

鄱阳湖秋季水-气界面 CH_4 排放通量的区域差异及影响因素^{*}

林 茂¹ 徐 明^{2**} 耿玉清¹ 刘丽香^{2,3} 张 鑫¹

(¹ 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; ² 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; ³ 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要 有限的观测点以及空间的异质性已经成为准确估算湖泊水-气界面 CH_4 通量的挑战。鄱阳湖是我国最大的淡水湖, 为了解秋季湖区水-气界面的 CH_4 排放通量, 2010 年 10 月利用密闭静态箱-气象色谱法对星子、都昌、南矶山和吴城 4 个湖区水-气界面 CH_4 排放通量及气象、底泥、水体等因素进行了测定。研究表明, 都昌湖区 CH_4 排放通量平均值为 $0.26 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 显著高于星子 ($0.15 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)、吴城 ($0.13 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 和南矶山 ($0.10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 湖区。鄱阳湖水-气界面秋季 CH_4 排放通量平均为 $0.17 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 变异系数为 58.6%。相关分析表明, 风速显著影响 CH_4 排放通量 ($P < 0.01$)。在排除风速 $> 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的数据后, 底泥有机碳以及水体铵态氮含量与 CH_4 排放通量显著相关, 而水体 DOC 含量与 CH_4 排放通量呈显著负相关 ($P < 0.05$)。对鄱阳湖 CH_4 排放量的精确估算, 依赖于较广区域和较长时间的观测。

关键词 鄱阳湖; CH_4 排放通量; 空间异质性; 风速; 溶解有机碳

中图分类号 X16 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2012)8-2112-07

Spatial heterogeneity and controlling factors of autumn CH_4 flux at water-air interface in Poyang Lake of Jiangxi Province, China. LIN Mao¹, XU Ming^{2**}, GENG Yu-qing¹, LIU Li-xiang^{2,3}, ZHANG Xin¹ (¹ School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; ² Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; ³ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(8): 2112–2118.

Abstract: Limited observation stations and high spatial heterogeneity of CH_4 flux are the challenges for the accurate estimation of CH_4 flux at water-air interface. Poyang Lake is the largest fresh-water lake in China. In order to understand the autumn CH_4 flux at the water-air interface in the Lake, closed static chambers and gas chromatography were adopted to measure the CH_4 fluxes at the water-air interfaces in 4 inner lakes of the Lake in October 2010. The environmental factors including meteorological variables and sediment- and water properties were also measured. The mean CH_4 flux in the Duchang inner lake was $0.26 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, which was obviously higher than that in the inner lakes Xingzi ($0.15 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), Wucheng ($0.13 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), and Nanjishan ($0.10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$). The Lake had a mean CH_4 flux of $0.17 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, with the coefficient of variation being 58.6%. The CH_4 flux was positively correlated with wind speed ($P < 0.01$). After excluding the wind speed exceeding $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the contents of sediment organic carbon and water body ammonium were significantly positively correlated with the CH_4 flux. The dissolved organic carbon (DOC) content in water body was negatively correla-

* 林业公益性行业科研专项(200804005)资助。

** 通讯作者 E-mail: mingxu@igsrr.ac.cn

收稿日期: 2012-02-04 接受日期: 2012-03-29

ted with the CH_4 flux ($P < 0.05$). The accurate estimation of the CH_4 flux in the Lake would depend on more frequent measurements in larger areas.

Key words: Poyang Lake; CH_4 flux; spatial heterogeneity; wind speed; dissolved organic carbon (DOC).

CH_4 是一种重要的痕量气体, 大约占人为排放温室气体的 18% (Yang *et al.* 2011)。尽管大气中 CH_4 的浓度远低于 CO_2 , 但 CH_4 分子具有较强的红外吸收能力, 单分子的增温潜势是 CO_2 的 15 ~ 30 倍 (Rodhe, 1990)。湿地是介于水体和陆地之间的生态交错区, 长期的淹水过程引发的沉积物厌氧环境为 CH_4 的产生创造了先决条件。据测算, 自然湿地每年向大气排放的 CH_4 有 92 ~ 232 Tg, 占全球总排放量的 20% ~ 33% (Wuebbles & Hayhoe 2002; Reeburgh 2003)。而作为重要 CH_4 排放源的湖泊湿地每年向大气排放的 CH_4 也达到了 8 ~ 48 Tg (Bastviken *et al.* 2004)。针对湖泊湿地的重要地位, 科学家围绕湖泊 CH_4 排放通量的日变化和季节变化等进行了广泛研究 (Frei *et al.* 2006; Repo *et al.* 2007), 为 CH_4 排放量的年度或生长季节估算提供了宝贵的数据。

有限的观测点以及湖泊区域的空间的异质性影响了湖泊水-气界面 CH_4 排放量的准确估算。大量研究表明, 不同类型的湖泊以及湖泊内部的 CH_4 排放通量有显著的差异。如 Juutinen 等 (2009) 对不同湖泊大小以及不同深浅及营养化程度的 10 种类型湖泊进行了监测, 发现腐殖质含量多的湖泊和浅水湖泊的 CH_4 排放通量较高。Bastviken 等 (2010) 在同一湖区由岸边到湖中心随机布设 2 ~ 5 个观测点, 测得 CH_4 排放通量的变异系数 218%, 并发现底泥有机碳、氮和水深等因素导致了湖泊 CH_4 排放通量的差异。而微地形、水文、植被等因素的不同又极大地驱动了 CH_4 排放通量的变异 (Kutzbach *et al.*, 2004; Riutta *et al.* 2007)。湖泊环境因素的复杂性是引起 CH_4 排放通量区域差异的主要原因。

我国是湖泊众多的国家, 总面积达到 $9.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ 以上 (王苏民和窦鸿身, 1998)。目前已有学者对太湖、东湖、鸟梁素海以及鄱阳湖等的水-气界面 CH_4 排放通量进行了研究 (李香华 2005; 陈永根等 2007; 段晓男等 2007)。鄱阳湖是我国最大的淡水湖, 湖区湿地面积约 2700 km^2 (王晓鸿 2005), 是我国公布的首批国家重点湿地保护地区之一。Wan 等 (2010) 对鄱阳湖湿地生长季 CH_4 排放通量进行

了估算。陈永根等 (2007) 研究了鄱阳湖冬季 CH_4 排放通量。但鄱阳湖水文季节性变化明显, 河、湖、滩交错分布, 影响了湖泊 CH_4 排放量的精确估算。本研究以鄱阳湖人为影响较小的 4 个湖区为研究对象, 在秋季进行 CH_4 排放通量的观测, 目的是探讨 CH_4 排放通量的区域差异以及影响因素, 以期为我国湖泊湿地 CH_4 排放量估算提供基础参数。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

鄱阳湖位于长江中下游交接处的南岸, 地理坐标为 $115^\circ 47' \text{E}$ — $116^\circ 45' \text{E}$, $28^\circ 22' \text{N}$ — $29^\circ 45' \text{N}$ 。受长江和信江、饶河、修水等流域来水的影响, 鄱阳湖湖区水位变化比较大, 丰水季节在 5—9 月, 枯水季节在 11—翌年 3 月。鄱阳湖区域属于中亚热带湿润季风气候, 夏季盛行偏南风, 炎热多雨; 冬季盛行偏北风, 气温低而降雨少。年平均气温为 $16.5 \sim 17.6^\circ \text{C}$, 其中最冷月 (1 月) 平均气温为 5.1°C , 最热月 (7 月) 平均气温为 29.5°C ; 年均降雨量 $1450 \sim 1550 \text{ mm}$, 主要集中在 4—6 月。鄱阳湖处于枯水期时, 苔草、芦苇等各种湿生和挺水植物开始大面积生长发育; 丰水期时, 苔草等湿生植物被水淹没而停止生长。

本研究的具体区域为鄱阳湖的星子、都昌、南矶山和吴城湖区。其中星子湖区地处鄱阳湖下游, 湖岸线长 200 km , 水域面积 320 km^2 , 其生态环境仍然处于一个原生状态, 水资源和水环境情况良好。都昌湖区水域面积最大, 生态资源丰富, 现有鸟类 270 余种, 植物 200 余种, 鱼类 118 种。南矶山湖区和吴城湖区为国家级湿地自然保护区, 受人为因素影响较小。其中南矶山湖区又被誉为“百鹤王国”、“候鸟乐园”和“国际级极为重要的湿地”。

1.2 样品采集与分析

1.2.1 样品的采集 根据 Irvine 和 Gitelman (2007) 的群体抽样策略, 分别在 4 个湖区的浅水区及深水区 (水深在 $0.87 \sim 2.5 \text{ m}$) 随机布设 3 ~ 5 个采样点 (采样点间距均大约为星子湖区 $120 \sim 300 \text{ m}$ 、都昌湖区 $150 \sim 300 \text{ m}$ 、南矶山湖区 $60 \sim 200 \text{ m}$ 、吴城湖区

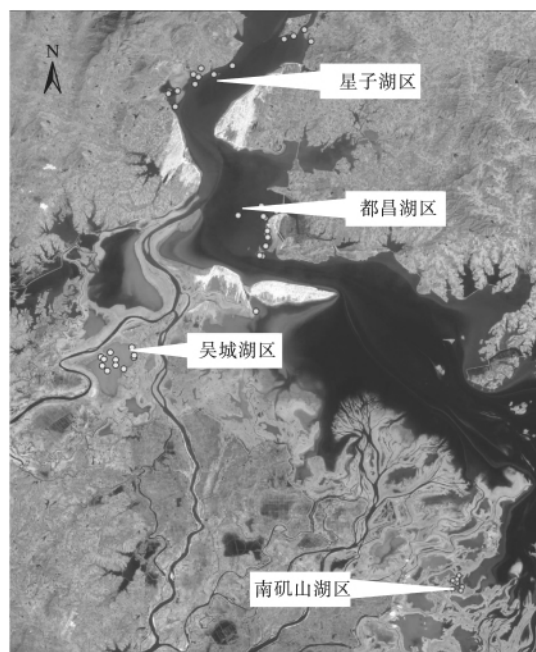


图1 鄱阳湖研究区域位置示意图

Fig. 1 Locations of study sites in Poyang lake

100 ~ 200 m) , 共 44 个采样点。于 2010 年 10 月 16、17、18 日 , 分 4 组在 4 个湖区同时进行采样 , 每个采样点有 3 个气室(即 3 个重复) 。在采集气体样本的同时 , 使用 Testo 410-1(德国) 风速仪测定风速及气温(离水面约 1.5 m) 。取样期间的鄱阳湖处于由丰水期向枯水期的过渡时期 , 水面并无挺水植物。

应用静态气室法采集气体样本。采样箱分箱体和盖子两部分 , 其中箱体用直径 20 cm 的 PVC 管制成 , 高 100 cm。箱体上套有直径 20 cm 的轮胎 , 使箱子漂浮于水面; 盖子是直径 21 cm 的 PVC 板 , 箱口粘接硅胶管 , 使其密闭性更好。盖子上装有 12 V 风扇 , 可使箱内气体混匀。另有 3 根 PU 管(外径 6 mm , 内径 4 mm) 相连 , 其中 1 根起平衡气压的作用 , 另外 2 根连接气泵形成回路 , 以混匀箱内及采样瓶内气体。气体采集使用 80 mL 采样瓶 , 采样时间分别为 0、20、40、60 min。底泥样本的采集应用 4 m 土钻 , 采集深度为 0 ~ 10 cm。水样依据测定点水深分上、中、下 3 层用取水器采集。

1.2.2 样品分析 野外采集气体的 CH_4 浓度应用安捷伦 7890A 气相色谱仪进行分析。其中 CH_4 检测器为 FID(氢焰离子化检测器) , 载气为氮气 , 流速 $20 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$; 氢气为燃气 , 流速为 $50 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$; 空气为助燃气 , 流速为 $400 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 检测器温度为 350°C , 柱箱温度为 60°C 。用 $2.0 \text{ mL} \cdot \text{m}^{-3}$ 的

CH_4 标准气体校正仪器。 CH_4 排放通量采用下式进行计算(Wichland 2001) :

$$F = \frac{kPV}{S(T_c + 273)} \times \frac{\partial C}{\partial t} \quad (1)$$

式中 F 为 CH_4 排放通量 , 单位为 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; $k = 10/8.314 = 1.2028$, 单位为 $\text{mol} \cdot ^\circ\text{C} (\text{m}^3 \cdot \text{kPa})^{-1}$; S 为密闭箱底面积 , 单位为 m^2 ; V 为密闭箱体积 , 单位为 m^3 ; T_c 为测定的温度 , 单位为 $^\circ\text{C}$; $\partial C / \partial t$ 为单位时间密闭箱内温室气体的浓度变化量 , 单位为 $\text{mg} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

底泥有机碳含量采用重铬酸钾-外加热容量法(鲁如坤 2000) 。采用 DELTA 320pH 计测定水样的 pH 值; 铵态氮用 BRAN + LUEBBE Auto Analyzer 3 直接测定; DOC 使用 Liqui TOC II 测定。由于水样各层同一指标的差异较小 , 故测定结果取 3 层的平均值。

1.3 数据分析

采用 SPSS 18.0 软件对数据进行分析 , 其中采用 one-way ANOVA 分析不同湖区 CH_4 排放通量的显著性差异 , 环境因素与 CH_4 排放通量的相关性采用 Pearson 检验法。

2 结果与分析

2.1 鄱阳湖不同湖区 CH_4 排放通量的差异

由于设备原因 , 在 10 月 16 日未对南矶山湖区进行取样。16 日星子湖区 CH_4 排放通量为 $0.18 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 分别比都昌和吴城湖区的 CH_4 排放通量高 21.6% 和 50.5%。统计结果显示 3 个湖区的 CH_4 排放通量没有显著差异。17 日都昌湖区 CH_4 排放通量最高为 $0.26 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 显著高于星子、南矶山和吴城湖区。南矶山湖区 CH_4 排放通量最小为 $0.07 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 显著低于星子和吴城湖区。18 日都昌湖区 CH_4 排放通量为 $0.37 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 分别比星子、南矶山、吴城湖区高 157.3%、187.4% 和 141.7% , 其差异达到显著水平 , 但星子、南矶山和吴城湖区 CH_4 排放通量差异不显著(图 2) 。总的来看 , 不同湖区 CH_4 排放通量差异在不同取样日期是有别的。

对测定期间不同湖区 CH_4 排放通量值进行平均(图 3) , 其中都昌湖区 CH_4 排放通量最高为 $0.27 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 显著高于星子、吴城和南矶山湖区。而星子、南矶山和吴城湖区 CH_4 排放通量差异不显著。

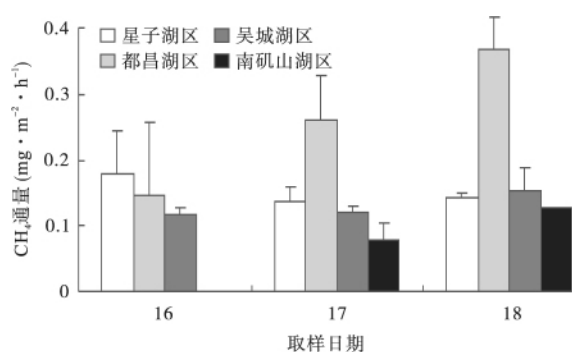


图2 不同取样日期不同湖区 CH_4 排放通量
Fig. 2 CH_4 fluxes from four lakes in different dates

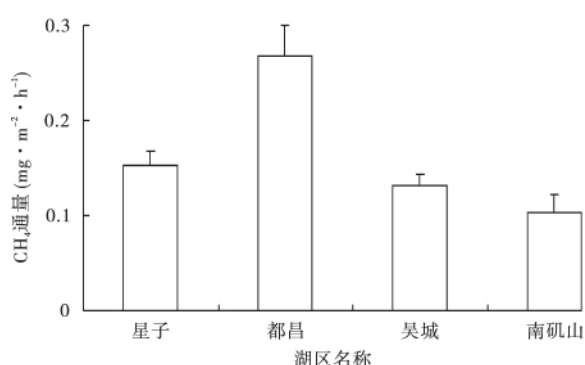


图3 采样期间4个湖区 CH_4 排放通量
Fig. 3 CH_4 fluxes from four lakes during the sampling period

2.2 CH_4 排放通量与环境因素的关系

2.2.1 CH_4 排放通量与气象因素的相关性 统计分析显示, CH_4 排放通量与风速呈极显著正相关关系 ($R^2 = 0.36$, $P < 0.01$) (图4)。针对风速对水气界面 CH_4 排放通量影响较大的事实, 为进一步探讨其他环境因子对 CH_4 排放通量的影响程度, 在其他相关的分析中排除了风速 $> 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的点。分析得出 CH_4 排放通量与气温的相关性不显著 ($R^2 = 0.001$, $P = 0.85$)。

2.2.2 CH_4 排放通量与底泥及水体样本各指标的相关性 CH_4 排放通量与底泥有机碳含量及水体铵态氮有显著正相关关系 ($R^2 = 0.36$, $P < 0.01$; $R^2 = 0.17$, $P < 0.01$; $R^2 = 0.14$, $P < 0.05$), 而与水体 DOC 呈显著负相关关系 ($R^2 = 0.12$, $P < 0.05$), 与 pH 及电导率相关性不明显 ($R^2 = 0.013$, $P = 0.06$; $R^2 = 0.01$, $P = 0.59$) (图5)。

3 讨论

3.1 环境因素对 CH_4 排放通量的影响

研究表明, 风速显著影响 CH_4 排放通量(图4)。

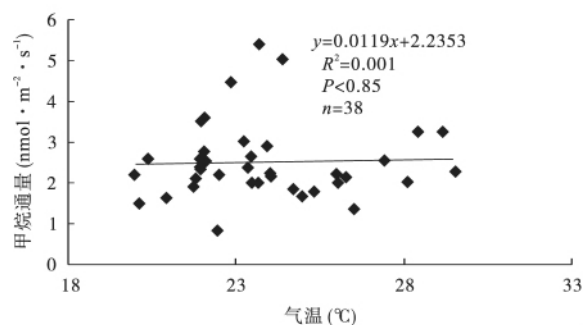
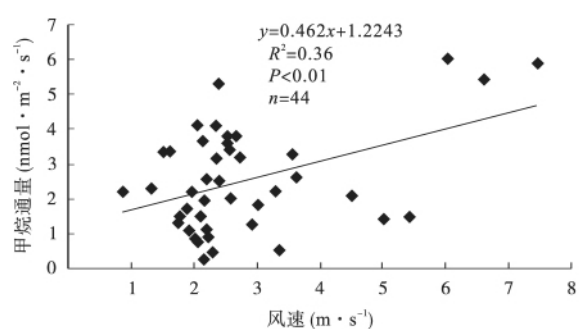


图4 CH_4 排放通量与气象因素的相关关系
Fig. 4 Relationships between CH_4 fluxes and meteorological factors

陈永根等(2007) 也认为, 风速增大可促进水-气界面 CH_4 排放通量的相应增加。风速促进 CH_4 排放的原因主要是因为风应力对底泥产生的扰动作用, 促进了底泥 CH_4 的释放并导致 CH_4 排放通量增加 (Hargreaves *et al.* 2001; Wille *et al.* 2008)。

从产生机制来看, CH_4 可通过厌氧发酵生成。在厌氧条件下有机碳被认为是 CH_4 产生的主要限制因素(葛瑞娟等 2011)。湖底沉积物中有机碳含量越高, CH_4 排放量也越大(林匡飞等, 2000; Singh *et al.* 2000); 向湿地土壤添加有机碳可使 CH_4 排放量增加(丁维新和蔡祖聪 2006)。本研究也进一步证实底泥有机碳的增加可促进鄱阳湖水-气界面 CH_4 排放通量增加(图5)。

虽然底泥有机碳促进了 CH_4 的排放, 但水体 DOC 对 CH_4 产生的作用是不确定的。Tranvik 等(2009) 认为, 水体中较高的 DOC 浓度能增加 CH_4 的产生和排放; 而水稻田 CH_4 排放通量与 DOC 含量没有显著相关性(Wang *et al.*, 1993)。本研究 CH_4 排放通量与水体 DOC 含量呈显著负相关关系(图5)。这可能是由 DOC 中含有对产甲烷菌有害的黄酸造成的(陈永根等 2007)。

从理论上讲, 产甲烷菌和甲烷氧化菌均可直接利用铵态氮为营养源, 而不能利用硝态氮或者其他形态的氮(陈槐等 2006)。但铵态氮促进 CH_4 排放

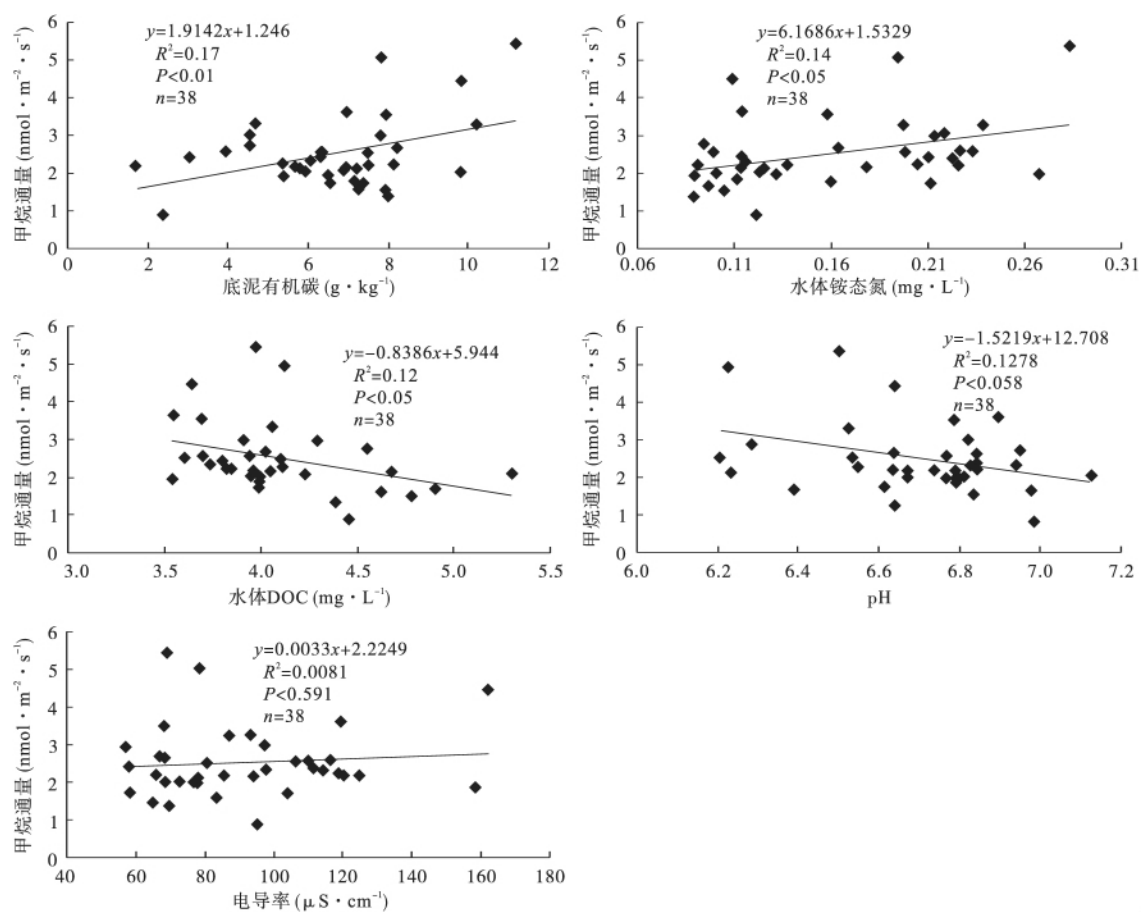


图5 CH_4 排放通量与底泥及水体因子的相关关系

Fig. 5 Relationship between CH_4 fluxes and sediment and water body factors

通量增加的方式不同。一方面,铵态氮可通过刺激产 CH_4 细菌的增长及增强其活性促进 CH_4 的排放(丁维新和蔡祖聪, 2003; Schrier-Uijl *et al.*, 2011), 另一方面甲烷氧化菌和氨氧化菌都既能氧化铵态氮, 又能氧化 CH_4 , 铵态氮作为 CH_4 的竞争物而抑制 CH_4 的氧化(Hutsch *et al.*, 1993; Stapleton *et al.*, 2005), 从而增加 CH_4 排放通量。本研究发现, 鄱阳湖水体铵态氮的增加, 可显著提高 CH_4 排放通量(图5), 与Schrier-Uijl等(2011)的研究结果相符。

3.2 鄱阳湖水-气界面 CH_4 排放通量的区域差异

研究表明, 不同湖泊间乃至湖泊内部 CH_4 排放通量存在较大差异。Pavel等(2009)对热带湖泊和河流的研究中发现, CH_4 排放通量的变异系数为74.6%~232.6%; 陈永根等(2007)在冬季对八大湖的研究表明, 不同湖泊间 CH_4 排放通量的变异系数为167.2%; Zhu等(2010)研究发现, 湖泊间 CH_4 排放通量的变异系数为71.5%。除湖泊间, 湖泊内

部 CH_4 排放通量的变异系数也达到了60.2%和84.4%。Abril等(2005)研究发现, 湖泊内 CH_4 排放通量变异系数为27.4%~47.8%。本研究结果显示, 鄱阳湖4个湖区水-气界面 CH_4 排放通量平均值的变化幅度为0.1~0.26 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 变异系数为43.8%(图2)。其中, 16日3个湖区的差异最小, 变异系数为20.2%; 18日差异最大, 变异系数为57.6%(图2)。这种差异主要与取样点的气象因子、底泥和水体状况等因素有关, 各湖区风速差异较大可能是引起这一差异的主要原因。例如, 16日星子、都昌和吴城湖3个湖区 CH_4 排放通量差异不显著, 与3个湖之间的风速差异不大(1.6、1.4和1.2 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)有关; 18日都昌湖区 CH_4 排放通量显著高于星子、南矶山和吴城湖区, 也与都昌湖区风速(5.8 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)显著高于星子、南矶山和吴城湖区(3.1、3.9和3.5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)有关。

本研究在4个湖区共设采样点44个, 由此可知鄱阳湖秋季水-气界面的 CH_4 排放通量为(0.17 \pm

0.03) $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。这一数值明显低于陈永根等(2007)得出的冬季鄱阳湖 CH_4 排放通量(0.82 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)。造成上述差异的原因可能与采样点的数量和区域差异有关。

4 结 论

都昌湖区 CH_4 排放通量平均值为 0.26 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 显著高于星子湖区、吴城湖区和南矶山湖区; 4 个不同湖区 CH_4 排放通量差异也与取样日期有关。2010 年 10 月测定鄱阳湖水-气界面 CH_4 排放通量平均为(0.17 \pm 0.03) $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 变异系数为 58.6%。

CH_4 排放通量与风速呈极显著相关, 底泥有机碳以及水体铵态氮也显著促进 CH_4 的排放, 而水体 DOC 的含量与水-气界面 CH_4 排放通量呈负相关关系。

由于环境因素差异对 CH_4 排放通量的巨大影响以及 CH_4 的产生、运输和扩散过程的复杂性, 因此精确的估算 CH_4 排放量, 依赖于更广阔的空间和较长的时间研究。

致 谢 感谢中国科学院鄱阳湖湿地观测综合研究站及江西鄱阳湖八字墙保护区工作人员在本研究开展过程中给予的大力支持与协助。

参考文献

- 陈 槐, 周 舜, 吴 宁, 等. 2006. 湿地甲烷的产生、氧化及排放通量研究进展. 应用与环境生物学报, 12(5): 726–733.
- 陈永根, 白晓华, 李香华, 等. 2007. 中国 8 大湖泊冬季水-气界面甲烷通量初步研究. 湖泊科学, 19(1): 11–17.
- 丁维新, 蔡祖聪. 2003. 氮肥对土壤甲烷产生的影响. 农业环境科学学报, 22(3): 380–383.
- 丁维新, 蔡祖聪. 2006. 自然湿地甲烷排放时空变化规律研究. 中国科学院研究生院学报, 23(4): 561–568.
- 段晓男, 王效科, 陈 琳, 等. 2007. 乌梁素海湖泊湿地植物区甲烷排放规律. 环境科学, 28(3): 455–459.
- 葛瑞娟, 宋长春, 王丽丽. 2011. 湿地甲烷生物化学过程及影响因素的研究进展. 土壤通报, 42(1): 229–235.
- 李香华. 2005. 太湖水-气界面温室气体通量及时空变化特征(硕士学位论文). 南京: 河海大学.
- 林匡飞, 项雅玲, 姜达炳, 等. 2000. 湖北地区稻田甲烷排放量及控制措施的研究. 农业环境保护, 19(5): 267–270.
- 鲁如坤. 2000. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社.

- 王苏民, 窦鸿身. 1998. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社.
- 王晓鸿. 2005. 鄱阳湖湿地生态系统评估. 北京: 科学出版社.
- Abril G, Guérin F, Richard S, et al. 2005. Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old tropical reservoir (Petit Saut, French Guiana). *Global Biogeochemical Cycles*, 19: 1–16.
- Bastviken D, Cole J, Pace M, et al. 2004. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global Biogeochemical Cycles*, 18: doi: 10.1029/2004GB002238.
- Bastviken D, Humberto M, Patrick C, et al. 2010. Methane emissions from Pantanal, South America, during the low water season: Toward more comprehensive sampling. *Environmental Science and Technology*, 44: 5450–5455.
- Frei M, Razzak MA, Hossain MM, et al. 2006. Methane emissions and related physicochemical soil and water parameters in rice-fish systems in Bangladesh. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 120: 391–398.
- Hargreaves KJ, Fowler D, Aurela M, et al. 2001. Annual methane emission from Finnish mires estimated from eddy covariance campaign measurements. *Theoretical and Applied Climatology*, 70: 203–213.
- Hutsch BW, Webster CP, Powlson DS. 1993. Long-term effects of nitrogen fertilization on methane oxidation in soil of the Broadbalk Wheat Experiment. *Soil Biology and Biochemistry*, 25: 1307–1315.
- Irvine KM, Gitelman AI. 2007. Spatial designs and properties of spatial correlation: Effects on covariance estimation. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, 12: 450–469.
- Juutinen S, Rantakari M, Kortelainen P, et al. 2009. Methane dynamics in different boreal lake types. *Biogeosciences*, 6: 209–223.
- Kutzbach L, Wagner D, Pfeiffer E. 2004. Effect of microrelief and vegetation on methane emission from wet polygonal tundra, Lena Delta, Northern Siberia. *Biogeochemistry*, 69: 341–362.
- Pavel A, Durisch-Kaiser E, Balan S, et al. 2009. Sources and emission of greenhouse gases in Danube Delta lakes. *Environmental Science and Pollution Research*, 16: 86–91.
- Reeburgh WS. 2003. Global methane biogeochemistry// Keeling R, eds. *Treatise on Geochemistry: The Atmosphere*. Amsterdam: Elsevier: 65–89.
- Repo ME, Huttunen JT, Naumov AV, et al. 2007. Release of CO_2 and CH_4 from small wetland lakes in western Siberia. *Tellus*, 59: 788–796.
- Riutta T, Laine J, Aurela M, et al. 2007. Spatial variation in plant community functions regulates carbon gas dynamics in

- a boreal fen ecosystem. *Tellus* ,**59**: 838 – 852.
- Rodhe AL. 1990. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect. *Science* ,**248**: 1217 – 1279.
- Schrier-Uijl AP , Veraart AJ , Leffelaar PA , *et al.* 2011. Release of CO₂ and CH₄ from lakes and drainage ditches in temperate wetlands. *Biogeochemistry* ,**102**: 265 – 279.
- Singh SN , Kulshreshtha K , Agnibotri S. 2000. Seasonal dynamics of methane emission from wetlands. *Chemosphere: Global Change Science* ,**2**: 39 – 46.
- Stapleton LM , Crout NMJ , S  wstr  m C , *et al.* 2005. Microbial carbon dynamics in nitrogen amended Arctic tundra soil measurement and model testing. *Soil Biology and Biochemistry* ,**37**: 2088 – 2098.
- Tranvik LJ , Downing JA , Cotner JB , *et al.* 2009. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and Oceanography* ,**54**: 2298 – 2314.
- Wan H , Qin Z , Liu Y , *et al.* 2010. Estimate of carbon fluxes from Poyang Lake wetland vegetation in the growing season. *Proceedings of SPIE* , vol. 7858 , 78581B; doi: 10.1117/12.869540.
- Wang M , Shangguan X , Shen R , *et al.* 1993. Methane Production , Emission and Possible Control Measures in the Rice Agriculture. *Advances in Atmospheric Sciences* ,**10**: 307 – 314.
- Wichland KP. 2001. Carbon gas exchange at a southern Rocky Mountain wetland , 1996 – 1998. *Global Biogeochemical Cycles* ,**15**: 221 – 235.
- Wille C , Kutzbach L , Sachs T , *et al.* 2008. Methane emission from Siberian arctic polygonal tundra: Eddy covariance measurements and modeling. *Global Change Biology* ,**14**: 1 – 14.
- Wuebbles DJ , Hayhoe K. 2002. Atmospheric methane and global change. *Earth-Science Reviews* ,**57**: 177 – 210.
- Yang H , Xie P , Roger JF , *et al.* 2011. Underestimation of CH₄ emission from freshwater lakes in China. *Environmental Science and Technology* ,**45**: 4203 – 4204.
- Zhu RB , Liu YS , Xu H , *et al.* 2010. Carbon dioxide and methane fluxes in the littoral zones of two lakes , east Antarctica. *Atmospheric Environment* ,**44**: 304 – 311.
-
- 作者简介 林 茂 男 ,1984 年生 ,硕士研究生 ,主要从事湿地生态系统碳循环研究。E-mail: lm5313713@126.com
- 责任编辑 魏中青
-