水-气界

面 CO<sub>2</sub> 通量的变化特征，需要对各湖泊的不同湖区、不同季节和气候条件下，进行大量的观测研究。Casper 等人认为，若要详细了解湖泊水-气界面 CO<sub>2</sub> 通量特征，应该对水体进行较长时间(至少为一年)、高频次(小于 7 d/次)的采样观测。

致谢：太湖湖泊生态系统研究站副站长季江和南京地理与湖泊研究所研究生王建军参与了本次采样，杨龙元副研究员在样品分析和数据整理过程中给予了指导，作者在此一并表示感谢。

参考文献：

[1] CROWLEY T J. Causes of climate change over the past 1000 years [J]. Science, 2000, 289:270-277.  
[2] TETT S F B, STOTT P A, ALLEN M R, et al. Causes of twentieth-century temperature change near the Earth's surface [J]. Nature, 1999, 399: 569-572.  
[3] NEFTTEL A, MOOR E, VERMA S B. Evidence from polar ice cores from the increase in atmosphere CO<sub>2</sub> in the past two centuries [J]. Nature, 1985, 315:330-332.  
[4] FAN S, GLOOR M, MAHLMAN J, et al. A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmosphere and oceanic carbon dioxide data and models [J]. Science, 1998, 282:1413-1414.  
[5] FRIEDLI H, LOTSCHER H, OESCHGER H, et al. Ice core record of the <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C ratio of atmosphere CO<sub>2</sub> in the past two centuries [J]. Nature, 1986, 324:237-238.  
[6] RODHE H. A comparison of the contribution of various gases to greenhouse effect [J]. Science, 1990, 248:1217-1219.  
[7] DOWNING J P, MCYBCK M, ORR J, et al. Land and water interface zones [J]. Water air and soil pollution, 1993, 70: 123-137.

- [8] 严国安, 刘永定. 水生生态系统的碳循环及对大气 CO<sub>2</sub> 的汇[J]. 生态学报, 2001, 21(5): 827-833.  
YAN Guoan, LIU Yongding. Aquatic ecosystems: carbon cycle and as atmospheric CO<sub>2</sub> sink [J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(5): 827-833.
- [9] KAMIUTO K. A simple global carbon-cycle model [J]. Energy, 1994, 19(8): 825-829.
- [10] 贾复. 关于水气界面处的气体传输[J]. 力学进展, 2000, 30(1):66-76.  
JIA Fu. Gas transfer at water surface[J]. Advances in Mechanics, 2000, 30(1):66-76.
- [11] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998.  
WANG Suming, DOU Hongshen. A Survey of the Lakes in China [M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [12] 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.  
ZHANG Fabing, HU Weiping, YANG Longyuan. Daily variation of carbon dioxide flux on the water-air interface of the Taihu Lake in spring [J]. Ecology and Environment, 2004, 13(2): 186-190.
- [13] FAN Chengxin, PHILLIP W F, HU Weiping, et al. Divergence of carbon dioxide fluxes in different trophic areas of Taihu Lake, China [J]. Journal of Environmental Science, 2003: 15(4): 433-442.
- [14] 窦鸿身, 姜加虎. 中国五大淡水湖[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003.  
DOU Hongshen, JIANG Jiahu. The five fresh water lakes in China [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2003.
- [15] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 2 版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.  
JIN Xiang-can, TU Qing-ying. The investigate criterion of lake eutrophication[M]. 2nd ed. Beijing: China Environment Science Press, 1990.
- [16] 张辉远, 黄自强, 马黎明, 等. 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.  
ZHANG Huiyuan, HUANG Ziqiang, MA Liming, et al. Carbon dioxide in surface water and its flux in East China Sea [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1997, 16(1): 68-75.
- [17] 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.  
SANG Weiguo, MA Keping, CHEN Lingzhi. Primary study on carbon cycling in warm temperature deciduous broad-leaved forest [J]. Acta phytocologica sinica, 2002, 26(5): 543-548.
- [18] BISWAS H, MUKHOPADHYAY S K, DE T K. Biogenic controls on the air-water carbon dioxide exchange in the Sundarban mangrove environment, northeast coast of Bay of Bengal, India [J]. Limnol Oceanogr, 2004, 49(1): 95-101.
- [19] WANNINKHOF R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean [J]. Geophys Res, 1992, 97: 7373-7382.
- [20] BATES N R, MERLIVAT L. The influence of short-term wind variability on air-sea CO<sub>2</sub> exchange [J]. Geophys Res Lett, 2001, 28(17):3281-3284.
- [21] 孙云明, 宋金明. 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, 2002, 20(3): 110-118.  
SUN Yunming, SONG Jinming. Advances in biogeochemical process research on marine carbon cycle in china (1998-2002) [J]. Advances in Marine Science, 2002, 20(3): 110-118.
- [22] MUKHOPADHYAY S K, BISWAS H, DE T K, et al. 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, 2002, 36: 629-638.
- [23] 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.  
HAN Wuying, RONG Ronggui, HUANG Xineng, et al. Carbon Dioxide exchange at the air-sea interface in the west pacific equatorial sea area [J]. Tropic Oceanology, 1989, 8(4): 16-21.
- [24] 李香华, 胡维平, 杨龙元, 等. 太湖梅梁湾冬季水-气界面二氧化碳通量日变化观测研究[J]. 生态学杂志, 2005, 24(12):1425- 1429.  
LI Xianghua, HU Weiping, YANG Longyuan, et al. Diurnal variation of carbon dioxide flux on water-air interface of Meiliang Bay, Taihu Lake in wintertime[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(12): 1425-1429.
- [25] 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: 1-19.

## Carbon dioxide flux on the water-air interface of the eight lakes in China in winter

CHEN Yonggen<sup>1,2</sup>, LI Xianghua<sup>3</sup>, HU Zhixing<sup>4</sup>, LIU Weilong<sup>1,2</sup>, HU Weiping<sup>1</sup>

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

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

3. Nanjing Branch of Jiangsu Hydrology and Water Resource Surveys Bureau, Nanjing 210008, China;

4. School of Life Science, Anhui University, Hefei 230039, China

**Abstract:** In order to accurately learn the winter day-change of the carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) flux at the water-air interface of the eight lakes in China, including Lake Dongting, Lake Poyang, Lake Chao, Lake Nansi, Lake Hongze, Lake Fuxian, Lake Erhai and Lake Dianchi. it was observed continuously for 24-hour based on a closed-chamber and gas chromatography-based system from December 14, 2004 to January 14, 2005. The results indicated that there was great difference among the CO<sub>2</sub> flux in eight lakes in winter. Lake Dongting, Lake Chaohu, Lake Erhai and Lake Dianchi were the sink of the atmospheric CO<sub>2</sub> during the investigation period, and the average fluxes were -23.78, -16.08, -24.38, and -17.94 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> respectively. Lake Poyang and Lake Nansi were the source during the period, and the average fluxes were 35.76 and 27.64 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> respectively. Lake Hongze and Lake Fuxian were the sink when it was sunny and were the source when it was cloudy and night, and the average fluxes were -26.56 and 16.01 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> respectively according to the average flux of 24-hour, namely, Lake Hongze was the sink and Lake Fuxian was the source in the investigation period.

**Key words:** lakes; a closed-chamber and gas chromatography-based system; carbon dioxide flux; winter day-change