

# 香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析

王亮<sup>1</sup>, 肖尚斌<sup>1\*</sup>, 刘德富<sup>1\*</sup>, 陈文重<sup>1</sup>, 王雨春<sup>2</sup>, 陈小燕<sup>1</sup>, 段玉杰<sup>1</sup>

(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:** 采用 LGR-密闭式动态通量箱法对三峡水库香溪河库湾夏季水-气界面温室气体( $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$ ) 通量进行了 24 h 连续观测. 结果表明, 观测点处水-气界面  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  的释放通量具有明显的日变化特征, 且二者的日变化过程呈较强的负相关性. 监测期间,  $\text{CO}_2$  的吸收和释放过程明显,  $\text{CH}_4$  全天均为释放状态, 其全天平均通量分别为  $0.336 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  和  $0.088 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ . 分析发现, 水-气界面碳通量与温度、pH、叶绿素 a、气压、辐照强度的相关性明显, 而 Eh 对碳通量的影响并不显著. 其中,  $\text{CO}_2$  与各环境因子的相关性较  $\text{CH}_4$  更为密切.

**关键词:** 水-气界面; 温室气体通量; 影响因素; 三峡水库; 香溪河库湾

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)05-1471-05

## Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors

WANG Liang<sup>1</sup>, XIAO Shang-bin<sup>1</sup>, LIU De-fu<sup>1</sup>, CHEN Wen-zhong<sup>1</sup>, WANG Yu-chun<sup>2</sup>, CHEN Xiao-yan<sup>1</sup>, DUAN Yu-jie<sup>1</sup>

(1. College of Hydraulic and Environment Engineering, Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Department of Water Environment, Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** With the LGR-Airtight Floating Dynamic Flux Chamber method, a 24-hour continuous monitoring was carried out to understand the greenhouse gases fluxes across the water-air interface of the Xiangxi River Bay, the Three-Gorges Reservoir in summertime. It indicated that the fluxes of  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  across the water-air interface appeared an obvious diurnal variation, and they showed a good negative correlation. The absorption and emission process of  $\text{CO}_2$  showed strong diurnal alteration during the experimental period, whereas  $\text{CH}_4$  was emitted all day. The average fluxes of  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  were  $0.336 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  and  $0.088 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , respectively. The fluxes of carbon had good correlation with temperature, pH, chlorophyll a, air-pressure, light intensity, but no obvious correlation with Eh. Furthermore, the correlation of  $\text{CO}_2$  with environment factors was better than that of  $\text{CH}_4$ .

**Key words:** water-air interface; greenhouse gases flux; influencing factors; Three-Gorges Reservoir; Xiangxi River Bay

长期以来,水电一直被认为是清洁、无碳排放能源的典范而得到大规模推广<sup>[1]</sup>,到目前为止,全球所有水库的表面积约为  $1.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ <sup>[2]</sup>,与全球天然湖泊表面积大致相当<sup>[3]</sup>.自有报道称<sup>[4-6]</sup>水库是温室气体可能的净排放源之后,水库温室气体排放受到越来越多的关注.近年来也有研究证实,所有的水库均向大气中释放  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$ <sup>[2]</sup>.因此,水库温室气体排放的全球影响成为了一个不可避免的科学问题.目前,国外关于水库在温室气体排放中的作用和对大气中温室气体浓度升高的贡献率研究较多<sup>[7-10]</sup>,但大都集中在热带雨林、南美等地.2000年以后,我国逐步开展了温室气体监测方法和碳通量的研究,但总体上研究相对滞后.特别是针对水库中温室气体产生与释放的研究极少.因此,在我国开展水库水-气界面温室气体通量研究,对于了解水库温室气体通量变化规律及影响因素,综合评价水库温室气体排放的全球影响具有巨大的理论价值和现实

意义.本研究运用 LGR-密闭式动态通量箱法对三峡水库香溪河库湾水-气界面温室气体通量进行了 24 h 连续监测,初步探讨了水-气温室气体通量的日变化过程及影响因素,以期为正确地认识三峡水库的温室气体排放通量提供初步依据,并为进一步的研究提供参考.

### 1 研究区概况

香溪河位于鄂西,距三峡大坝 20 多 km,是三峡水库湖北库区的最大支流,也是三峡坝首的第一大支流,流域面积为  $3\,099 \text{ km}^2$ .受三峡水库蓄水的影

收稿日期: 2011-07-16; 修订日期: 2011-10-11  
基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB955904); 国家自然科学基金项目(51179205); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07104-001, 2008ZX07104-004); 湖北省环境保护专项(2008hb08)

作者简介: 王亮(1986~),男,硕士研究生,主要研究方向为生态水工学, E-mail: wlsj2008@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: shangbinx@163.com; dfliu@189.cn

响,香溪河河口至上游白沙河之间的河段被回水淹没,形成典型的峡谷型水库水域。观测点位于兴山县峡口镇,处于香溪河中游,距离香溪河河口约 18 km (图 1)。水深约为 20 m,受香溪河上游来水及长江干流倒灌水体的影响较小,能够较好的代表香溪河形成库湾后的环境状态。监测期间,水库水位为 150 m 左右。

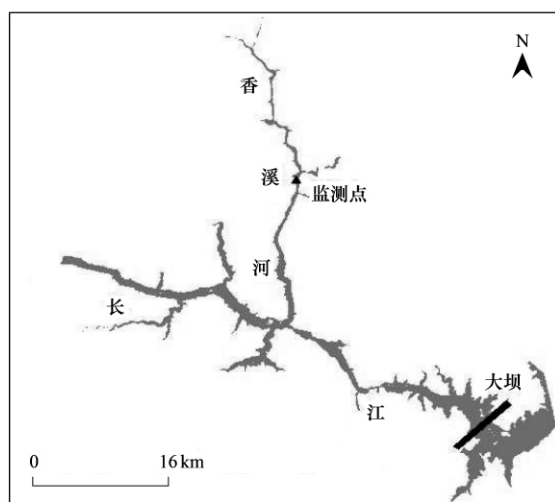


图 1 监测点分布示意

Fig. 1 Distribution of the sampling site

## 2 材料与方法

### 2.1 通量监测

观测时间为 2010 年 8 月 23 日 12:30 ~ 8 月 24 日 12:00,每半小时观测一次温室气体通量(下午 16:30 ~ 19:00 供电不稳定,观测频次略有变化)。天气为阴天,风浪较小。 $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  通量采用 LGR-密闭式动态通量箱法测定。分析仪器为 LGR-100 型快速温室气体( $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ )分析仪(主要技术指标重复性:  $\text{CH}_4$   $1 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{CO}_2$   $0.2 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$   $100 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 精度: 小于读数的 1%; 测量范围:  $\text{CH}_4$   $0.1 \sim 20 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{CO}_2$   $200 \sim 4000 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$   $7000 \sim 70000 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ )。气样采集设备为通量箱,箱体(直径 30 cm,高 50 cm)采用不锈钢材质,箱顶设有微型风扇以便于使箱内的空气混合均匀,为了不使箱内温度在采样过程中升高过快,箱外设有保温层,在保温层外贴有反光膜,箱体顶部设有两根硅导管与仪器相连(图 2)。采样前,将箱口朝上大约 5 min,以便箱内充满空气,采样时将采样箱置于水面,使箱口浸入水中,保证箱内空气与外界隔绝。在通量监测同时,采用气压计(DYM3-01)测定监测点的气温、气压,采用照度计(TES-1330A)测定瞬时辐

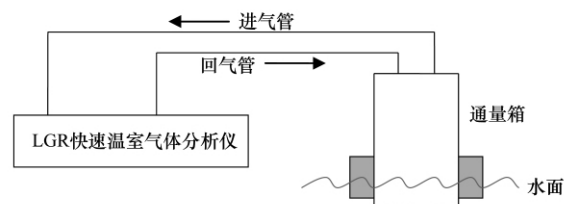


图 2 LGR-密闭式动态通量箱连接示意

Fig. 2 Schematic plot of LGR-airtight dynamic floating chamber method

照强度,采用数字温度计(TP3001)测定表层水体的水温,采用 Orion 便携式多参数仪测定 pH、Eh 等,并采集表层水样带回实验室鉴定藻种,根据《水和废水监测分析方法》(第四版)测定叶绿素 a 浓度。

### 2.2 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 通量计算方法

温室气体的释放通量是指单位时间内单位面积上温室气体浓度的变化量,正值表示气体从水体向大气排放,负值表示水体吸收大气中该气体。温室气体分析仪现场实时观测箱内温室气体浓度随时间的变化,本研究用以下公式<sup>[11]</sup>计算扩散通量:

$$\text{Flux} = \frac{\text{slope} \times F_1 \times F_2 \times \text{volume}}{\text{surface} \times F_3}$$

式中, Flux 为水-气界面的气体通量 [ $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ ], slope 为箱内温室气体浓度随时间的变化率,  $F_1$  为  $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$  到  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的转化系数( $\text{CO}_2$  为  $1798.45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\text{CH}_4$  为  $655.47 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),  $F_2$  为秒到小时的转化系数(3600), volume 为静态箱漂浮在水面时箱内气体的体积( $\text{m}^3$ ), surface 为通量箱箱底的面积( $\text{m}^2$ ),  $F_3$  为  $\mu\text{g}$  到  $\text{mg}$  的转化系数(1000)。

## 3 结果与分析

观测点处水-气界面的  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  释放通量具有明显的交替变化规律(图 3)。昼间  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  释放通量的变化范围较大,分别为  $-29.475 \sim 22.764 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$  和  $0.041 \sim 0.219 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 。24 h 内  $\text{CO}_2$  的吸收和释放过程明显,从下午 13:30 ~ 19:30、夜间 22:00 ~ 02:30 为吸收过程,其余时间为释放过程。 $\text{CH}_4$  的通量全天均为正值,表明水体向大气释放  $\text{CH}_4$ 。总体上,  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  的释放强度较小,其全天平均释放通量分别为  $0.336 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$  和  $0.088 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 。 $\text{CO}_2$  通量昼、夜差异较大,昼间平均释放通量为  $0.687 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ ,夜间为  $-0.133 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ ,而  $\text{CH}_4$  昼、夜差异不明显。

$\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  通量日变化过程呈较强的负相关, 相关系数为  $-0.773$ , 且  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  释放强度极值的出现时间较为接近,  $\text{CO}_2$  释放通量在上午 09:00 左右达到全天最大, 下午 15:30 左右最小;  $\text{CH}_4$  释放通量在下午 15:00 左右达到最大, 上午 11:00 左右最小。

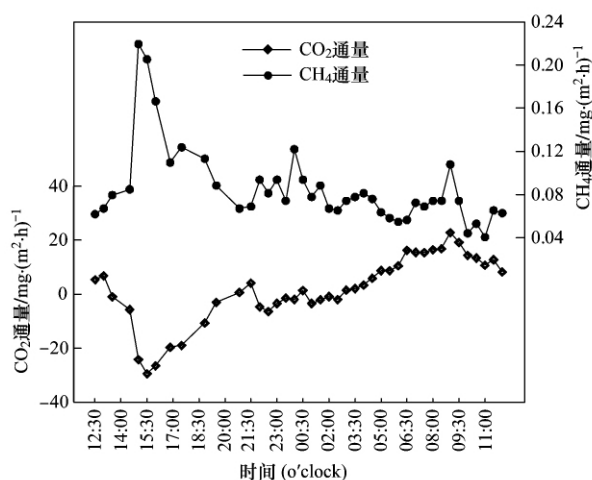


图3  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  的通量日变化

Fig. 3 Diurnal variation of  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  flux

## 4 讨论

水库温室气体排放通量由气体产生和传输过程共同决定, 对于  $\text{CH}_4$  气体来说, 氧化过程也是一个重要的决定因素<sup>[12]</sup>. 而这些过程受诸多因素的影响, 比如水库年龄、气候、下垫面条件、pH、Eh、风速、浮游生物等。

### 4.1 水温和气温与 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 通量的关系

气温不仅直接影响  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  的排放, 而且还可通过对水温的调节, 间接对  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  的排放产生影响<sup>[13]</sup>. 受太阳辐射等因素的影响, 气温变化较大, 昼夜温差达到  $9.5^\circ\text{C}$ , 由于水体比热较大, 水温 24 h 内的变化较小, 但水温受气温影响比较明显 (图 4). 气温与  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  通量的相关系数分别为  $-0.319$  和  $0.315$  (表 1), 没有明显的相关性, 表明气温变化对碳通量的影响较小. 但水温与  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  通量的相关性比较强, 相关系数分别为  $-0.744$  和  $0.629$ . 可见, 水温是影响碳通量的一个重要因素. 这可能是因为水温升高, 增强水生生物的活性, 同时, 水温升高是辐照强度增强的结果, 因此, 水温升高有利于水生生物的光合作用, 加强对  $\text{CO}_2$  的吸收. 此外, 温度对  $\text{CH}_4$  的浓度有重要影响<sup>[14]</sup>. 水温升高使得  $\text{O}_2$  和  $\text{CH}_4$  在水体中的溶解度减小<sup>[15]</sup>, 微生物活性增强, 进而导致  $\text{CH}_4$  气体的释放增加<sup>[16]</sup>.

### 4.2 pH 与 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 通量的关系

pH 值与水体有机质的分解、微生物的活动和水生生物的代谢等密切相关<sup>[12, 17, 18]</sup>, 是影响  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  产生和排放过程的重要因素之一<sup>[19]</sup>. 另外, 水库中 pH 值的变化影响到水体中各类物质的迁移和转化过程<sup>[16]</sup>. 观测时间段内, 水体呈弱碱性, pH 值平均为 8.5, 并随时间变化 (图 4). 水-气界面  $\text{CO}_2$  通量与 pH 呈强的负相关, 相关系数为  $-0.873$  (表 1), 这主要是因为当 pH 值较高时, 水体中游离  $\text{CO}_2$  就会转变为碳酸盐, 水体中  $\text{CO}_2$  分压降低, 导致水中溶解的  $\text{CO}_2$  处于不饱和状态, 促使大气中  $\text{CO}_2$  进入到水体中<sup>[12]</sup>.  $\text{CH}_4$  释放通量与 pH 值的相关性相对较弱, 相关系数为  $0.581$  (表 1).

### 4.3 叶绿素 a 与 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 通量的关系

叶绿素 a 含量是浮游植物数量的重要指标, 它直接反应水库的初级生产能力<sup>[20]</sup>. 观测时间段内, 叶绿素 a 变化明显, 总体上呈上升趋势 (图 4), 与  $\text{CO}_2$  通量呈正相关关系, 相关系数为  $0.623$  (表 1).  $\text{CH}_4$  通量与叶绿素 a 相关性较弱, 相关系数为  $-0.485$  (表 1). 经藻种分析鉴定, 本次观测中优势藻种为蓝藻. 由于浮游蓝藻往往有伪空泡, 具有漂浮功能<sup>[21]</sup>, 有利于藻类在表层聚集和生长, 增加光合作用和呼吸作用强

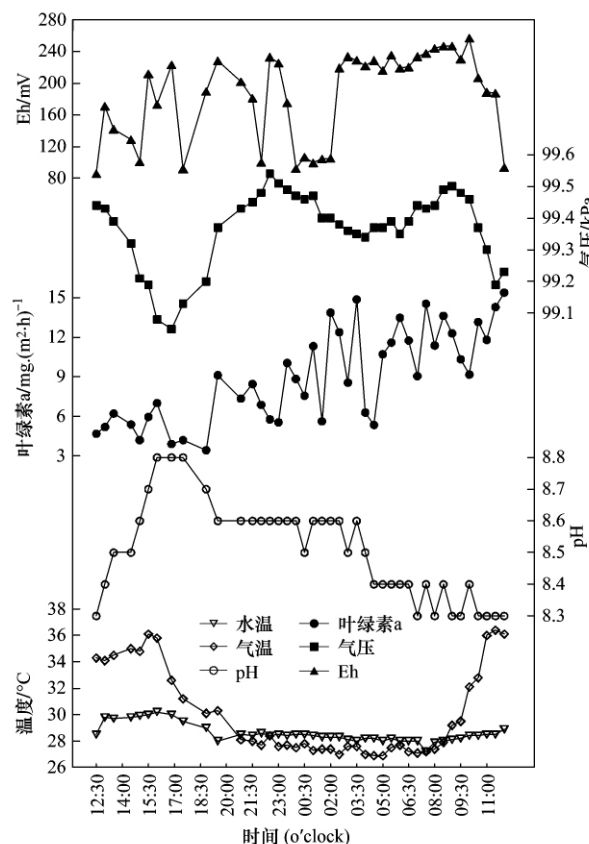


图4 各环境因子日变化

Fig. 4 Diurnal variation of influencing factors

表 1 香溪河库湾水-气界面  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  通量与各环境因子间的相关系数<sup>1)</sup>Table 1 Correlation coefficient of influencing factors with the flux of  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  across the water-air interface of the Xiangxi River Bay

项目	气温	水温	pH	叶绿素	气压	光照	Eh
$\text{CO}_2$	-0.319*	-0.744**	-0.873**	0.623**	0.587**	-0.555**	0.396**
$\text{CH}_4$	0.315*	0.629**	0.581**	-0.485**	-0.480**	0.556**	-0.252

1) \* 表示 0.05 置信水平显著相关 (2-tailed); \*\* 表示 0.01 置信水平显著相关 (2-tailed)

度. 当太阳辐射较强时, 光合作用随着藻类的不断聚集而加强, 使  $\text{CO}_2$  通量不断减小; 同时, 光合作用释放出  $\text{O}_2$ , 可能促进  $\text{CH}_4$  的氧化, 导致  $\text{CH}_4$  通量也不断减小. 但由于监测期间天气为阴天, 太阳辐射较弱, 光合作用强度较小, 呼吸作用强度大于光合作用强度, 因此,  $\text{CO}_2$  通量随着叶绿素 a 的上升而上升, 但呼吸作用对  $\text{CH}_4$  产生及迁移的影响较小, 从而  $\text{CH}_4$  通量与叶绿素 a 相关性不明显.

#### 4.4 气压与 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 通量的关系

气压是影响气体在水体中溶解度的重要参数<sup>[22]</sup>. 在本次观测中, 气压比较稳定, 平均值为 99.37 kPa, 变化范围在 99.05 ~ 99.54 kPa 之间 (图 4). 对碳通量的影响较为明显, 与  $\text{CO}_2$  通量的相关系数为 0.587, 与  $\text{CH}_4$  通量的相关系数为 -0.480 (表 1). 这可能是因为空气中  $\text{CO}_2$  含量很少, 气压的变化对  $\text{CO}_2$  的溶解度影响较小, 但气压升高时, 会增加  $\text{O}_2$  在水体中的溶解度. 因为在有氧条件下, 好氧细菌的活动占优势, 分解水中的有机碳主要产生  $\text{CO}_2$ <sup>[23]</sup>, 而且  $\text{CH}_4$  在好氧条件下可以被甲烷氧化菌氧化成  $\text{CO}_2$ <sup>[12, 24]</sup>. 因此, 当气压升高时, 水体中溶解氧增加, 从而导致  $\text{CO}_2$  通量增大,  $\text{CH}_4$  通量减小.

#### 4.5 其他因素与 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 通量的关系

辐照强度和 Eh 与碳通量的关系见表 1. 辐照强度可以通过调节光合作用强度、气温、水温等来影响碳通量; Eh 值是氧化剂和还原剂的电位差, 是衡量环境氧化还原能力强弱的指标, 是有机质分解的制约因素, 直接关系到  $\text{CH}_4$  的产生及在迁移过程中的转化, 对  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  排放的影响显著<sup>[25~27]</sup>. 因此, 辐照强度、Eh 是碳通量的重要影响因素. 对三者进行相关性分析发现, 辐照强度与  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  通量关系明显, 相关系数分别为 -0.555 和 0.556, 但 Eh 值与  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  通量相关关系较弱, 这主要是因为监测期间, 风速和风向随机性较大, 对水体的扰动程度也具有随机性, 使表层水体氧的含量不断发生变化, 从而使 Eh 值具有随机性.

## 5 结论

对三峡水库香溪河库湾水-气界面  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$

通量的连续监测结果表明, 观测点处水-气界面  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  的释放通量具有明显的日变化特征, 二者的日变化过程呈明显的负相关性, 其释放强度极值的出现时间较为接近. 24 h 内  $\text{CO}_2$  的吸收和释放过程明显, 下午 13:30 ~ 19:30、夜间 22:00 ~ 02:30 为吸收过程, 其余时间为释放过程,  $\text{CH}_4$  全天均为释放状态.  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  通量均较小, 其全天平均释放通量分别为  $0.336 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  和  $0.088 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ . 通过影响因素分析发现, 夏季水-气界面碳通量与温度、pH、叶绿素 a、气压、辐照强度的相关性明显, 而 Eh 对碳通量的影响并不显著, 其中, 各环境因子与  $\text{CO}_2$  的相关性较  $\text{CH}_4$  更为密切. 但水-气界面碳通量是多种因素共同作用的结果, 目前还难于确定是哪个因素占主要地位, 需要进一步开展三峡水库的碳通量研究.

#### 参考文献:

- [1] Victor D G. Strategies for cutting carbon[J]. Nature, 1998, **395** (6705): 837-838.
- [2] Louis V L S, Kelly C A, Duchemin é, et al. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate[J]. BioScience, 2000, **50** (9): 766-775.
- [3] Gleick P H. Water in crisis: a guide to the world's fresh water resources[M]. Oxford: Oxford University Press, 1993.
- [4] Kelly C A, Rudd J W M, Louis V L S, et al. Turning attention to reservoir surfaces, a neglected area in greenhouse studies[J]. EOS Transactions, 1994, **75** (29): 332-332.
- [5] MacIntyre S, Wanninkhof R, Chanton J. Trace gas exchange across the air-water interface in freshwater and coastal marine environments[M]. Biogenic Trace Gases: Measuring Emissions from Soil and Water, 1995. 52-97.
- [6] Duchemin E, Lucotte M, Canuel R, et al. Production of the greenhouse gases  $\text{CH}_4$  and  $\text{CO}_2$  by hydroelectric reservoirs of the boreal region[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1995, **9** (4): 529-540.
- [7] Tuomola L, Niklasson T, Silva E C, et al. Fish mercury development in relation to abiotic characteristics and carbon sources in a six-year-old, Brazilian reservoir[J]. Science of the Total Environment, 2008, **390** (1): 177-187.
- [8] Thorp J H, Delong M D. The riverine productivity model: an heuristic view of carbon sources and organic processing in large river ecosystems[J]. Oikos, 1994, **70** (2): 305-308.

- [9] Tilman D, Hill J, Lehman C. Carbon-negative biofuels from low-input high-diversity grassland biomass [J]. *Science*, 2006, **314** (5805): 1598-1600.
- [10] Wyckoff A W, Roop J M. The embodiment of carbon in imports of manufactured products: implications for international agreements on greenhouse gas emissions [J]. *Energy Policy*, 1994, **22**(3): 187-194.
- [11] 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 [J]. *Environmental Science and Engineering, Greenhouse Gas Emissions-Fluxes and Processes*, 2005, 37-60, doi: 10.1007/978-3-540-26643-3\_3.
- [12] 赵小杰, 赵同谦, 郑华, 等. 水库温室气体排放及其影响因素[J]. *环境科学*, 2008, **29**(8): 2377-2384.
- [13] 王东启, 陈振楼, 王军, 等. 夏季长江口潮间带 CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 通量特征[J]. *地球化学*, 2007, **36**(1): 78-88.
- [14] Stadmark J, Leonardson L. Emissions of greenhouse gases from ponds constructed for nitrogen removal [J]. *Ecological Engineering*, 2005, **25**(5): 542-551.
- [15] 丁建平, 程静, 杨建明. 溶解性气体对开式循环凝汽器运行特性的影响[J]. *热力透平*, 2004, **33**(1): 41-45.
- [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[J]. *贵州水力发电*, 2009, **23**(3): 12-16.
- [17] Krumbein W E. Photolithotropic and chemoorganotrophic activity of bacteria and algae as related to beachrock formation and degradation (Gulf of Aqaba, Sinai) [J]. *Geomicrobiology Journal*, 1979, **1**(2): 139-203.
- [18] Dumestre J F, Vaquer A, Gosse P, *et al.* Bacterial ecology of a young equatorial hydroelectric reservoir (Petit Saut, French Guiana) [J]. *Hydrobiologia*, 1999, **400**: 75-83.
- [19] 陈永根, 李香华, 胡志新, 等. 中国八大湖泊冬季水-气界面 CO<sub>2</sub> 通量[J]. *生态环境*, 2006, **15**(4): 665-669.
- [20] Paasche E. On the relationship between primary production and standing stock of phytoplankton [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 1960, **26**(1): 33-48.
- [21] 张永生, 孔繁翔, 于洋, 等. 蓝藻伪空胞的特性及浮力调节机制[J]. *生态学报*, 2010, **30**(18): 5077-5090.
- [22] Dunnivant F M, Elzerman A W. Aqueous solubility and Henry's law constant data for PCB congeners for evaluation of quantitative structure-property relationships (QSPRs) [J]. *Chemosphere*, 1988, **17**(3): 525-541.
- [23] Rosa L P, dos Santos M A. Certainty & uncertainty in the science of greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs [M]. *WCD Thematic Review Environmental Issues II*, 2.
- [24] Rigler E, Zechmeister-Boltenstern S. Oxidation of ethylene and methane in forest soils-effect of CO<sub>2</sub> and mineral nitrogen [J]. *Geoderma*, 1999, **90**(1-2): 147-159.
- [25] Singh S N, Kulshreshtha K, Agnihotri S. Seasonal dynamics of methane emission from wetlands [J]. *Chemosphere-Global Change Science*, 2000, **2**(1): 39-46.
- [26] 刘泽雄, 朱瑞琴, 姚顺, 等. 闽江河口咸草湿地冬季甲烷和二氧化碳通量及影响因子分析[J]. *湿地科学与管理*, 2010, **6**(3): 46-49.
- [27] 宋长春, 阎百兴, 王跃思, 等. 三江平原沼泽湿地 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 通量及影响因子[J]. *科学通报*, 2003, **48**(23): 2473-2477.