

# 宜昌求索溪冬季温室气体通量昼夜变化特征

李书焱, 刘璇, 周末, 龙丽, 张军伟, 穆晓辉, 雷丹

(三峡大学水利与环境学院, 湖北宜昌 443002)

**摘要:** 为探索小型水域温室气体的排放规律, 采用温室气体快速分析仪-密闭式静态通量箱法对湖北宜昌市三峡大学求索溪冬季水-气界面温室气体通量( $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$ ) 进行了 24 h 连续观测。观测结果显示,  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  的变化呈正相关,  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  全天均处于释放状态;  $\text{CO}_2$  通量与气压、水温呈正相关, 与气温、pH 值、溶解氧、叶绿素 a 呈负相关;  $\text{CH}_4$  仅与气压呈正相关而与其他环境因子均呈现负相关;  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  在 10:00 和 21:00 左右同时接近全天的平均值, 该时段可作为单次采样时间参考。

**关键词:** 温室气体通量; 水-气界面;  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$ ; 求索溪; 宜昌市

中图法分类号: X52

文献标志码: A

DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2016.13.006

水生系统在一定程度上是温室气体的来源<sup>[1]</sup>, 水生系统和大气间的气体交换对全球碳循环以及温室气体排放的预测有着重要的影响<sup>[2]</sup>。内陆水域总处于  $\text{CO}_2$  过饱和态, 最新估算的碳通量是  $201 \times 10^{15} \text{ g/a}$ , 因此, 内陆水域也是地球重要的甲烷来源, 它每年至少释放出  $103 \times 10^{12} \text{ g}$  甲烷, 但这些通量的估算具有相当大的不确定性<sup>[3]</sup>。因此, 水-气界面温室气体通量的研究仍然需要进行大量的实验<sup>[4]</sup>。目前国内外温室气体排放研究主要集中于湖泊、水库<sup>[5-7]</sup>, 对面积较小、自然环境特征迥异的池塘、小型湿地的研究依然较少, 这类淡水生态系统在全球碳循环中的重要性可能被低估<sup>[8-9]</sup>。本文以湖北宜昌三峡大学求索溪为研究对象, 通过 24 h 的连续通量监测, 分析温室气体通量变化及环境因子的影响, 以期弄清小型池塘温室气体通量变化特征。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

宜昌市冬季气温明显偏低, 持续时间长; 雪日多, 强雨雪天气集中, 雨雪量显著偏多。冬季冷空气活动频繁, 平均气温  $2.9^\circ\text{C} \sim 5.5^\circ\text{C}$ 。求索溪 ( $30^\circ43'32''\text{N}$ ,

$111^\circ18'27''\text{E}$ ) 位于湖北省宜昌市三峡大学校园内, 本研究选取求索溪上游由水泥坝隔断的一小型河段(水深大约 0.8 m, 面积约  $54 \text{ m}^2$ ) 对其进行观测。受多种来源的污染物影响, 实验段河道内水质情况较差, 水体富营养化严重, 藻类大量繁殖, 水体呈淡黑绿色, 并散发出臭味, 该河段由于经常清淤, 底泥厚度小于 2 cm。

### 1.2 通量观测

2015 年 1 月 14 日 17:00 到次日 17:00, 在距离岸边大约 2 m、水深大约 0.8 m 的位置对实验段河流进行了 24 h 的连续通量监测, 期间, 每隔半个小时进行一次水样采集和温室气体观测, 每次观测持续 15 min。观测时间段为阴天、无风。温室气体的观测采用温室气体快速分析仪-密闭通量箱法, 实验仪器为 DLT-100 型温室气体快速分析仪(美国, LGR)。该仪器能以 1 Hz 频率实时、连续地测量箱内  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  浓度, 以前已有研究人员对其有详细的描述, 并广泛使用<sup>[6, 10-11]</sup>。通量箱箱体采用不锈钢材质(高 0.45 m、直径 0.35 m), 箱体顶部采用两根硅胶管与仪器相连接, 为防止采样过程中箱体温度上升过快, 箱体四周设有保温层, 外部包裹有反光膜。采样前将通量箱朝上 5 min, 以使箱内气体浓度与周围环境背景值一致, 然

收稿日期: 2016-02-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41273110, 510479163)

作者简介: 李书焱, 男, 主要从事环境科学方面的研究。E-mail: 1328634272@qq.com

通讯作者: 雷丹, 女, 讲师, 博士生, 主要从事环境科学方面的研究。E-mail: leidan@ctgu.edu.cn

后将通量箱轻放至水面使其内部形成密闭空间,利用温室气体分析仪实时监测箱内温室气体浓度变化。

水温、pH、叶绿素 a (Chl - a)、溶解氧( DO) 均采用哈希多参数水质检测仪( DataSonde5 ,美国) 进行;检测风速、气温、气压采用便携式气象站( YGH - QXY ,中国) 测量。同时,使用医用塑料注射器抽取 200 mL 水样,注入预先清洗干净的真空镀铝内膜采样袋内,并注入 3 mL 饱和 HgCl<sub>2</sub> 溶液杀死水生、浮游生物用以短时间保存。水样带回实验室后先用注射器注入 400 mL 高纯氮( 99.99% ) ,然后用 40 W 功率超声波仪振荡 10 min ,使水中 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 充分释放,静置 24 h 使待测气体两相平衡,然后抽取顶空气体,用 FL GC9790 II 型气象色谱仪( 中国 福立) 测定气体浓度。CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的检测器为离子化火焰检测器( FID) [12]。

1.3 计算方法

温室气体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,正值表示水体向大气中排放温室气体,负值表示水体吸收大气的温室气体。本文中温室气体通量采用以下公式进行计算[13]:

$$Flux = ( slope \times F_1 \times F_2 \times volume ) / ( surface \times F_3 )$$

式中,  $Flux$  为水 - 气界面的气体通量,  $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;  $slope$  为箱内气体随时间的变化率;  $volume$  为通量箱体积,  $\text{m}^3$ ;  $surface$  为通量箱底面积,  $\text{m}^2$ ;  $F_1$  为转换系数(  $\text{CH}_4$  为  $655.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\text{CO}_2$  为  $1\,789.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$  );  $F_2$  为秒到小时的转换系数( 3 600 ),  $F_3$  为  $\mu\text{g}$  到  $\text{mg}$  的转换系数( 1 000 )。

2 结果与分析

2.1 温室气体通量变化

CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 通量随时间的变化如图 1 所示。由图 1 可见, CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 通量全天均为正值( 图 1( a) ), 呈释放状态。CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的相关性明显, 相关系数 0.819( 表 3 ), 变化趋势一致。表 1 为 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 通量昼夜变异性统计, CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 通量变化范围较大, 分别为  $1.57 \sim 2.50 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  和  $44.18 \sim 107.13 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 平均值分别为  $1.98 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  和  $77.82 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

本研究将 18:00 ~ 6:00 时间段划分为晚上, 6:00 ~ 18:00 划分为白天。分析结果表明, CH<sub>4</sub> 昼间平均释放通量为  $1.92 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 夜间为  $2.05 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ; CO<sub>2</sub> 昼间平均释放通量为  $82.48 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 夜间平均为  $73.49 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ; CO<sub>2</sub> 的昼夜变化差异比 CH<sub>4</sub> 略大; CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 在 10:00 和 21:00 左右同时接近全天的平均值, 该时段可作为单次采样的选取时

间参考, 以获得具有代表性的通量数据。

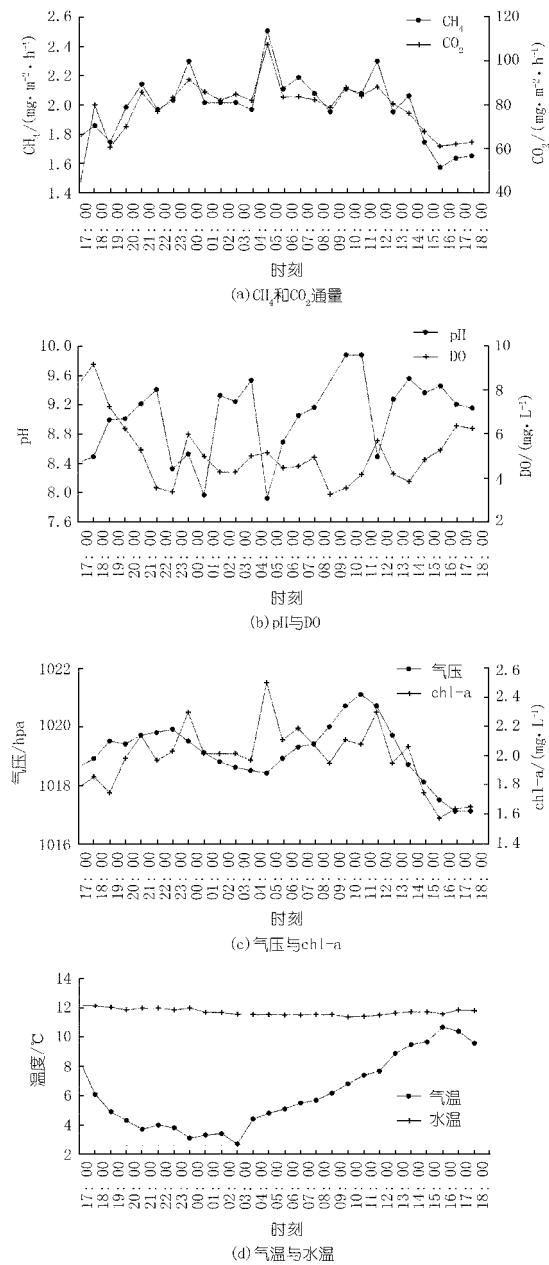


图 1 监测期 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 通量及环境因子变化

表 1 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 通量昼夜变异性统计

温室 气体	平均值/ ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	最大值/ ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	最小值/ ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	标准 偏差	变异 系数
CH <sub>4</sub>	1.98	2.50	1.57	0.21	0.11
CO <sub>2</sub>	77.82	107.13	41.18	0.11	0.16

有研究结果表明, 同一气候带下的清江流域水布垭水库, CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的平均通量分别为  $0.02 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  和  $155.0 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  [10]; 东太湖春季 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的平均扩散通量分别为  $0.57 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  和  $11.4 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  [14]; 同样位于宜昌的一个浅富营养化池塘 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的平均扩散通量分别为  $0.06$

表 2 观测期内环境因子昼夜变异性统计

项目	气温/℃			气压/hpa			pH			DO/(mg·L <sup>-1</sup> )			水温/℃			Chl-a/(mg·L <sup>-1</sup> )		
	测量	标准	变异	测量	标准	变异	测量	标准	变异	测量	标准	变异	测量	标准	变异	测量	标准	变异
	值	偏差	系数	值	偏差	系数	值	偏差	系数	值	偏差	系数	值	偏差	系数	值	偏差	系数
平均值	6.2	2.5	0.4	1019.0	1.0	0	8.9	0.7	0.1	5.2	1.5	0.3	11.7	0.2	0.02	37.4	8.3	0.2
最大值	10.7			1021.1			9.9			9.2			12.2			46.6		
最小值	2.7			1017.1			6.9			3.3			11.4			23.9		

mg/(m<sup>2</sup>·h) 和 63.9 mg/(m<sup>2</sup>·h)<sup>[15]</sup>。本文观测到的温室气体通量与清江水布垭流域相比,CO<sub>2</sub> 通量大约只有清江流域的 1/2,而 CH<sub>4</sub> 通量却比清江流域高出近百倍;与宜昌某富营养化池塘相比,CO<sub>2</sub> 通量要高出两倍以上,而池塘的 CH<sub>4</sub> 比本研究低很多,产生这种差异的原因可能是由于本研究的河段水质情况较差。

## 2.2 环境因子变化

观测期内主要环境因子的变异情况见表 2。由表 2 可知,水温平均值为 11.74℃,比气温的平均值高出 5.49℃,且水温的变化范围比气温低 7.24℃。本研究河段水中藻类生长旺盛,营养物质含量相对较高,水质情况差。Chl-a 与 DO 的变化极为相似(图 1(b,c)),这与浮游藻类的光合作用和呼吸作用有关<sup>[8]</sup>。水体中 pH 值的波动较小,平均为 8.4,表现为弱碱性。已有研究表明,浮游藻类可通过自身的生理活动调节水体中 CO<sub>2</sub> 的浓度从而改变 pH 值,藻类的大量繁殖会导致 pH 值的增加<sup>[16]</sup>。气温、Chl-a、DO 的变异程度较其他因子要大(表 2),气温变异程度大是由太阳光能的昼夜性变化引起的,Chl-a、DO 的变异程度大与藻类呼吸光合作用有着紧密的联系<sup>[17]</sup>。

## 3 讨论

在有氧环境下,好氧细菌可分解库底大量被淹没的有机物和溶解在水中的有机碳、有机碳颗粒,主要产生 CO<sub>2</sub>;在缺氧环境下,产甲烷菌的活动占优势,主要产生 CH<sub>4</sub><sup>[16]</sup>。温室气体的产生过程与很多环境因素有关,比如水温、pH 值、浮游生物等。同步观测的环境因子与温室气体通量的相关性分析如表 3 所示。

表 3 观测期气体通量与主要环境因子相关系数

温室 气体	气温	气压	pH	DO	水温	Chl-a	CH <sub>4</sub>
CH <sub>4</sub>	-0.559**	0.573**	-0.321	-0.363	0.346	-0.471*	1
CO <sub>2</sub>	-0.542*	0.436*	-0.189	-0.466*	-0.478*	-0.530**	0.819**

注: \*\* 0.01 置信水平显著相关; \* 0.05 置信水平显著相关。

### 3.1 温度

在大气压一定的情况下,温度与气体在水中的溶解度成反比。温度升高,溶解度降低,气体从水面逸出;温度降低,溶解度增加,气体从大气进入水体<sup>[17]</sup>。

气温不仅可以直接影响气体的排放,还可以通过对水温的调节间接影响通量的变化<sup>[5]</sup>。水温直接影响水生生物的生长、繁殖以及对水体中物质的分解,也可以影响气体在水中的溶解度和水生植物的光合作用。气温与 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的相关系数分别为 -0.559 和 -0.542,呈显著负相关,水温与 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的相关系数分别为 0.346 和 -0.478(表 3),相关性并不高,这可能是因为本次实验中水温变化只有 0.8℃,水温对碳通量影响并不显著所致,碳通量主要受气温的直接影响。

### 3.2 气压

气压是影响气体在水中溶解度的重要影响因素,气压与温室气体通量的变化有着十分密切的关系<sup>[18]</sup>。本次观测中,气压的变化范围较小,平均值和变化范围分别为 1 019.056 hpa 和 1 017.1~1 019.9 hpa。气压与 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 通量均表现出显著的正相关性,相关系数分别为 0.436 和 0.573(表 3)。气压低的时候,水体中的气体更容易从水体逸出<sup>[19]</sup>。气压也可以影响气体中的溶解氧<sup>[20]</sup>。在好氧条件下,好氧菌占优势,分解水中的有机碳主要产生 CO<sub>2</sub>,而 CH<sub>4</sub> 在好氧条件下可以被甲烷氧化菌氧化成 CO<sub>2</sub>,因此当气压升高时,CO<sub>2</sub> 通量增大<sup>[21]</sup>。

### 3.3 叶绿素

观测期间叶绿素的变化呈现出白天高夜晚低的特点,日变化特征明显。叶绿素与 CO<sub>2</sub> 通量相关性明显,相关系数为 -0.530(表 3),这可能与藻类的光合作用和呼吸作用有关。白天光合作用强于呼吸作用,消耗 CO<sub>2</sub>;晚上呼吸作用强于光合作用,产生 CO<sub>2</sub><sup>[22]</sup>。同时,光合作用释放 O<sub>2</sub>,可促进 CH<sub>4</sub> 的氧化,减少水体中 CH<sub>4</sub> 释放。观测期间,光合作用强度大于呼吸作用,因此 CO<sub>2</sub> 通量随着叶绿素的上升而下降。与 CO<sub>2</sub> 通量相比,叶绿素与 CH<sub>4</sub> 的相关性较弱,相关系数为 -0.471,这可能是由于水体高有机质含量抑制水-气界面气体扩散的结果<sup>[23]</sup>。

### 3.4 溶解氧

水体中有机物降解的途径、产物与水体中的氧含量有非常密切的关系,对水体碳循环有重要影响。对

于碳循环而言, 有氧情况下有机物分解产生二氧化碳, 而在缺氧状态下只有甲烷生成<sup>[25]</sup>。实验中,  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  与溶解氧的相关系数分别为  $-0.363$ ,  $-0.466$  (表 3)。沉积物中产生的甲烷有一部分通过扩散上升到水面, 上升过程中, 随着水中氧浓度的逐步升高, 产生的大部分甲烷被生活在有氧-缺氧临界面的甲烷氧化菌消耗掉<sup>[7]</sup>。故实验中  $\text{CO}_2$  与溶解氧的相关性更高。

### 3.5 pH 值

pH 值也是影响温室气体通量变化的重要因素, pH 值高时, 碱性环境使  $\text{CO}_2$  更易溶于水, 导致释放的  $\text{CO}_2$  降低<sup>[26]</sup>, 这可能是本研究中  $\text{CO}_2$  与 pH 值呈负相关的原因。但本研究中 pH 值与  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  通量关系较弱, 这主要是因为冬季温度较低引起的<sup>[18]</sup>。

## 4 结 论

三峡大学求索溪冬季温室气体排放通量的变化呈现明显的日变化特征, 24 h 内  $\text{CO}_2$  与  $\text{CH}_4$  均为释放状态, 两者的变化具有显著的正相关性, 其释放强度的最大值几乎出现在同一时间点。在 10:00 和 21:00 左右, 温室气体通量同时接近全天的平均值, 是单次采样较为理想的时间段。通过分析温室气体释放通量影响因素发现,  $\text{CO}_2$  通量的变化与气温、水温、溶解氧和叶绿素 a 呈现负相关性, 其中,  $\text{CO}_2$  通量与叶绿素 a 的负相关性更加显著,  $\text{CO}_2$  通量只与气压呈现较强正相关性;  $\text{CH}_4$  通量与气温、气压呈现显著的相关性, pH 值、水温和溶解氧对  $\text{CH}_4$  通量的影响并不显著, 其中 pH 对  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  通量的影响都不显著, 表明在冬季水质情况差的情况下, 温度与气压对碳通量的影响更加密切。温室气体的产生与释放过程与多种因素有关, 仍然需要进行大量的实验进行论证。

### 参考文献:

- [1] Bange H. W. New Directions. The importance of oceanic nitrous oxide emissions [J]. *Atmospheric Environment* 2006, 40, (1), 198–199.
- [2] Raymond P. A, Hartmann, J., Lauerwald, R., et al. Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature* 2013, 503, (7476), 355–359.
- [3] Forster G., Upstill-Goddard, R. C., Gist, N., et al. Nitrous oxide and methane in the Atlantic Ocean between 50°N and 52°S: Latitudinal distribution and sea-to-air flux [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 2009, 56(15): 964–976.
- [4] Frankignoulle M. Field measurements of air-sea  $\text{CO}_2$  exchange. *Limnology and Oceanography* 1988, 33, (3): 313–322.
- [5] Bubier J, Moore T., Savage K., et al. A comparison of methane flux in a boreal landscape between a dry and a wet year [J]. *Global Biogeochem* 2005.
- [6] 王亮, 肖尚斌, 刘德富, 等. 香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析 [J]. *环境科学* 2012(5): 1471–1476.
- [7] 程炳红, 郝庆菊, 江长胜. 水库温室气体排放及其影响因素研究进展 [J]. *湿地科学* 2012, 10(1): 121–129.
- [8] Bastviken, D., Cole, J. J., Pace, M. L., et al. Fates of methane from different lake habitats: Connecting whole-lake budgets and  $\text{CH}_4$  emissions [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113 (G2): G02024.
- [9] Downing, J. A., Prairie, Y. T., Cole, J. J., et al., 2006. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments [J]. *Limnology and Oceanography Methods*, 51(5): 2388–2397.
- [10] 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 [J]. *长江科学院院报* 2011, 28(10): 197–205.
- [11] Eugster, W., Plüss, P., 2010. A fault-tolerant eddy covariance system for measuring  $\text{CH}_4$  fluxes [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(6): 841–851.
- [12] WANG Yuesi and WANG Yinghong. Quick measurement of  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from a short-plant ecosystem [J]. *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100 029.
- [13] Lambert M, Frechette J L. Analytical techniques for measuring fluxes of  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  from hydroelectric reservoirs and natural water bodies [M]. *Environmental Science and Engineering, Greenhouse Gas Emissions – Fluxes and Processes* 2005, 37–60.
- [14] 李香华. 太湖水-气界面温室气体通量及时空变化特征研究 [D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [15] Xiao S., Yang H., Liu D., et al. Gas transfer velocities of methane and carbon dioxide in a subtropical shallow pond [J]. *Tellus B* 2014, 66, 23795.
- [16] 龙爱民, 陈绍勇, 周伟华. 南海北部秋季营养盐、溶解氧、pH 值和叶绿素 a 分布特征及相互关系 [J]. *海洋通报* 2006, (5).
- [17] Rosa L P, Santos M A. Certainty and Uncertainty in the Science of Greenhouse Gas Emissions from hydroelectric dams [R]. *South Africa: World Commission on Dams* 2000.
- [18] 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, (8): 2327–2384.
- [19] 陈永根, 李香华, 胡新志. 中国八大湖泊冬季水-气界面  $\text{CO}_2$  通量 [J]. *生态环境* 2006, 15(4): 665–669.
- [20] Shangbin Xiao, Yuchun Wang, Defu Liu, et al. Diel and seasonal variation of methane and carbon dioxide fluxes at Site Guojiaba, the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(10): 2065–2071.
- [21] Dunnivant F M, Elzerman A W. Aqueous solubility and Henry's law constant data for PCB congeners for evaluation of quantitation structure-property relationships [J]. *Chemosphere* 1988, 17(3): 525–541.
- [22] Rigler E, Zechmeister-Boltenstern S. Oxidation of ethylene and methane in forest soils – effect of  $\text{CO}_2$  and mineral nitrogen [J]. *Geoderma* 1999, 90(1–2): 147–159.
- [23] Nimick D. A., Gammons C. H., Parker S. R. Diel biogeochemical

(下转第 75 页)

- Geological Society held at Nottingham University. Bell et al eds. 1988, 79 - 92.
- [15] Rankin W J. Ground movements resulting from urban tunneling [C]. // Proc. of Conf. on Geotechnical Engineering, Underground Movements, Nottingham, 1988.
- [16] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道(第一版) [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991, 58 - 64.
- [17] Loganathan N, Poulos H G. Analytical Prediction For tunneling induced ground movements in clays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1998, 124(9): 846 - 856.
- (编辑: 郑毅)

## Study on ground subsidence induced by shallow tunnel excavation

YANG Bo

(Chief Engineer Office, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** The accidents due to excessive ground subsidence caused by the tunnel excavation occurred from time to time, the related theory of calculating ground subsidence remains to be further studied. Based on the calculation method of the width coefficient of subsidence trough, the modified Peck method is put forward to calculate ground subsidence of layered soil caused by tunnel excavation. The Qiantang River Tunnel Project was taken as an example, and the ground subsidence values obtained by Peck method, modified Peck method and finite difference method (FDM) were compared. It shows that the results of modified Peck method is close to that of FDM, especially when the percentage of volume loss equals to 0.7%, their ground subsidence curve is very close with the same maximum value of 24 mm. The subsidence trough obtained by the modified Peck method is the narrowest, and the FDM gives a larger width and the Peck method obtains the widest trough.

**Key words:** ground subsidence; modified Peck method; percentage of volume loss; subsidence trough; finite difference method; tunnel excavation

(上接第 31 页)

- processes and their effect on the aqueous chemistry of streams: A review [J]. Chemical Geology 2011 283(1-2): 3 - 17.
- [24] Calleja, M. L., Duarte, C. M., Prairie, Y. T., et al. Evidence for surface organic matter modulation of air-sea CO<sub>2</sub> gas exchange. Biogeosciences 2009 6(6): 1105 - 1114
- [25] Tremblay A, Schetagne R. The relationship between water quality and GHG emissions in reservoirs [J]. International Journal on Hydro-power & Dams, 2006, 13(1): 103 - 107.
- [26] 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 [J]. 水科学进展, 2011, 22(4): 546 - 554.
- (编辑: 常汉生)

## Diel variation of greenhouse gas flux from Qiusuo River of Yichang in winter

LI Shuyan, LIU Xuan, ZHOU Mo, LONG Li, ZHANG Junwei, MU Xiaohui, LEI Dan

(College of Hydraulic and Environment Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** To investigate the emission law of greenhouse gas in small water body, by using LGR - floating static flux chamber method, a 24-hour field continuous observation was carried out to quantify the CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> fluxes across the water-air interface of Qiusuo River in China Three Gorges University at Yichang. The observed results showed that CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> are positively correlated, both of which emitted all day. Moreover, the correlation analysis indicated that CO<sub>2</sub> flux had a significant positive correlation with water temperature and air-pressure, but a negative correlation with temperature, pH, dissolved oxygen and chlorophyll a; CH<sub>4</sub> flux had a positive correlation with air-pressure and negative correlation with other factors; CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> fluxes at 10:00 and 21:00 are close to the average values of a day, so this period can be referred as sampling time for a single measurement.

**Key words:** greenhouse gases flux; water-air interface; influential factors; CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub>; Qiusuo River; Yichang City