

中国 8 大湖泊冬季水-气界面甲烷通量初步研究*

陈永根^{1,2}, 白晓华^{1,2}, 李香华³, 胡志新^{1,2}, 刘伟龙^{1,2}, 胡维平^{1**}

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 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, 南京 210008)

摘要: 采用静态箱-气相色谱法对中国不同地区的 8 个湖泊(洞庭湖、鄱阳湖、巢湖、南四湖、洪泽湖、抚仙湖、洱海、滇池)冬季水体水-气界面甲烷(CH_4)通量进行了 24 h 连续观测, 对中国湖泊冬季 CH_4 的总释放量进行了估算. 结果表明: 鄱阳湖、巢湖、南四湖、洪泽湖和滇池 24 h 内各时段均为大气 CH_4 的源, 其通量分别为 0.818、0.021、0.034、0.019、0.163 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; 洞庭湖、抚仙湖和洱海部分时段为大气 CH_4 的汇, 但从 24 h 平均通量来看, 仍为大气 CH_4 的源, 通量分别为 0.199、0.012、0.044 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. 冬季湖泊水体 CH_4 通量空间差异较小, 其大小主要受风速的影响, 与水温、箱内温度和 DOC 没有明显的相关关系. 中国湖泊冬季(90 d) CH_4 总释放量大约为 $3.22 \pm 2.75 \times 10^7$ kg, 约为 1990 年中国稻田 CH_4 总释放量的 2.8%.

关键词: 湖泊; 静态箱/气相色谱法; CH_4 通量; 冬季日变化

A primary study of the methane flux on the water-air interface of eight lakes in winter, China

CHEN Yonggen^{1,2}, BAI Xiaohua^{1,2}, LI Xianghua³, HU Zhixin^{1,2}, LIU Weilong^{1,2} & HU Weiping¹

(1: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

(2: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, P. R. China)

(3: Nanjing Branch of Jiangsu Hydrology and Water Resource Surveys Bureau, Nanjing 210008, P. R. China)

Abstract: In order to examine the winter daily change of the methane flux of the eight lakes in China, the methane flux on the water-air interface was observed continuously for 24-hour based on a closed-chamber and gas chromatography-based system from 14, Dec. in 2004 to 14, Jan. in 2005, including Lake Dongting, Lake Poyang, Lake Chaohu, Lake Nansi, Lake Hongze, Lake Fuxian, Lake Erhai and Lake Dianchi. Furthermore, the total methane emission from lakes to atmosphere was calculated during the winter period according to the average methane flux of the eight lakes. The result suggested that Lake Poyang, Lake Chaohu, Lake Nansi, Lake Hongze and Lake Dianchi were the source of the atmospheric methane during the time, with the average flux of 0.818, 0.021, 0.034, 0.019 and 0.163 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ respectively. As for Lake Dongting, Lake Fuxian, Lake Erhai they were yet the methane source to the atmosphere by the average flux of 24 h, which was 0.199, 0.012 and 0.044 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ respectively, though they were the sink at some time. There was little difference among the methane flux of these eight lakes, and it was mainly affected by wind speed. In addition, no obvious statistic relationships were found between the flux and water temperature, and between the temperature in the sample bucket and the concentration of DOC. The average flux of eight lakes was $0.164 \pm 0.140 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. Multiplied by $9.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ which is the surface area of all lakes in China and 90-day for winter period, a total of $3.22 \pm 2.75 \times 10^7$ kg of methane was estimated to emit to the atmosphere from the winter lakes. Compared with other emission sources, the methane emission from

* 中国科学院知识创新工程重大项目(ZCX1-SW-01-15)、中国科学院资源与环境领域野外台站基金项目联合资助. 2006-02-13 收稿; 2006-04-29 收修改稿. 陈永根, 男, 1978 年生, 硕士研究生; E-mail: yonggenchen@hotmail.com.

** 通讯作者: wphu@niglas.ac.cn.

lakes was lower, only 2.8‰ of the total methane emission from rice field in 1990.

Keywords: Lakes; a Closed-chamber and Gas Chromatography-based System; methane flux; daily change

甲烷(CH₄)是厌氧条件下微生物对有机物分解而产生的^[1]. 它对全球气候变暖和对流层臭氧破坏具有重要的影响,其增温效应约占有温室气体总效应的15% - 20%^[2],对全球变暖的贡献仅次于CO₂. 但是,若考虑20年时间尺度,单位质量CH₄的增温潜势为CO₂的62倍^[3]. 目前,大气CH₄的年平均增长率约为0.8% - 1%^[4],因此CH₄排放问题越来越受到科学家们的关注. 水体是大气CH₄的主要来源,约占全球甲烷源的40% - 50%^[5]. 但是,目前CH₄排放的研究绝大部分集中在稻田、湿地或者沼泽^[6-11],对湖泊水体的研究相对较少或者针对小型湖泊^[12,13].

我国是湖泊众多的国家,全国1 km²以上的天然湖泊共有2759个,湖泊总面积达9.1 × 10⁴ km²以上^[14]. 迄今为止,国内对湖泊水体CH₄释放的研究主要集中在东湖^[15,16]、乌梁素海^[17],对其他湖泊(特别是大型湖泊)CH₄释放的研究则鲜见报道. 虽然CH₄的产生、排放与温度密切相关^[15,23],但是若要全面了解湖泊CH₄排放特征以及精确计算湖泊水体CH₄源/汇的大小,对低温季节湖泊水体CH₄排放的测定是十分必要的^[13]. 测定低温条件下湖泊CH₄排放通量,可获知水体排放CH₄的下限,进而为准确估算湖泊水体对大气CH₄的贡献奠定坚实基础. 本文使用静态密闭箱/气相色谱分析法对我国的洞庭湖、鄱阳湖、巢湖、南四湖、洪泽湖、抚仙湖、洱海、滇池8个大型淡水湖泊冬季水-气界面CH₄通量进行了24 h昼夜观测,并基于观测结果进行了冬季全国湖泊甲烷排放量估算.

1 材料与方法

1.1 湖泊概况和采样点设置

本研究的8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%. 虽然湖泊的近岸区会有水生植物分布,其根系有机分泌物在厌氧条件下有利于甲烷的产生^[19],但是由于湖泊面积宽广,湖心面积非常大,若以近岸区的CH₄通量代表整个湖泊CH₄通量将会过高估计湖泊水体对大气CH₄的贡献,因此我们将采样点主要选择在湖泊的湖心区.

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.

表1 8大湖泊的形态学及水文学特征^[14,18]
Tab. 1 Morphological and hydrological properties of the eight lakes, China

湖名	湖面面积(km ²)	长度(km)	宽度(km)		水深(m)		容积(10 ⁸ m ³)	流域面积(km ²)	补给系数	换水周期(d)
			平均	最大	平均	最大				
洞庭湖	2625	143.0	17.0	30.0	6.39	23.5	167.0	259430	105.7	18
鄱阳湖	3283	173.0	16.9	73.0	8.40	25.1	149.6	162000	55.0	21
巢湖	770	61.7	12.5	20.8	2.69	3.77	20.7	9258	12.0	210
南四湖	1098	119.1	9.2	22.6	1.46	2.76	16.1	30453	25.9	199
洪泽湖	1577	65.0	24.3	55.0	1.77	4.37	27.9	156000	99.0	35
抚仙湖	211	31.5	6.7	11.5	89.60	155	189.0	1045	5.2	239
洱海	249	42.6	5.8	8.0	10.17	20.7	25.3	2785	10.2	670
滇池	298	41.2	7.2	13.0	2.93	5.87	11.7	2866	8.6	282

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3个相同采样箱内充满空气,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,一次观测过程同一采样箱采样间隔时间为15 min,3个桶采完一遍后,即进行下一轮采样,共采集4次。观测过程时间间隔为3 h。气体样品在7 d内分析完毕。在采集气样的过程中,同时测定箱内温度、表层水温和风速,并采集表层水样。

1.3 气样分析

气样中 CH_4 的浓度用HP-4890D型气相色谱仪(美国)分析测定,详细方法参见文献^[15]。该仪器对 CH_4 浓度的检测最低限为 0.1×10^{-6} mV,因此 CH_4 通量最低检测限为 $0.0042 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,测定误差小于1%^[15,22]。

1.4 水样分析

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。水样分析项目主要为溶解性总有机碳(DOC),分析设备为O.I. Analytical 1020A型总有机碳分析仪(美国)。所有水样在7 d内分析完毕。

1.5 CH_4 通量计算方法

根据气相色谱的分析结果(气体的浓度值),求出箱内气体浓度随时间的变化率($\Delta C/\Delta t$),再根据下式计算湖泊水-气界面 CH_4 交换通量^[16,21,22]:

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

式中, F 为 CH_4 交换通量, V 为箱内气体体积, ρ 为标准状态下 CH_4 密度, A 为箱子覆盖面积, P 为采样点处的大气压, 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, $\Delta C/\Delta t$ 为箱内目标气体浓度随时间变化的回归曲线斜率($R > 0.9$)。交换通量为正值时表示水体向大气排放 CH_4 ;为负值时表示水体从大气中吸收 CH_4 。

2 结果

洞庭湖处于枯水期,水位持续下降,观测初期水深为0.46 m,至观测结束时水深仅为0.30 m,测点附近部分湖底已露出水面。 CH_4 通量24 h变化范围为 $-0.909 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 至 $0.918 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,其中3:40-9:40时段为大气 CH_4 的汇,其他时段为大气 CH_4 的源。24 h CH_4 通量的平均值为 $0.199 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,因此湖泊水体主要是大气 CH_4 的源。

鄱阳湖测点附近水流湍急,大量的采沙船正在进行采沙作业。测点位于采沙遗留下来并露出水面的小沙丘(约 2 m^2)下游3 m处。观测点 CH_4 通量变化范围为 $0.517-1.116 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,平均值为 $0.818 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,因此水体昼夜均为大气 CH_4 的源。

巢湖由于凌晨风浪较大(风速 $6.0-7.5 \text{ m/s}$),采样箱被掀翻,因此缺少2:30和5:30时段的样品。其他时段 CH_4 通量变化范围为 $0.007-0.037 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,平均值为 $0.021 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,因此巢湖昼夜均为大气 CH_4 的源。

南四湖为南阳、独山、昭阳、微山四个相互连贯的湖泊总称,观测点位于微山湖的开阔湖面。 CH_4 通量变化范围为 $0.013-0.065 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,最大值出现在5:45时段。通量24 h平均值为 $0.034 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,因此南四湖水体昼夜均是大气 CH_4 的源。

洪泽湖观测期间风浪较大, CH_4 通量变化范围为 $0.005-0.032 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,23:00时段通量值达到最大。通量24 h平均值为 $0.019 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,因此湖泊水体昼夜均是大气 CH_4 的源。

抚仙湖是深水湖泊, CH_4 通量变化范围为 $-0.017 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 至 $0.049 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,其中2:30-11:30时段为大气 CH_4 的汇,其他时段为大气 CH_4 的源。17:30时段源通量达到最大,2:30时段汇通量达到最大。抚仙湖 CH_4 通量昼夜平均为 $0.012 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,因此水体主要为大气 CH_4 的源。

洱海监测期间风浪很大,CH₄ 通量变化范围为: -0.278 mg/(m² · h)至 0.152 mg/(m² · h),其中 9:00 和 12:00 时段为大气 CH₄ 的汇,其他时段均为大气 CH₄ 的源. 洱海 CH₄ 通量昼夜平均为 0.044 mg/(m² · h),因此水体主要为大气 CH₄ 的源.

滇池是严重富营养化湖泊,CH₄ 通量变化范围为 0.101 - 0.198 mg/(m² · h),昼夜平均值为 0.163 mg/(m² · h),因此水体均为大气 CH₄ 的源.

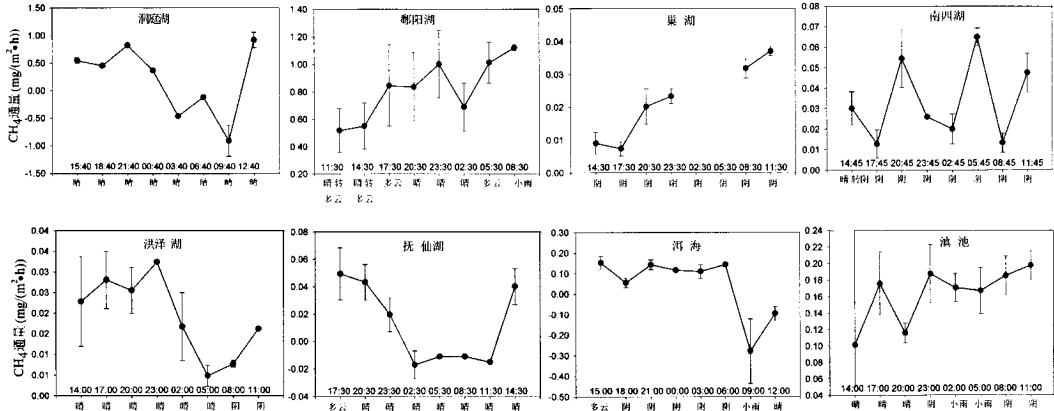


图 1 8 大湖泊冬季水 - 气界面 CH₄ 通量变化

Fig. 1 The winter daily change of methane flux at the water-air interface of eight lakes in China

3 讨论

3.1 水体 CH₄ 通量

观测期间,8 个湖泊冬季水体水 - 气界面主要为大气 CH₄ 的源(图 2),仅个别湖泊某些时段水体才为大气 CH₄ 的汇,如洞庭湖 3:40 - 9:40 时段、抚仙湖 2:30 - 11:30 时段、洱海 9:00 - 12:00 时段,这可能与湖泊水位下降^[24,26]、降雨^[27,28]等因素有关. 王宏军等^[29]、Johanssona 等^[30]在研究湖泊水体 CH₄ 释放时也同时发现大气 CH₄ 被水体吸收的现象. 但是,若要详细阐明该现象产生的机理,需要进行深入的研究. 从 8 个湖泊昼夜 CH₄ 释放值来看(表 2),鄱阳湖水 - 气界面 CH₄ 通量最大,这可能由于含有高浓度 CH₄ 的上游来水^[12]以及采沙作业对底泥的扰动等因素;抚仙湖水 - 气界面 CH₄ 通量最小,这可能与该湖泊为深水湖泊有关.

表 2 8 大湖泊冬季水 - 气界面 CH₄ 通量*

Tab. 2 The CH₄ flux at 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*	0.199 ±	0.818 ±	0.021 ±	0.034 ±	0.019 ±	0.012 ±	0.044 ±	0.163 ±
(mg/(m ² · h))	0.641	0.222	0.012	0.020	0.010	0.029	0.153	0.035

* 通量平均值为 24 h 的平均值 ± 标准差

CH₄ 是有机物在厌氧微生物的作用下分解而产生的,由于温度对微生物的活性具有重要的影响,因此,温度对于 CH₄ 通量也具有重要影响^[23]. 但是,8 个湖泊水 - 气界面 CH₄ 通量与水温、箱内温度没有明显相关关系(图 3),这可能与冬季温度低和昼夜温差小,产 CH₄ 微生物活性很低有关. 邢阳平等人认为^[15]:底泥温度小于 25℃ 时,水体 CH₄ 释放通量将小于 1.0 mg/(m² · h); Stadmark 等人也认为^[23]:水温低于 10℃ 时,CH₄ 释放通量将小于 0.6 mg/(m² · h).

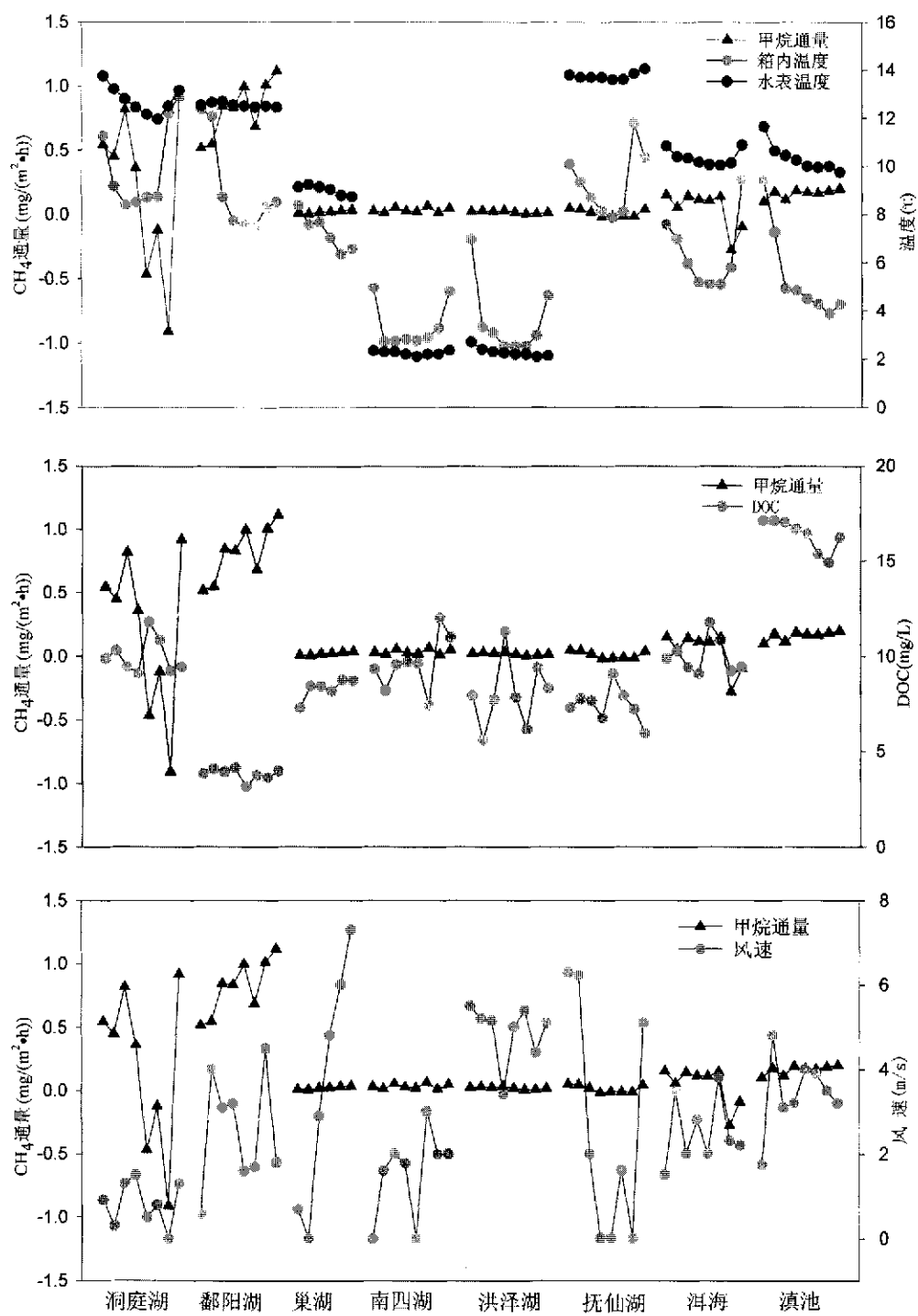


图2 监测期间水-气界面 CH_4 通量、箱内温度、水温、DOC 以及风速的变化情况

Fig. 2 The daily change of the CH_4 flux at the water-air interface, water temperature, the temperature in the sample bucket, wind speed, and the concentration of DOC during the winter period

湖泊水体 CH_4 通量与 DOC 含量无明显相关关系(图 3)。这是由于水体 DOC 中含有对产甲烷菌有害的黄酸^[31]。邢阳平等人在东湖水-气界面 CH_4 通量研究时也未发现它们之间有明显的相关关系^[15]。但是, Huttunen 等人在研究北方湖泊时却发现: CH_4 通量与有机碳的输入有明显的相关关系^[13]。

风速是影响水-气界面气体通量的重要因素^[20,32]。研究表明, 洞庭湖、巢湖和抚仙湖 CH_4 通量与风速成正相关关系, 其相关系数分别为 0.745、0.990 和 0.963, 达显著甚至极显著水平。这主要由于当风速较大时, 风应力对底泥产生扰动, 促进底泥 CH_4 的释放。

3.2 冬季湖泊 CH_4 总释放量的估算

除由于上游来水和采沙作业的影响使鄱阳湖 CH_4 通量较大外, 其他湖泊水体的 CH_4 通量之间未有明显的空间差异(表 2), 这可能与各湖泊湖心区冬季水环境差异较小(如无水生植被)、温度低且昼夜差异较小等因素有关。王树伦等人发现台湾湖泊 CH_4 排放也无明显地域差异^[12]。这些湖泊水体水-气界面 CH_4 释放通量与冬季东湖、太湖以及台湾湖泊的 CH_4 通量相近^[15,29,13], 也与冬季芦苇湿地 CH_4 排放通量相近^[11]。因此, 我们能以 8 个湖泊水体水-气界面 CH_4 通量平均值($0.164 \pm 0.140 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$) 来估算冬季(90d)中国湖泊水体(面积为 $9.1 \times 10^4 \text{ km}^2$)向大气释放 CH_4 的总量, 其值约为 $(3.22 \pm 2.75) \times 10^7 \text{ kg}$ 。这大约相当于我国 1990 年稻田向大气排放的 CH_4 总量($1.15 \times 10^{10} \text{ kg}$)^[33] 的 2.8‰。由于湖泊沿岸带 CH_4 释放通量一般大于湖心区^[19], 因此该估算值可代表湖泊水体向大气排放 CH_4 总量的下限值。另外, 若要对湖泊水体向大气排放 CH_4 的总量进行精确估算, 必须对不同地域的不同类型的湖泊进行较长时间(至少为一年)、高频次(小于 7 d)的采样观测^[13,25]。

致谢: 本次采样得到了中国科学院太湖湖泊生态系统研究站副站长季江和中国科学院南京地理与湖泊研究所研究生王建军的帮助, 在此谨表谢意。

4 参考文献

- [1] Abe D S, Adams D D, Galli C V S *et al.* Sediment greenhouse gases (methane and carbon dioxide) in the Lobo-Broa Reservoir. *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, 2005, **10**: 201–209.
- [2] 丁一汇. IPCC 第二次气候变化科学评估报告的主要科学成果和问题. 地球科学进展, 1997, **12**(2): 158–163.
- [3] Boucher O, Haigh J, Hauglustaine D *et al.* Radiative forcing of climate. In: *Climate Change, IPCC Scientific Assessment 2001*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 388–389.
- [4] Blake D R, Rowland F S. Continuing worldwide increase in troposphere methane, 1978 to 1987. *Science*, 1988, **239**: 1129–1131.
- [5] Whiting G T, Chanton J P. Primary production control of methane emission from wetlands. *Nature*, 1993, **364**: 794–795.
- [6] 江长胜, 王跃思, 郑循华等. 川中丘陵区冬灌田甲烷和氧化亚氮排放研究. 应用生态学报, 2005, **16**(3): 539–544.
- [7] 杜尧东, 刘锦尧, 杨 宁等. 赤红壤早稻田甲烷排放通量及其影响因素. 生态学杂志, 2005, **24**(8): 939–942.
- [8] 黄国宏, 肖笃宁, 李玉祥等. 芦苇湿地温室气体甲烷排放研究. 生态学报, 2001, **21**(9): 1494–1497.
- [9] 丁维新, 蔡祖聪. 沼泽甲烷排放及其主要影响因素. 地理科学, 2002, **22**(5): 619–625.
- [10] Hirota M, Tang Y H, Hu Q W *et al.* The potential importance of grazing to the fluxes of carbon dioxide and methane in an alpine wetland on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**: 5255–5259.
- [11] Liikanen A, Huttunen J T, Karjalainen S M *et al.* Temporal and seasonal changes in greenhouse gas emissions from a constructed wetland purifying peat mining runoff waters. *Ecological Engineering*, 2006, **26**: 241–251.
- [12] 王树伦, 陈镇东, 张哲明. 台湾地区湖泊甲烷释放量. 海洋与湖沼, 1998, **29**(5): 527–533.

- [13] Huttunen J T, Alm J, Saarijarvi E *et al.* Contribution of winter to the annual CH₄ emission from a eutrophied boreal lake. *Chemosphere*, 2003, **50**:247 – 250.
- [14] 王苏民, 窦鸿身主编. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.
- [15] Xing Y P, Xie P, Yang H *et al.* Methane and carbon dioxide fluxes from a shallow hypereutrophic subtropical Lake in China. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**: 5532 – 5540.
- [16] Xing Y P, Xie P, Yang H *et al.* Diel variation of methane fluxes in summer in a eutrophic subtropical Lake in China. *Freshwater Ecology*, 2003, **19** (4): 639 – 644.
- [17] Duan X N, Wang X K, Mu Y J *et al.* Seasonal and diurnal variations in methane emissions from Wuliangsu Lake in arid regions of China. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**: 4479 – 4487.
- [18] 窦鸿身, 姜加虎主编. 中国五大淡水湖. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003.
- [19] 段晓男, 王效科, 欧阳志云. 维管植物对自然湿地甲烷排放的影响. *生态学报*, 2005, **25** (12): 3375 – 3382.
- [20] 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. *生态学杂志*, 2005, **24** (12): 1425 – 1429.
- [21] Wickland K P. Carbon gas exchange at a southern Rocky Mountain wetland, 1996 – 1998. *Global Biogeochem Cycle*, 2001, **15**: 321 – 335.
- [22] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH₄, CO₂ and N₂O emissions from short-plant ecosystem. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20**: 842 – 844.
- [23] Stadmark J, Leonardson L. Emissions of greenhouse gases from ponds constructed for nitrogen removal. *Ecological Engineering*, 2005, **25**: 542 – 551.
- [24] Striegl R G, Michmerhizen C M. Hydrologic influence on methane and carbon dioxide dynamics at two north-central Minnesota lakes. *Limnol & Oceanogr*, 1998, **43**: 1519 – 1529.
- [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. *Biogeochemistry*, 2000, **49**: 1 – 19.
- [26] Juutinen S, Alm J, Martikainen P *et al.* Effects of spring flood and water level draw-down on methane dynamics in the littoral zone of boreal lakes. *Freshwater Biology*, 2001, **46**: 855 – 869.
- [27] Edwards G C, Dias G M, Thurtell G W *et al.* Methane fluxes from a wetland using the flux-Gradient technique – the measurement of methane flux from a natural wetland pond and adjacent vegetated wetlands using a TDL-based flux-Gradient technique. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus*, 2001, **1**: 447 – 454.
- [28] Tanner C C, Adams D D, Downes M T. Methane emissions from constructed wetlands treating agricultural wastewaters. *Environment Quality*, 1997, **26**: 1052 – 1062.
- [29] Wang H J, Lu J W, Wang W D *et al.* Methane fluxes from the littoral zone of hyper-eutrophic Taihu Lake, China. *Journal of Geophysical Research* (received).
- [30] Johansson A E, Gustavsson A M, Oquist M G. Methane emissions from a constructed wetland treating wastewater-seasonal and spatial distribution and dependence on edaphic factors. *Water Research*, 2004, **38**: 3960 – 3970.
- [31] Ding W X, Cai Z C, Tsuruta H. Factors affecting seasonal variation of methane concentration in water in a freshwater marsh vegetated with *Carex lasiocarpa*. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, **41**: 1 – 8.
- [32] Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean. *Journal of Geophysical Research*, 1992, **97**: 7373 – 7382.
- [33] 王庚辰, 温玉璞主编. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.