

## 三峡水库湖北段甲烷排放通量时空特征及其影响因素分析

赵 玮<sup>1,2</sup> 朱孔贤<sup>1,2</sup> 黄文敏<sup>1</sup> 毕永红<sup>1</sup>

袁希功<sup>1,2</sup> 余博识<sup>1</sup> 胡征宇<sup>1</sup>

(1. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

### TEMPORAL-SPATIAL PATTERNS OF METHANE EMISSION FLUX AND ITS INFLUENCE FACTORS IN HUBEI PART OF THREE GORGES RESERVOIR

ZHAO Wei<sup>1,2</sup>, ZHU Kong-Xian<sup>1,2</sup>, HUANG Wen-Min<sup>1</sup>, BI Yong-Hong<sup>1</sup>,  
YUAN Xi-Gong<sup>1,2</sup>, YU Bo-Shi<sup>1</sup> and HU Zheng-Yu<sup>1</sup>

(1. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

关键词: 甲烷排放通量; 时空特征; 影响因素; 三峡水库

**Key words:** Methane emission flux; Temporal-spatial patterns; Influence factors; The Three Gorges Reservoir

中图分类号: Q178.1<sup>+</sup>11 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2013)04-0776-06

甲烷是一种重要的温室气体,在大气中的浓度以每年 1% 的速率增加,是 CO<sub>2</sub> 增加速率的 4 倍,其在 100 a 的时间尺度上,具有 25 倍于 CO<sub>2</sub> 的增温潜力<sup>[1]</sup>,自 20 世纪 90 年代以来受到了学者们的广泛关注。一般认为化石燃料燃烧是大气中温室气体增加的主要来源,最近的研究发现自然水体和人工水库均可以排放甲烷。水库在成库和运行过程中,水柱和沉积物中的有机质可在厌氧条件下,被产甲烷细菌等微生物作用,释放甲烷;当前,水库排放的甲烷对大气温室效应的贡献成为了国内外争论的热点问题<sup>[2]</sup>。有研究认为热带地区因水力发电修建的水库其温室气体排放量高于火电<sup>[3]</sup>,也有估算表明,全球总面积为 0.26×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> 的水库上游水域<sup>[4]</sup>,甲烷年排放量为 4.8 Tg/yr (Tg = 10<sup>12</sup> g)<sup>[5]</sup>,占全球甲烷年总排放量(503—610 Tg/yr)<sup>[1]</sup> 的 0.79%—0.95%。迄今为止,国际上关于水库甲烷排放的研究依然显得十分不足,无法为厘清水库甲烷的温室效应提供必要的支持。在中国,水库温室气体排放的研究自 2007 年开始逐渐开展。截止目前,涉及水库甲烷排放研究的有密云水库<sup>[6]</sup>、二滩水库<sup>[7]</sup>、猫跳河流域梯级开发的各水库<sup>[8]</sup>、水布垭水库<sup>[9]</sup>和三峡水库<sup>[10, 11]</sup>。

目前,对三峡水库(TGR)水面甲烷排放通量的研究均局限于长江干流的重庆段<sup>[10]</sup>和支流的香溪河<sup>[11]</sup>。

三峡水库是一座特大型的深水河流型水库,2003 年蓄水成库,在成库的过程中淹没了大量的耕地,由于其深水特性,加之其在国际上的巨大影响,其温室气体排放问题受到关注。已有的研究均局限于特定水域,或针对干流,或针对支流开展温室气体的调查,由于三峡水库的峡谷河道型特征,需要同步开展干支流的调查才有助于全面深入认识三峡水库的温室气体排放“源汇”地位;鉴于此于 2010 年三峡水库 175 m 实验性蓄水完成之后的 11 月至 2011 年的 10 月间在三峡水库湖北段的干支流开展了温室气体的逐月调查监测,本文主要介绍此次调查中甲烷排放通量的时空特征,并结合库区环境状况分析了库区甲烷排放通量与环境因素之间的关系,对于理解三峡水库的甲烷排放规律具有一定的指导意义。

### 1 材料与方法

#### 1.1 样点设置

在三峡水库湖北段设置 5 个采样位点(图 1),其中长

收稿日期: 2012-05-18; 修订日期: 2013-03-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(31100340); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB955904-06)资助

作者简介: 赵玮(1987—),女,河南郑州人;硕士研究生;主要研究方向为水环境科学。E-mail: zhaowei@ihb.ac.cn

通信作者: 毕永红, E-mail: biyh@ihb.ac.cn; 胡征宇, E-mail: huzhy@ihb.ac.cn

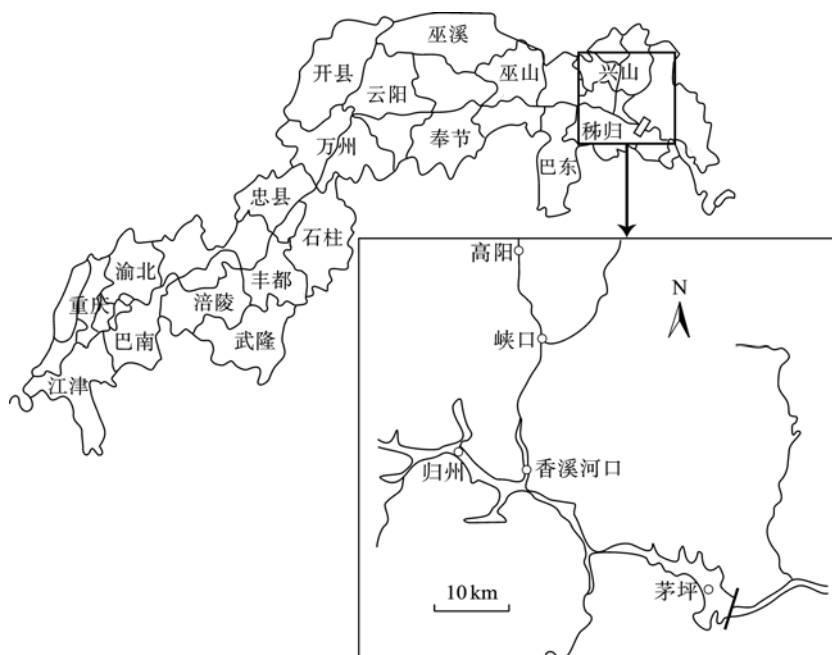


图 1 三峡水库湖北段甲烷排放通量研究的采样位点(图中圆圈所示)

Fig. 1 Sampling sites of the methane emission flux research in Hubei part of TGR (shown as the circles)

江干流设置 2 个采样点, 分别位于茅坪(MP, E 110°59'07", N 30°50'48", 河床高程 58 m)和归州(GZ, E 110°40'48", N 30°59'55", 河床高程 62 m), 沿库区支流香溪河口至上游设置 3 个采样点, 分别位于香溪河口(HK, E 110°45'47", N 30°58'18", 河床高程 70 m)、峡口(XK, E 110°46'58", N 31°07'17", 河床高程 120 m)和回水末端的高阳(GY, E 110°45'30", N 31°13'32", 河床高程 152 m), 6—8 月, 库区水位降至 145 m, 回水末端采样点前移 3 km, 坐标为 E 110°45'09", N 31°11'52", 河床高程 144 m。

## 1.2 样品采集及分析

气体样品采样自 2010 年 11 月至 2011 年 10 月, 于每月 15 日左右的上午 9:00—11:00 进行。温室气体采集-分析方法采用静态箱-气相色谱法。气体采样箱的设置、气体采集和分析方法以及甲烷排放通量( $F_{CH_4}$ )的计算参见文献[12]。

## 1.3 环境参数测定

气体采样的同时进行环境参数的测量。利用温度传感器测量静态箱内温度, 利用 Kestrel 4000 风速气象仪(NK 公司, 美国)记录水面气温(AT)、气压(AP)、风速(WS), 现场测量水温(WT)等水体理化参数(YSI ProPlus, YSI 公司, 美国), 赛氏盘法测量水体透明度(SD), 并采集表层水样(0.5 m 水深处), 并将水样带回实验室分析 Chl.  $a$ 、TP、TN、COD<sub>Mn</sub> 等水质指标, 分析方法参见文献[13]。计算水体综合营养状态指数 TLI( $\Sigma$ )<sup>[14]</sup>。水-气温差(TG)为气温和水温的差值。并用 Multi-N/C2100 TOC 分析仪(耶拿公司, 德国)测量水体中溶解性有机碳(DOC)含量。根据采样点

高程(宜昌水文局提供)及库区即时水位(中国长江三峡集团公司提供)计算采样位点的水深(Depth)。2011 年 3 月和 10 月用彼得森式采泥器采集各位点表层沉积物(10 cm), 现场用甘汞电极测量沉积物氧化还原电位(Eh)。泥样 0 °C 冷藏带回实验室, 用 Multi-N/C2100-HT1300 固体模块测量沉积物中有机碳(TOC)含量。

## 1.4 统计分析方法

数据处理: 四季的划分, 春季为 3—5 月, 夏季为 6—8 月, 秋季为 9—11 月, 冬季为 12—2 月(翌年); 每个季节甲烷排放通量为 5 个位点数据的平均值; 不同空间甲烷排放通量为各个位点周年的平均值。采用 SPSS13.0 软件的单因素方差分析(One-Way ANOVA)方法分析数据之间的差异性,  $P < 0.05$  为显著水平; 采用相关分析(Bivariate correlations)方法分析数据之间的相关性,  $P < 0.01$  为极显著水平。

## 2 结果

### 2.1 甲烷排放通量的时间变化

如图 2 所示, 三峡水库湖北段水-气界面周年都表现为甲烷排放, 甲烷平均排放通量从秋季到夏季逐渐增加。秋季甲烷平均排放通量为  $(0.044 \pm 0.029)$  mg/(m<sup>2</sup>·h), 9 月出现最高值  $[(0.056 \pm 0.023)$  mg/(m<sup>2</sup>·h)]; 冬季甲烷平均排放通量为  $(0.062 \pm 0.034)$  mg/(m<sup>2</sup>·h), 2 月出现最高值  $[(0.079 \pm 0.045)$  mg/(m<sup>2</sup>·h)]; 春季甲烷平均排放通量为  $(0.074 \pm 0.037)$  mg/(m<sup>2</sup>·h), 5 月出现最高值  $[(0.080 \pm 0.045)$  mg/(m<sup>2</sup>·h)]; 夏季甲烷平均排放通量为  $(0.229 \pm 0.320)$  mg/(m<sup>2</sup>·h), 7 月出现最高值  $[(0.404 \pm 0.486)$  mg/(m<sup>2</sup>·h)](图 2 中月份数值未列出)。One-Way ANOVA 分析结果表明, 甲烷排放通量存在明显的季节变化, 夏季的甲烷排放通量显著高于其他季节, 春季的甲烷排放通量显著高于秋季, 而春季与冬季之间、秋季与冬季之间的甲烷排放通量无显著差异。

### 2.2 甲烷排放通量的空间变化

如图 3a 所示, 三峡水库湖北段长江干流甲烷年平均排放通量为  $(0.057 \pm 0.033)$  mg/(m<sup>2</sup>·h), 支流香溪河甲烷年平均排放通量为  $(0.132 \pm 0.220)$  mg/(m<sup>2</sup>·h), One-Way ANOVA 分析结果表明, 长江干流的甲烷年平均排放通量与支流香溪河之间无显著差异。如图 3b 所示, 长江干流茅坪位点甲烷年平均排放通量为  $(0.053 \pm 0.018)$  mg/(m<sup>2</sup>·h), 5 月出现最大值为  $0.087$  mg/(m<sup>2</sup>·h); 干流归州位点甲烷年平均排放通量为  $(0.061 \pm 0.044)$  mg/(m<sup>2</sup>·h), 7 月出现最大值为  $0.153$  mg/(m<sup>2</sup>·h); 支流香溪河河口位点甲烷年平均

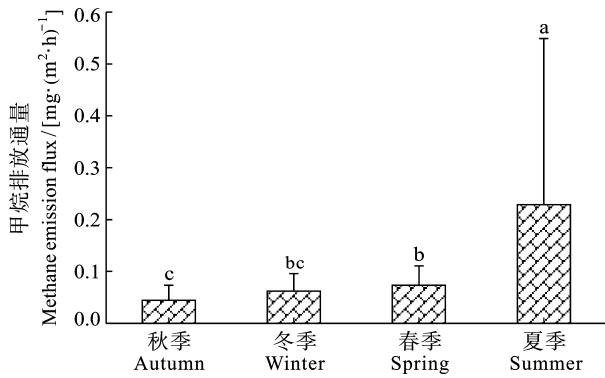


图 2 三峡水库湖北段甲烷排放通量的季节变化(柱状图上不同字母表示差异显著,下同)

Fig. 2 Seasonally variation of the methane emission flux in Hubei part of TGR (Column with different superscripts were significantly different, the same as below)

排放通量为  $(0.049 \pm 0.021) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 4 月出现最大值为  $0.081 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ; 支流峡口位点甲烷年平均排放通量为  $(0.091 \pm 0.146) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 7 月出现最大值为  $0.548 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ; 支流高阳位点甲烷年平均排放通量为  $(0.256 \pm 0.327) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 7 月出现最大值为  $1.196 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  (图 3 中月份数值未列出)。One-Way ANOVA 分析结果表明, 甲烷排放通量在各位点间存在显著差异, 支流高阳位点的甲烷排放通量显著高于长江干流和支流中下游的 4 个位点。

### 2.3 环境因素对甲烷排放通量的影响

相关分析表明甲烷排放通量与气压、气温、水-气温差、TLI( $\Sigma$ )、水深之间显著相关, 其中气压、水深与甲烷排放通量之间显著负相关, TLI( $\Sigma$ )、气温、水气温差与甲烷排放通量之间显著正相关。

## 3 讨论

### 3.1 三峡水库湖北段甲烷排放通量及其时空特征

2010 年 11 月至 2011 年 10 月, 三峡水库湖北段水-气界面甲烷排放通量为  $0.016\text{--}1.196 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 与国内外温带如加拿大  $[0.37\text{--}1.75 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$  [2]、美国  $[0.28\text{--}$

$0.88 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$  [15] 和中国其他地区水库  $[0.05\text{--}0.30 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$  [6, 7] 的甲烷排放通量相当, 低于热带如法属圭亚那  $[(3.21 \pm 0.42) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$  [15]、巴拿马  $[2.46\text{--}54.58 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$  [15]、巴西  $[0.71\text{--}4.23 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$  [16] 和寒带如芬兰 [15]  $[0.46\text{--}10.42 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$  等地水库的甲烷排放。同时, 三峡水库与淹没区域为泥炭地和森林的水库相比甲烷排放通量低 [10]。

库区湖北段的甲烷排放通量在夏季最高, 这种时间特征与温带 [6, 17] 和寒带 [18] 的湖泊和水库类似。支流香溪河回水末端的甲烷排放通量高于长江干流和支流中下游区域。三峡水库水位变动范围较大, 总体而言回水末端的水深较其他区域小, Tremblay, *et al.* [2] 也发现在水深较小的水库滨岸带甲烷排放通量较深水区域明显增大。

### 3.2 环境因素对甲烷排放通量时空特征的影响

甲烷主要在厌氧沉积物中产生, 也可在沉积物上层的厌氧水体中生成。研究表明当沉积物和水体中有机质含量较高时, 产甲烷菌的数量增多, 甲烷的生成量增加排放通量增大 [15, 19], 如图 4a 所示, 本研究中甲烷排放通量与表层沉积物 TOC 含量的升高而增大, 但与水体 DOC 含量之间没有相关关系, 类似现象在 Xing, *et al.* [20]、陈永根等 [21] 的研究中也有发现。沉积物的氧化还原环境是产甲烷菌生存的基础, 当沉积物氧化还原电位为负值处于还原环境时, 产甲烷菌的活性维持在较高水平, 甲烷的生成量增加排放通量增大 [19, 22], 在本研究中甲烷排放通量随表层沉积物氧化还原电位的升高而减小 (图 4b)。从三峡水库的运行状况来看, 冬季水库高水位运行, 水流减缓, 有利于水体中悬浮颗粒有机碳沉降, 使得春季表层沉积物 TOC 含量较高  $[(19.4 \pm 4.6) \text{ gC/kg}]$ , 而夏季泥温升高, 沉积物中有机碳被大量分解消耗, 到了秋季表层沉积物 TOC 含量明显降低  $[(13.0 \pm 2.2) \text{ gC/kg}]$ ; 且春季表层沉积物属还原性  $[(-22 \pm 3) \text{ mV}]$ , 秋季属弱还原性  $[(22 \pm 19) \text{ mV}]$  [23], 结合甲烷排放通量的季节变化, 可见春季沉积物 TOC 含量、氧化还原环境更有利于甲烷的生成, 是甲烷排放具有季节变化的影响因素。

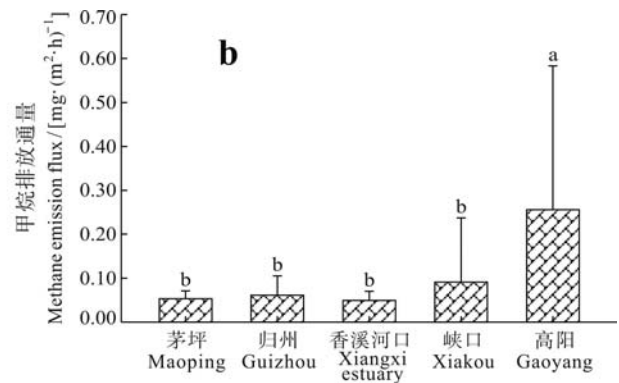
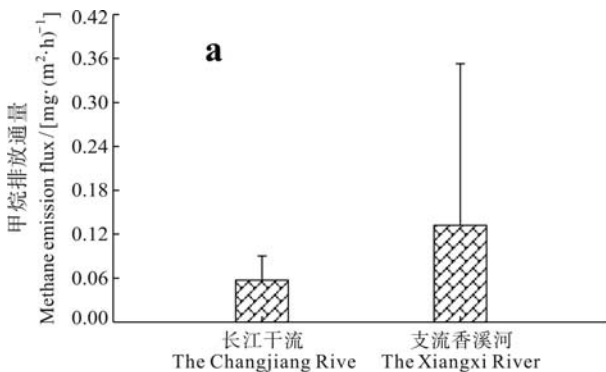


图 3 三峡水库湖北段甲烷排放通量的空间特征

Fig. 3 Spatial patterns of methane emission flux in Hubei part of TGR

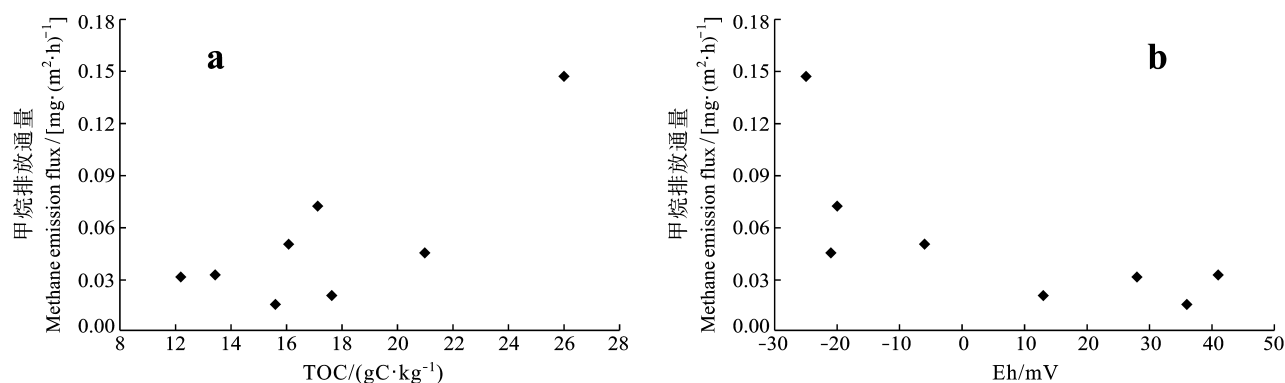


图 4 甲烷排放通量与表层沉积物 TOC 含量(a)和氧化还原电位(Eh)(b)的关系

Fig. 4 The relationship between methane emission flux with TOC(a) and Eh(b) in the sediment

水体营养水平的升高也有利于甲烷的生成, 主要由于水体向沉积物输送的营养元素和有机碳含量增多, 产甲烷菌得到更多的底物和营养。Casper<sup>[24]</sup>和 Adams<sup>[25]</sup>均发现湖泊和水库沉积物中甲烷的生成量随湖泊营养水平的升高而增加。在本研究中综合营养状态指数 TLI( $\Sigma$ )与甲烷排放通量之间的关系如图 5 所示, 相关分析表明二者之间显著正相关。而库区在夏季水体营养状态多处于轻度 and 中度富营养水平, 甲烷排放通量较高, 说明水体的营养水平是影响甲烷排放具有季节变化的环境因素。

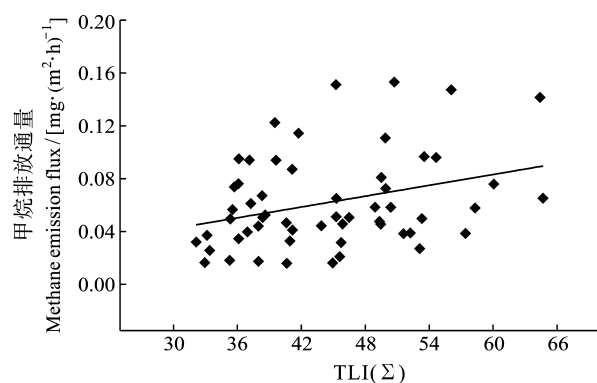


图 5 水体营养水平与甲烷排放通量之间的关系

Fig. 5 Relationship between trophic status and methane emission flux

气温、气压、水温和水气温差作用于水-气界面甲烷的传输过程。在大气环境中, 气温影响气压, 气压降低时大气中甲烷分压减小, 利于其从水体向大气排放<sup>[26]</sup>, 同时气压降低水体的蒸发速率加快, 气体交换速率增大; 气温同时影响水温, 而水温影响甲烷在水中的溶解度, 水温升高甲烷的溶解度减小<sup>[27]</sup>; 水气温差也影响水体的蒸发速率<sup>[7]</sup>。为排除分析中水深对甲烷排放通量的影响, 选取库区水深较为接近的茅坪、归州、香溪河口三个位点, One-Way ANOVA 分析表明, 甲烷排放通量在夏季显著高于其他季节; 与气压、气温、水气温差之间的关系如图 6 所示, 相关分析表甲烷排放通量与气压之间显著负相关,

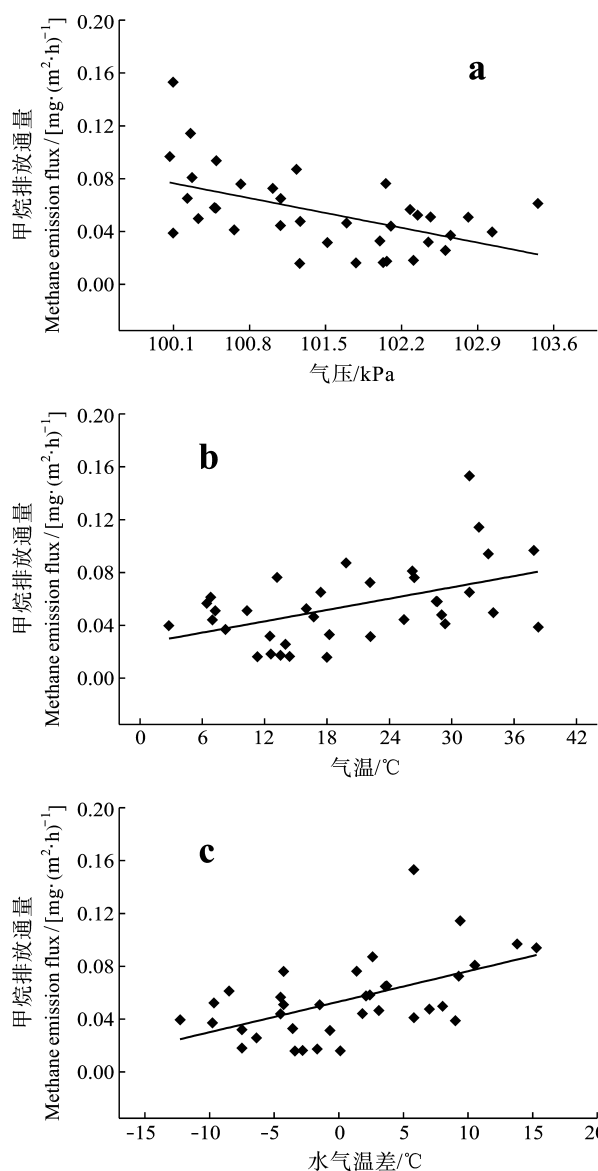


图 6 气压、气温、水气温差与甲烷排放通量之间的关系

Fig. 6 Relationship between air pressure, water temperature, temperature difference of air-water interface and methane emission flux

与气温、水气温差之间显著正相关, 但与水温之间没有相关关系, 类似现象在 Casper, *et al.* [28] 的研究中也有发现。综上所述, 温度也是影响甲烷排放具有季节变化的环境因素。

甲烷在水体中的传输途径主要有扩散、冒泡和维管植物通气组织的传导 [29]。由于其在水体中的溶解度较小, 浅水区域产生的甲烷主要以冒泡形式传输, 水深较大时 (一般大于 20—30 m), 在静水压力的作用下, 水体底部产生的甲烷主要以扩散形式传输 [30], 而冒泡排放的甲烷通量高于扩散排放 [2]。同时水深也影响甲烷在向上传输过程中的氧化程度 [31, 32]。在本研究中三峡水库属于河道型水库, 大部分河道两岸地势陡峭, 同时库区水位变动幅度较大, 大型水生植物难以形成优势。在空间上, 高位点水深较小, 周年水深 < 20 m, 且夏季水深 4 m, 其他 4 个位点周年水深 > 20 m。水深与甲烷排放通量之间显著负相关。建立水深与甲烷排放通量之间的回归关系, 时间选取温度接近的 5—11 月, 拟合得到的衰减函数方程:  $F_{CH_4} = 0.2504 \times e^{(-Depth/9.1423)} + 1.0963 \times e^{(-Depth/0.1009)} + 0.0563 (R^2 = 0.5540)$ 。如图 7 所示, 当水深 ≤ 4 m 时, 甲烷排放通量明显增大。上述可知高位点的甲烷排放通量高于其他 4 个位点, 可见水深是影响甲烷排放通量空间差异的主要原因。

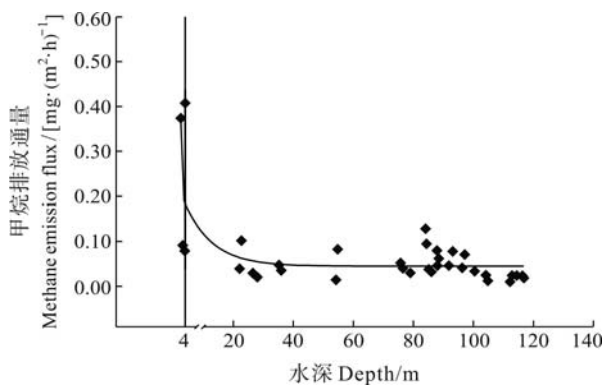


图 7 水深与甲烷排放通量的回归分析

Fig. 7 Regression analysis between water depth and methane emission flux

风速影响水-气界面甲烷的交换速率。Cole, *et al.* [33] 研究认为这一影响的临界值为 3 m/s, 当风速小于 3 m/s 时, 对水-气界面气体的交换排放通量几乎没有影响, 风速在 3 m/s 以上才会产生作用。在本研究中所有样点周年测得的 60 次风速值中大于 3 m/s 临界值的次数仅有 9 次, 可见三峡水库湖北段大部分区域大部分时期由于两岸高山的阻挡, 风场对甲烷排放通量的影响较小。

#### 致谢:

感谢艾鹰同学在数据分析和文稿修改过程中给予的帮助。

#### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 2007, 212—542
- [2] Tremblay A, Therrien J, Hamlin B, *et al.* GHG emissions from boreal reservoirs and natural aquatic ecosystems [A]. In: Tremblay A, Varfalvy L (Eds.), Greenhouse Gas Emissions-Fluxes and Processes: Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments [C]. Verlag Berlin Heidelberg, Germany: Springer. 2005, 209—232
- [3] Fearnside P M. Hydroelectric dams in the Brazilian Amazon as sources of 'greenhouse' gases [J]. *Environmental Conservation*, 1995, **22**(1): 7—19
- [4] Downing J A, Prairie Y T, Cole J J, *et al.* The global abundance and size distribution of lakes, ponds and impoundments [J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, **51**(5): 2388—2397
- [5] Varis O, Kumm M, Härkönen S, *et al.* Impacts of Large Dams: A Global Assessment [M]. New York, USA: Springer. 2012, 80
- [6] Yang M, Li H L, Lei T, *et al.* Spatial-temporal characteristics of methane emission flux and its influence factors at Miyun Reservoir in Beijing [J]. *Wetland Science*, 2011, **9**(2): 191—197 [杨萌, 李红丽, 雷霆, 等. 北京密云水库甲烷排放通量时空特征及其影响因素研究. *湿地科学*, 2011, **9**(2): 191—197]
- [7] Zheng H, Zhao X, Zhao T, *et al.* Spatial-temporal variations of methane emissions from the Ertan hydroelectric reservoir in southwest China [J]. *Hydrology Processing*, 2011, **25**: 1391—1396
- [8] Yang Y, Liu C Q, Wu P, *et al.* Study on methane emission of cascade reservoirs on Maotiaohe river basin in summer [J]. *Guizhou Water Power*, 2009, **23**: 12—16 [杨妍, 刘丛强, 吴攀, 等. 猫跳河流域梯级开发水库夏季甲烷排放研究. *贵州水力发电*, 2009, **23**: 12—16]
- [9] Zhao D Z, Tan D B, Wang Z H, *et al.* Measurement and analysis of greenhouse gas fluxes from Shuibuya reservoir in Qingjiang river basin [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2011, **28**: 197—204 [赵登忠, 谭德宝, 汪朝辉, 等. 清江流域水布垭水库温室气体交换通量监测与分析研究. *长江科学院院报*, 2011, **28**: 197—204]
- [10] Chen H, Yuan X, Chen Z, *et al.* Methane emissions from the surface of the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, **116**: D21306
- [11] Zhao Y, Zeng Y, Wu B F, *et al.* Observation on greenhouse gas emission from Xiangxi river in Three Gorges region [J]. *Advances in Water Science*, 2011, **22**(4): 546—553 [赵炎, 曾源, 吴炳方, 等. 三峡水库香溪河支流水域温室气体排放通量观测. *水科学进展*, 2011, **22**(4): 546—553]

- [12] Lambert M, Fréchet J L. Analytical techniques for measuring fluxes of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> from hydroelectric reservoirs and natural water bodies [A]. In: Tremblay A, Varfalvy L (Eds.), Greenhouse Gas Emissions-Fluxes and Processes: Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments [C]. Verlag Berlin Heidelberg, Germany: Spring. 2005, 38—60
- [13] State Environmental Protection Administration. Monitoring and Analysis Method of Water and Wastewater (4th edition) [M]. Beijing: China Environmental Science Press. 2002, 243—670 [国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 (第四版). 北京: 中国环境科学出版社. 2002, 243—670]
- [14] Wang M C, Liu X Q, Zhang J H. Lakes eutrophication evaluation method and grading standard [J]. *Environmental Monitoring of China*, 2002, **18**(5): 47—49 [王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准. 中国环境监测, 2002, **18**(5): 47—49]
- [15] Louis V L S, Kelly C A, Duchemin E, *et al.* Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: A global estimate [J]. *Bioscience*, 2000, **50**(9): 766—775
- [16] dos Santos M A, Matvienko B, Rosa L P, *et al.* Gross greenhouse gas emissions from Brazilian hydro reservoirs [A]. In: Tremblay A, Varfalvy L (Eds.), Greenhouse Gas Emissions-Fluxes and Processes: Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments [C]. Verlag Berlin Heidelberg, Germany: Spring. 2005, 267—291
- [17] Smith L K, Lewis W M. Seasonality of methane emissions from five lakes and associated wetlands of the Colorado Rockies [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1992, **6**(4): 323—338
- [18] Huttunen J T, Alm J, Liikanen A, *et al.* Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide in boreal lakes and potential anthropogenic effects on the aquatic greenhouse gas emissions [J]. *Chemosphere*, 2003, **52**: 609—621
- [19] Meng W Q, Wu Z L, Wang Z L. Control factors and critical conditions between carbon sinking and sourcing of wetland ecosystem [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, **20**(8-9): 1359—1366 [孟伟庆, 吴旋蕾, 王中良. 湿地生态系统碳汇与碳源过程的控制因子和临界条件. 生态环境学报, 2011, **20**(8—9): 1359—1366]
- [20] Xing Y P, Xie P, Yang H, *et al.* Methane and carbon dioxide fluxes from a shallow hypereutrophic subtropical lake in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**: 5532—5540
- [21] Chen Y G, Bai X H, Li X H, *et al.* A primary study of the methane flux on the water-air interface of eight lakes in winter, China [J]. *Lake Science*, 2007, **19**(1): 11—17 [陈永根, 白晓华, 李香华, 等. 中国 8 大湖泊冬季水-气界面甲烷通量初步研究. 湖泊科学, 2007, **19**(1): 11—17]
- [22] Wang W Q, Zeng C S, Tong C. Methane production and oxidation capacities of soil from the reed marsh of the Minjiang river estuary [J]. *Wetland Science*, 2008, **6**(1): 60—67 [王维奇, 曾从盛, 仝川. 闽江口芦苇湿地土壤甲烷产生与氧化能力研究. 湿地科学, 2008, **6**(1): 60—67]
- [23] Hou B R, Guo G Y, Ma S D, *et al.* The Theory and Application of Marine Corrosive Environment [M]. Beijing: Science Press. 1999, 85 [侯保荣, 郭公玉, 马士德, 等. 海洋腐蚀环境理论及其应用. 北京: 科学出版社. 1999, 85]
- [24] Casper P. Methane production in lakes of different nutrient trophic states [J]. *Archiv für Hydrobiologie*, 1992, **37**: 149—154
- [25] Adams D D. Diffuse flux of greenhouse gases-methane and carbon dioxide-at the sediment-water interface of some lakes and reservoirs of the world [A]. In: Tremblay A, Varfalvy L (Eds.), Greenhouse Gas Emissions-Fluxes and Processes: Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments [C]. Verlag Berlin Heidelberg, Germany: Spring. 2005, 129—153
- [26] Tokida T, Miyazaki T, Mizoguchi M, *et al.* Falling atmospheric pressure as a trigger for methane ebullition from peatland [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, **21**: GB2003
- [27] Xing Y P. Studies on Carbon Exchange and Mechanism at Air-Water Interface in Freshwater Lakes along the Middle and Lower Reaches of Yangtze River [D]. Thesis for Master of Science. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan. 2007 [邢阳平. 长江中下游地区淡水湖泊水-气界面碳交换及机制研究. 硕士学位论文, 中国科学院水生生物研究所, 武汉. 2007]
- [28] 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
- [29] Chanton J P. The effect of gas transport on the isotope signature of methane in wetlands [J]. *Organic Geochemistry*, 2005, **36**: 753—768
- [30] Bastviken D, Cole J, Pace M, *et al.* Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, **18**: GB4009
- [31] Abe D S, Adams D D, Galli C V S, *et al.* Sediment greenhouse gases (methane and carbon dioxide) in the Lobo-Broa Reservoir [J]. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 2005, **10**(4): 201—209
- [32] Lima I B T. Biogeochemical distinction of methane releases from two Amazon hydroreservoirs [J]. *Chemosphere*, 2005, **59**: 1697—1702
- [33] Cole J J, Caraco N F, Kling G W, *et al.* Carbon-dioxide supersaturation in the surface waters of lakes [J]. *Science*, 1994, **265**: 1568—1570