

# 南京典型水体春季温室气体排放特征研究

韩 洋<sup>1</sup>, 郑有飞<sup>2\*</sup>, 吴荣军<sup>3</sup>, 尹继福<sup>1</sup>, 徐静馨<sup>1</sup>, 徐 盼<sup>3</sup> (1.南京信息工程大学大气物理学院, 江苏 南京 210044; 2.江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室, 江苏 南京 210044; 3.南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210044)

**摘要:** 利用静态箱-气相色谱法对南京 4 条河流(内秦淮河、外秦淮河、金川河、团结河)和 1 座水库(丁解水库)的春季水-气界面  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  3 种温室气体通量进行包括昼夜变化的持续观测, 对其变化趋势及影响因素加以分析。结果表明, 春季团结河  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  的排放量最大, 分别为  $1023.34, 89.45 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 金川河两种气体排放量次之, 内、外秦淮河  $\text{CO}_2$  排放量相当, 而内秦淮  $\text{CH}_4$  的排放量比外秦淮小 1 个量级。丁解水库该 2 种温室气体排放量最小。金川河  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量最高, 为  $151.31 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 团结河  $\text{N}_2\text{O}$  排放量次之 [ $111.74 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ], 其他 2 条河流和丁解水库  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量均在一个量级上 ( $10^1$ )。水-气界面温室气体的排放受温度、压力、风速等环境因子影响。温室气体的昼夜变化分析结果表明, 除了金川河  $\text{N}_2\text{O}$  的排放趋势为日间排放、夜间吸收外, 其余河流及丁解水库均为温室气体的排放源。内秦淮和丁解水库的排放趋势受人因素为影响较大, 外秦淮河的排放趋势主要受水位的高低变化影响, 团结河的排放量受风速和温度的共同影响。金川河主要受微生物活性影响。3 种温室气体均呈明显的昼夜变化。5 种水体在春季是大气 3 种温室气体的主要排放源。

**关键词:** 南京典型水体; 水-气界面; 温室气体通量

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2013)08-1360-12

**Greenhouse gases emission characteristics of Nanjing typical waters in Spring.** HAN Yang<sup>1</sup>, ZHENG You-fei<sup>2\*</sup>, WU Rong-jun<sup>3</sup>, YIN Ji-fu<sup>1</sup>, XU Jing-xin<sup>1</sup>, XU Pan<sup>3</sup> (1.School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2.Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Nanjing 210044, China; 3.School of Environment Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China). *China Environmental Science*, 2013,33(8): 1360~1371

**Abstract:** Employing floating static chamber-chromatography method, the greenhouse gases (GHGs) fluxes, which include  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$ , at the water-air interface of four rivers (Tuanjie River, Jinchuan River, Inner and Outer Qinhuai River) and Dingjie Reservoir were continuously monitored in Nanjing during spring in 2012. And based on these observed data, the variation and influencing factors of GHGs fluxes were analyzed. The results showed that the  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  emission fluxes of Tuanjie River were top, which were  $1023.34 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  and  $89.45 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , respectively, and Jinchuan River followed;  $\text{CO}_2$  fluxes from Inner and Outer Qinhuai River were at the same magnitude;  $\text{CH}_4$  fluxes emitted from Inner Qinhuai were one magnitude less than Outer Qinhuai; and  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  fluxes from Dingjie Reservoir were the lowest among the waters. As for  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes, Jinchuan River was the highest [ $151.31 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ], followed by Tuanjie River ( $111.74 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ), and Inner/Outer Qinhuai River and Dingjie Reservoir perform modest with  $10^1$  magnitude. In addition, all of the waters were GHGs emission sources except Jinchuan River being  $\text{N}_2\text{O}$  sink. We also concluded that the mainly influencing factors on GHGs fluxes of Inner Qinhuai/Dingjie Reservoir, Outer Qinhuai, Jinchuan and Tuanjie River were human's activities, water level, microbial activity and joint actions of wind speed and temperature, separately. The five waters studied in this paper were emission sources of the three major GHGs in spring.

**Key words:** Nanjing typical waters; water-air interface; greenhouse gas flux

大气中具有温室效应的气体主要有  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4$ 、氢氟氯碳化物类 (CFCs, HFCs, HCFCs)、 $\text{O}_3$ 、全氟碳化物 (PFCs) 及六氟化硫 ( $\text{SF}_6$ ) 等, 其中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  对全球变暖的贡献率分

收稿日期: 2012-11-10

基金项目: GEF/UNDP 中国准备第二次国家信息通报能力建设子项目

\* 责任作者, 教授, zhengyf@nuist.edu.cn

别为 60%、15%、5%<sup>[1]</sup>。因此它们对大气辐射强迫收支平衡和全球气候变化都发挥重要作用<sup>[2]</sup>。

全球范围内,由于占地面积大,湿地被认为是 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的主要排放源<sup>[3-4]</sup>。然而,工业革命以来,大量的人类活动(如石油燃料、农业生产、土地利用和管理等)对全球碳、氮循环产生显著的影响,使得碳、氮负荷成倍地从陆地生态系统进入水生生态系统<sup>[5]</sup>。同时营养盐和有机物质的大量输入刺激了底泥和水体环境中微生物的新陈代谢,导致 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O 在河流、湖泊等淡水水体中的分压经常超出大气平衡分压的数倍,使得其在表层水体均为过饱和状态<sup>[6-7]</sup>。从而导致水生生态系统 CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O 的排放明显增加。有研究表明,河流的环境条件有助于 N<sub>2</sub>O 的形成<sup>[8]</sup>。据估算,溪流和河流释放的 N<sub>2</sub>O 已超过人类向大气排放 N<sub>2</sub>O 的 10%,是 IPCC 估计数量的 3 倍<sup>[9]</sup>。我国长江流域、巢湖流域和九龙江流域 N<sub>2</sub>O 释放系数(EF<sub>5</sub>-r=0.881%)显著高于 2006 年 IPCC 提出的参考值(0.25%)<sup>[10]</sup>。河口湿地沉积物和海底沉积物等高度厌氧环境中产生的 CH<sub>4</sub> 占大气 CH<sub>4</sub> 自然排放源的 40%以上<sup>[11]</sup>。随着城市化进程,农田土壤的流失、工业和生活污水的注入,使得城市地区河流产生黑臭现象,CH<sub>4</sub> 浓度比开阔大洋高 1~2 个量级<sup>[5]</sup>。河流每年大约以溶解态和颗粒态向海洋输送 1Gt 的碳,而通过水-气界面向大气中释放的 10<sup>13</sup>g/a 的 CO<sub>2</sub><sup>[6]</sup>。粗略估计,20 世纪 90 年代,每年约有 15.3Mt 的碳从整个长江流域输送到大气中<sup>[12]</sup>。尽管其相比于其他生态系统的排放量较小,但是河流的碳通量在区域碳收支中占到很大的比重。

目前在内陆淡水生态系统中,水-气界面的温室气体排放大多集中在湿地、湖泊和水库等生态系统<sup>[13-15]</sup>。而对河流生态系统在温室气体排放贡献方面的实验研究仍较少。此外,在城市温室气体排放清单的核算过程中,河流对温室气体排放的贡献被并入废弃物(生活污水和工业废水)和湿地(天然河流)中考虑<sup>[16]</sup>。并且 IPCC 的估算方法对影响因子和产生机制的空间差异的考虑不够精确。

南京湖泊、水库棋布,河流网织,水域面积占全市面积 11%,是华东区域的代表性城市之一。金川河和秦淮一北一南河构成的南京城内的 2 大

水系,汇集了南京市主要生活污水和部分工业废水。城郊团结河为自然河流,沿岸带覆满植物,沿线存有小工厂、小作坊,主要受化肥、生活污水及工业废水的影响。丁解水库水质相对较好,主要受农业源、生活源的污染。因此,本研究选取南京市内、外秦淮河,金川河,城郊团结河以及丁解水库作为研究对象,其中丁解水库为本底参照,采用漂浮静态箱-气相色谱法,对上述 4 条河流和 1 座水库春季水-气交换界面 3 种温室气体释放量进行了观测和研究。分析了这些河流及水库春季水-气界面温室气体通量的变化,揭示了不同受污河流温室气体排放通量特征。以期弥补我国城市河流温室气体排放研究的不足,为估算河流水体对大气温室气体的影响提供依据。

1 材料与方法

1.1 观测区概况和采样点布设

本研究于 2012 年 3 月 3 日~5 月 28 日分别对南京市 4 条河流和 1 座水库的水-气界面的 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 3 种温室气体排放通量进行持续观测,观测日期如表 1 所示,采样点分布如图 1 所示。

表 1 5 种水体观测日期

Table 1 The observation date of five water bodies

水体	日变化观测日期	非日变化观测日期
团结河	5 月 28 日	3 月 5 日、3 月 29 日、4 月 14 日、4 月 21 日、4 月 26 日
金川河	5 月 15 日	3 月 9 日、4 月 5 日、4 月 15 日、4 月 25 日
内秦淮河	5 月 21 日	3 月 10 日、4 月 8 日、4 月 19 日
外秦淮河	5 月 9 日	3 月 13 日、4 月 7 日、4 月 22 日
丁解水库	4 月 11 日	3 月 3 日、3 月 8 日、3 月 30 日、4 月 6 日、5 月 8 日

观测区域中,金川河,内、外秦淮河均为南京市内重要的城市内河,全部为闸控河流,河道两边均为人筑石堤,并建有绿化带和供居民休息的景观设施。金川河除自然降水外,基本无清洁水源流入<sup>[17]</sup>。主要是粪便和生活垃圾为主的生活污水大量排放造成。秦淮河分内秦淮河和外秦淮河两支:外秦淮主要接纳沿河的工业废水和生活污水,导致其水质普遍为

劣Ⅴ类水<sup>[18]</sup>;对于内秦淮河段,一方面居民的生活垃圾、废水、粪便等直接倾入水体,另一方面,沿岸大量的商业小区、市场、饭店等人为污染注入水体.其水质状况劣于Ⅴ类标准,主要污染物是有机物,表现为典型的城市污水污染特征<sup>[19]</sup>.观测期间金川河和内秦淮河水位较稳定,而外秦淮河水位波动较大,三条河流最终均流入长江;城郊团结河为典型的自然河流,水位较浅,农田施用化肥会大量流失并流入该河,其流域沿线存有小作坊、小工厂,因此不同于城内河流水体污染主要来自工业废水和生活污水,城郊河流污染物更为复杂;丁解水库库容 22 万 m<sup>3</sup>,引入生活污水当作鱼饵料,养鱼水面 81 亩<sup>[20]</sup>,水库沿岸同样杂草丛生或被开垦种田,因此农业和生活污水是注入水库的主要营养源.

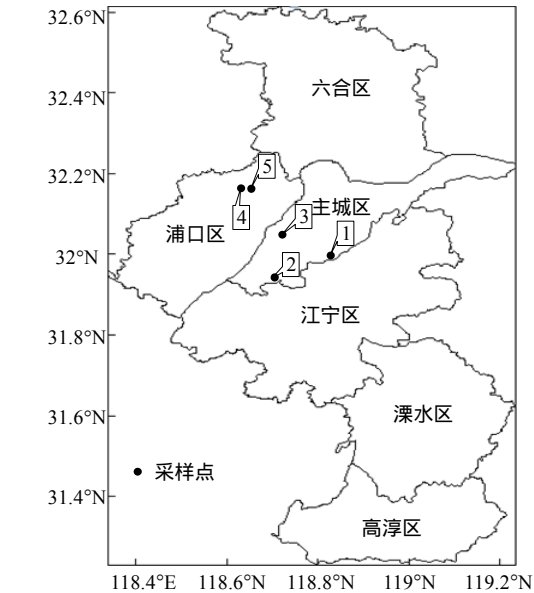


图 1 采样点分布  
Fig.1 Distribution of the sampling sites

由于丁解水库远离城区,水质相对较好、水体生物多样性丰富,且不同于河流受工业和生活污水共同的影响,本研究选取丁解水库作为对照,以期探明南京典型的受不同污染程度的河流其温室气体排放量的差异.

为了方便采样,采样点均设置在人类活动和陆地生态系统的生物效应对采样结果产生影响较小的河边.各河流及水库采样点的位置分别为:内秦淮

河,文正桥附近(118°47'38.7852" E, 32°1'20.1396"N);外秦淮河,石头城公园附近(118°45'21.9096"E, 32°2'50.5248"N);金川河,城北污水处理厂出水口附近(118°45'8.6832"E, 32°6'19.1988"N);团结河,铁路桥附近(118°42'21.87"E,32°13'15.00"N);丁解水库(118°43'59.16"E,32°12'3.5568"N).

1.2 样品采集及数据分析

采用漂浮静态箱(图 2)进行水-气界面温室气体排放通量观测.漂浮静态箱由气体采样箱和泡沫漂浮架组成.采样箱的主体为非透明的 PVC 材质圆筒(直径 20cm,高 24cm),箱体表层包裹了铝箔,以减少采样时由于太阳辐射所引起的桶内温度的变化;采样箱顶部开有 2 个小孔,分别连接水银温度计和供采样用的气体导管.

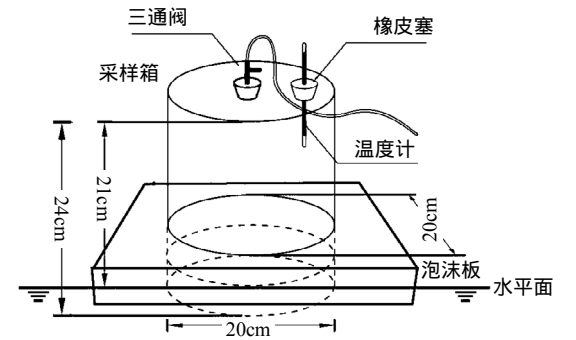


图 2 漂浮静态箱示意  
Fig.2 Schematic diagram of the floating static chamber

采样前,箱体于通风处倒置,使箱内气体混合均匀,然后将箱体固定在泡沫板上并倒置于河道水面,箱体底部浸入水面 3cm,用配有三通阀的注射器采集气样,3 箱同步采样,分别于箱体下水后 0, 10, 20min 采集.采气前缓慢抽推注射器数次以混合采样管和箱内的气体,每次抽取 50mL 气样.3 个箱采完一遍后,进行下一轮采样.昼夜观测期间采样间隔为 2h,非日变化的采样时间固定在上午 9:00~11:00 之间,每隔 1h 采 1 次样.气体样品在 48h 内分析完毕.采集气样的过程中,同时测定箱内温度、气温、表层水温,并采集表层水样.

水样用聚乙烯瓶贮藏,并及时运回实验室分析.COD、总磷、氨氮用兰州连华多参数水质监测仪(5H-2B 型)监测,pH 值、电导率由上海佑科

电导率仪(DDS-11A)监测.用安捷伦 6890N 气相色谱仪结合火焰离子检测器和电子捕获器进行联机对气体样本进行 3 种气体成分(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O)分析测定<sup>[21]</sup>.

通过对每个样品 3 个处理组的 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 混合比与相应的采样间隔时间(0,10,20min)进行直线回归,可求得 3 种温室气体的排放速率.再根据大气压力、气温、普适气体常数、采样箱有效高度、温室气体分子量等,求得单位面积的排放量<sup>[22]</sup>.

2 结果与分析

2.1 水质分析

5 类受污水体中,内外秦淮河、团结河均有一

定的流速,金川河流速极为缓慢,丁解水库流速为零.团结河和金川河均有明显的冒泡现象,研究表明,对于水底无植物水体气体的排放主要通过水-气界面的扩散和冒泡排放,其对气体排放的贡献比重与温度、底泥成分和洪水事件有关<sup>[23]</sup>.由于河水受涨落潮的影响,岸边底泥上长有植物,冒泡现象在河水中央最为严重.从表 2 可以看出,城郊团结河由于疏于管理污染最为严重,其 COD、总磷、氨氮 3 种指标均达不到五类水质标准.丁解水库水质也日益恶化,但其污染源单一,均为周围农户和居民生活污水注入造成的污染.内外秦淮河水水质因近年来治理力度加大而好转,且外秦淮河水水质稍优于内秦淮河.

表 2 春季 5 种水体水质状况  
Table 2 Water quality of five waters in spring

水体	pH 值	电导率 (×20mS)	COD		总磷		氨氮	
			数值(mg/L)	类别	数值(mg/L)	类别	数值(mg/L)	类别
内秦淮河	7.92	0.21	33.6		0.277		3.61	-
外秦淮河	7.70	0.22	31.1		0.327		3.22	-
金川河	7.52	0.30	35.1		0.560	-	8.77	-
团结河	7.35	0.36	91.8	-	0.862	-	12.47	-
丁解水库	8.33	0.45	31.6		0.648	-	9.88	-

注:“-”代表指标达不到五类水质标准

2.2 5 种水体春季 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 平均排放量

表 3 5 种水体 3 种温室气体春季(3~5 月)平均排放值  
Table 3 The average value of three GHGs fluxes from five waters in spring(from March to May)

水体	CO <sub>2</sub> [mg/(m <sup>2</sup> ·h)]	CH <sub>4</sub> [mg/(m <sup>2</sup> ·h)]	N <sub>2</sub> O [μg/(m <sup>2</sup> ·h)]
内秦淮河	169.26±5.87	7.09±0.43	79.72±3.33
外秦淮河	162.18±10.55	16.41±3.06	62.17±2.13
金川河	225.64±10.24	74.60±4.84	151.31±27.17
团结河	1082.00±90.53	175.94±18.42	111.74±7.41
丁解水库	25.61±4.08	1.70±0.14	50.99±2.68

注:内秦淮河、外秦淮河、金川河、团结河和丁解水库3种温室气体总样本数(n)分别195、198、222、245和228

表 3 表明,5 种水体水-气界面 CO<sub>2</sub> 排放量最大,其次为 CH<sub>4</sub>,N<sub>2</sub>O 的排放量最小.由于污染严重,团结河 CO<sub>2</sub> 的排放量最大,且最大值均出现在 4~5 月份(图 3a),其中 4 月 21 日排放量较低,是因为前一天有中雨,造成排放量偏低.团结河 CO<sub>2</sub> 的

排放量比金川河和内外秦淮河高 1 个量级,比丁解水库的排放量高 2 个量级,内外秦淮河 CO<sub>2</sub> 排放量很接近.3 月 30 日和 4 月 6 日的观测过程中丁解水库均为 CO<sub>2</sub> 的汇,但吸收强度较弱,相比整个春季它仍为 CO<sub>2</sub> 的排放源.团结河 CH<sub>4</sub> 的排放量最大,其排放量比金川河、外秦淮河高 1 个量级,比内秦淮河、丁解水库 CH<sub>4</sub> 的排放量高 2 个量级.除了丁解水库,4 条河流 CH<sub>4</sub> 的排放量均随着气温的上升而上升(图 3b).

金川河 N<sub>2</sub>O 的排放趋势波动较大,4 月 5 日排放量高达 1174.64μg/(m<sup>2</sup>·h),其余个例值均在 -1.99~53.14μg/(m<sup>2</sup>·h)之间(图 3c).这可能因为金川河观测点在污水处理厂出水口附近,一方面污水处理厂为了去除营养盐,采用硝化/反硝化等生物除 N 过程会产生大量 N<sub>2</sub>O;另一方面,污水处理厂按照《城镇污水处理厂污染物排放标准》<sup>[24]</sup>的要求使出水水质中总氮、氨氮排量分别小于

15,5mg/L(以 N 计),而反硝化细菌在水中当  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  浓度不高的情况下,会将  $\text{N}_2\text{O}$  还原成  $\text{N}_2$ <sup>[25]</sup>.金川河春季  $\text{N}_2\text{O}$  平均排放量最大并与团结河在一个量级,比其他 2 条河流和丁解水库  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量均高 1 个量级.总体来看,丁解水库 3 种温室气体的排放量均为最低.

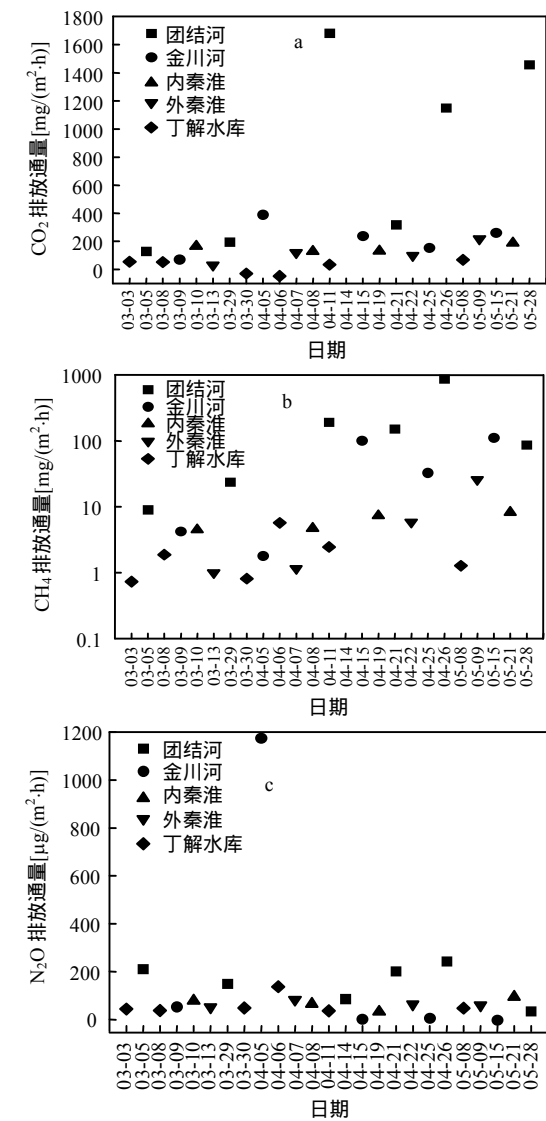


图3 春季  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  3 种温室气体在各观测点的排放量

Fig.3 Fluxes of three GHGs from observation sites in spring

与同样采用漂浮静态箱法的其他研究相比,本文 4 条河流 3 种温室气体的排放通量均大于香

溪河支流<sup>[26]</sup>3 种气体春季排放量.与捷克 Sitka 河流的研究结果<sup>[23]</sup>比较发现,其  $\text{CO}_2$  排放通量 [ $153.33\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ] 和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量 [ $0.07\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ]均与本文内外秦淮河的排放量相当.然而其  $\text{CH}_4$  的排放量 [ $0.67\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ]低于丁解水库.与太湖<sup>[27]</sup>研究结果相比,丁解水库春季  $\text{CO}_2$  排放量低于太湖同季节的排放量 [ $40.22\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ],  $\text{CH}_4$  排放量高于太湖春季的  $\text{CH}_4$  排放量,  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量与太湖春季  $\text{N}_2\text{O}$  排放量相当 [ $0.045\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ].

2.3 春季 3 种气体排放通量的昼夜变化

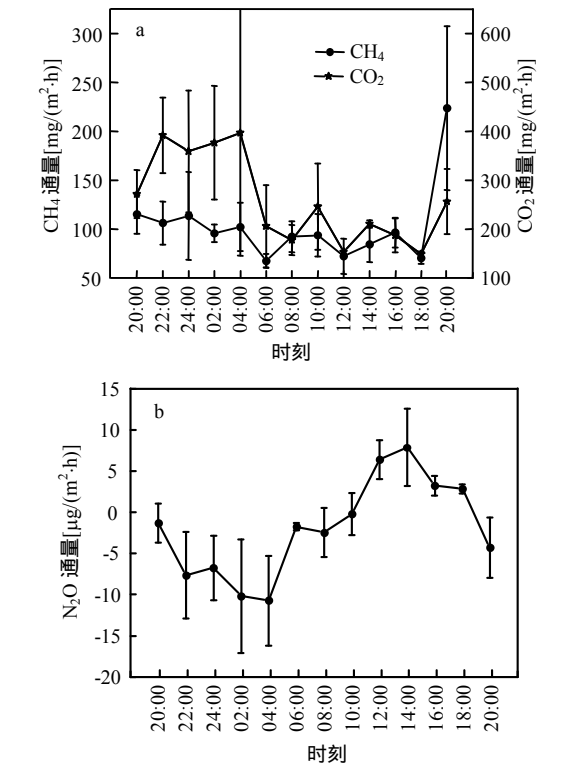


图4 春季金川河水气界面 3 种温室气体通量昼夜变化情况

Fig.4 Diurnal variation of GHGs fluxes at the water-air interface of Jinchuan river in spring

金川河昼夜观测始于 5 月 15 日 20:00,天气多云,水面平静,次日转为晴天,在观测结束时风速变大.由图 4 可见,金川河昼夜均为  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  的源,  $\text{CO}_2$  通量呈现出昼低夜高的排放趋势,并于观测次日 04:00 和 18:00 分别达到全天排放量的最大值

[396.56mg/(m<sup>2</sup>·h)]和最小值[148.96mg/(m<sup>2</sup>·h)].CH<sub>4</sub> 排放通量在整个观测期间没有太大波动,全天排放最小值出现在 06:00,为 67.51mg/(m<sup>2</sup>·h);最大值出现在 16 日观测结束时,为 223.72mg/(m<sup>2</sup>·h);平均排放量为(102.55±39.54)mg/(m<sup>2</sup>·h).N<sub>2</sub>O 的排放通量呈现出明显的昼夜变化特征,从 20:00 实验开始至次日上午 10:00 金川河均为 N<sub>2</sub>O 的汇,并在凌晨 4:00 达到峰值-10.74μg/(m<sup>2</sup>·h),次日 10:00 N<sub>2</sub>O 的排放通量由负转为正,并在 14:00 达到排放最大值 7.85μg/(m<sup>2</sup>·h).

外秦淮河(图 5)整个观测期间(5 月 9 日 14:00~10 日 14:00)天气晴好,水面有一定的风浪,河边冒泡现象不如河中央明显.由于入江口的水

闸控制,水位在 0~60cm 之间.3 种温室气体在外秦淮均为从水体向大气排放,其中 CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub> 的排放通量基本上呈双峰型,分别于 9 日 16:00 [37.86mg/(m<sup>2</sup>·h)]和次日 08:00[114.62mg/(m<sup>2</sup>·h)]、9 日 18:00[479.49mg/(m<sup>2</sup>·h)]和次日 04:00 [531.66mg/(m<sup>2</sup>·h)]达到峰值.N<sub>2</sub>O 的排放呈单峰趋势,在 5 月 9 日观测开始时由于水位下落,N<sub>2</sub>O 的排放量逐渐升高,并在当日水位最低的 18:00 达到极大值 73.83μg/(m<sup>2</sup>·h),之后随着水位上涨排放量下降.整个夜间 N<sub>2</sub>O 排放趋势较为平缓,只是在 24:00 排放量稍有增加随即又降低,在 5 月 10 日水位再次最低时达到全天排放最大值,值为 136.60μg/(m<sup>2</sup>·h).

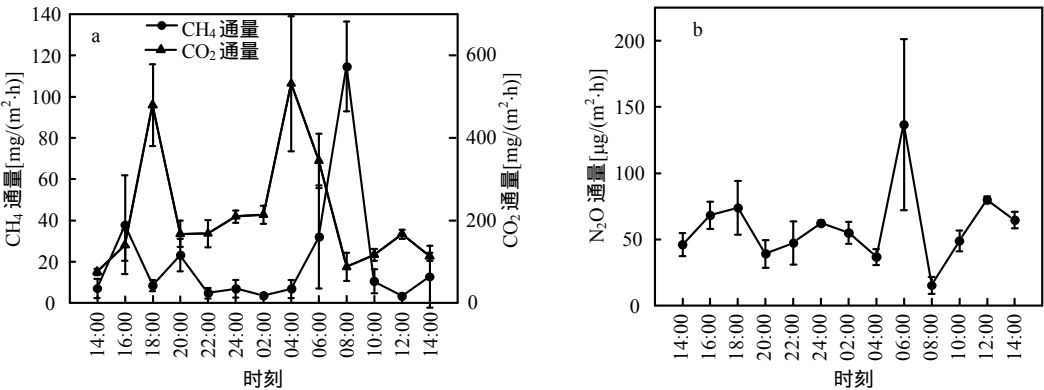


图 5 春季外秦淮河水气界面 3 种温室气体通量昼夜变化情况

Fig.5 Diurnal variation of GHGs fluxes at the water-air interface of Outer Qinhuai river in spring

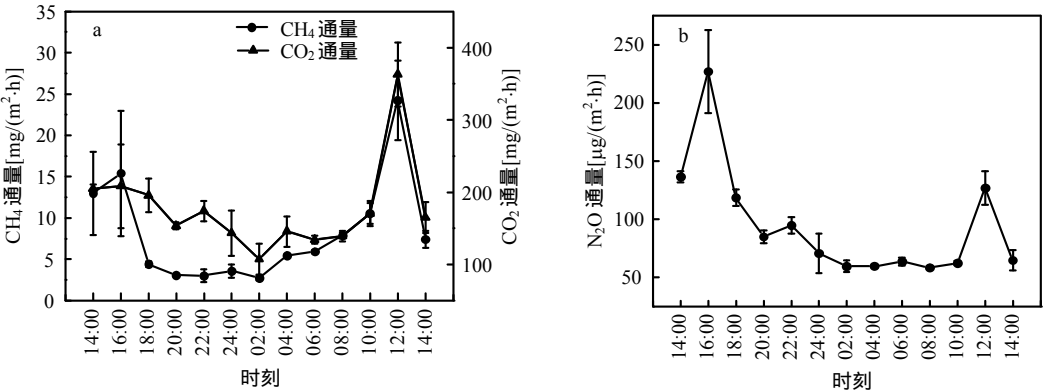


图 6 春季内秦淮河水气界面 3 种温室气体通量昼夜变化情况

Fig.6 Diurnal variation of GHGs fluxes at the water-air interface of Inner Qinhuai river in spring

内秦淮河水深 2~3m.观测时间始于 5 月 21 日 18:00,从实验开始到 22:00 河面一直有游船经

过,CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O 3 种温室气体的排放通量(图 6)也均在游船最为密集(12 次/min)20:00 达到极大值,分别为 15.41,208.41,227.01μg/(m<sup>2</sup>·h).夜间水位略有上涨,上游排放大量生活垃圾.CH<sub>4</sub> 的排放量并没受此影响,稳定在 3.35mg/(m<sup>2</sup>·h).然而,CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放量均呈上升趋势,直到 02:00 达到了极大值,而后缓慢下降.06:00 之后随温度升高 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的排放量缓慢上升,N<sub>2</sub>O 在次日 14:00 之前无变化,随后 3 种气体在 22 日 16:00 同时达到排放峰值,依次为 24.24,362.86,126.91μg/(m<sup>2</sup>·h).

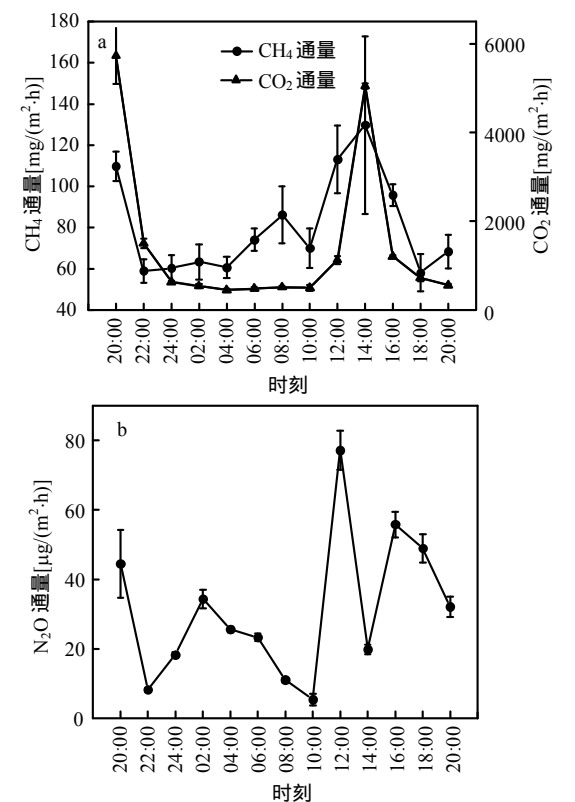


图 7 春季团结河水气界面 3 种温室气体通量昼夜变化情况

Fig.7 Diurnal variation of GHGs fluxes at the water-air interface of Tuanjie river in spring

团结河在实验期间(5 月 28 日 20:00~5 月 29 日 20:00)天气主要以多云转雨为主,在次日 10:00 到 14:00 出现短暂晴天,但到了 16:00 左右晴转多云并伴随小雨,到实验结束时已转为中

雨.在整个观测期间 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 均呈双峰型分布(图 7a),其峰值分别出现在 28 日 20:00[CH<sub>4</sub>, 109.71mg/(m<sup>2</sup>·h); CO<sub>2</sub>, 5725.61mg/(m<sup>2</sup>·h)]和 29 日 14:00 [CH<sub>4</sub>, 129.71mg/(m<sup>2</sup>·h);CO<sub>2</sub>,5042.58mg/(m<sup>2</sup>·h)]. N<sub>2</sub>O 的排放通量呈波动趋势,未见较显著的日变化特征,整体呈波动形式,平均值为 31.07μg/(m<sup>2</sup>·h).

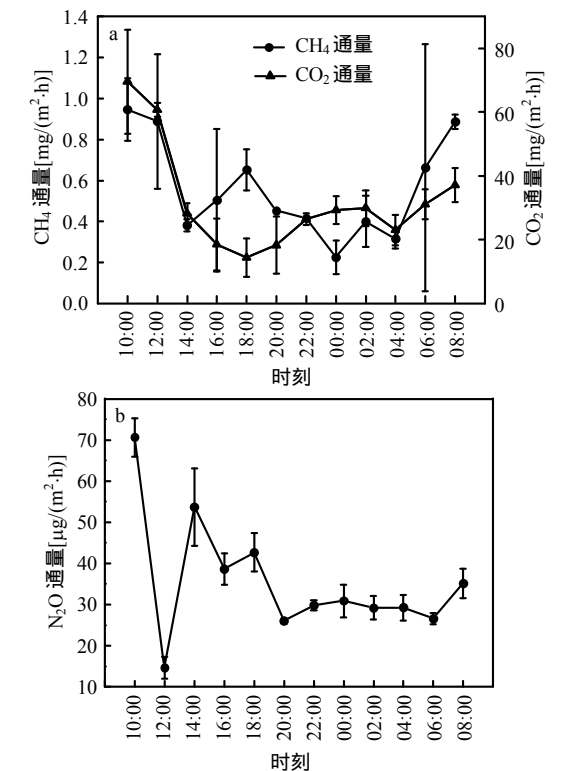


图 8 春季丁解水库水气界面 3 种温室气体通量昼夜变化情况

Fig.8 Diurnal variation of GHGs fluxes at the water-air interface of Dingjie reservoir in spring

丁解水库作为鱼池在春季水质相对较好,水生植物数量较多,CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的排放量(图 8a)在 5 类水体中均为最低,其中 CH<sub>4</sub> 的平均排放量 [0.56mg/(m<sup>2</sup>·h)],较内秦淮河小 1 个量级,较外秦淮河和团结河小 2 个量级,较金川河小 3 个量级.CO<sub>2</sub> 的平均排放量[32.23mg/(m<sup>2</sup>·h)]比内外秦淮河、金川河小 1 个量级,比团结河小 2 个量级.N<sub>2</sub>O 的排放通量(图 8b)在昼间呈现出较大波动,夜间则趋于平稳.

### 3 讨论

#### 3.1 不同河流温室气体昼夜变化特征

内秦淮河和丁解水库的昼夜变化主要受人为因素的影响。通常情况下,在一条河流中产生的气体的量和释放到大气中的量大抵相等。但是,在含有大量有机物质的河流中,微生物呼吸所产生的气量常常超过从水中释放的温室气体通量。因此,河流溶存  $\text{N}_2\text{O}$  的浓度很高<sup>[28]</sup>,  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  也均处于过饱和状态<sup>[29]</sup>。当水中气体分压超过大气分压的时候,溶存于水中的温室气体就会通过水-气界面扩散排放。内秦淮频繁过往的船只和丁解水库岸边洗涤、灌溉等人类活动的扰动除了打破了原有的气液平衡,还类似水库溢洪道泄水时,由激流和水体压力变化引发的脱气排放过程<sup>[14]</sup>。从而导致突高的温室气体排放量。Lilley 等<sup>[30]</sup>在高度湍流的山间溪流发现,甲烷会不断地从含有急流的河段排出,而在含有水池并流速较低的河段,甲烷又会重新补充到溪流中。赵小杰等<sup>[31]</sup>也指出,较大的水面波动会导致较大的甲烷排放量。内秦淮河 3 种气体在 22 日 16:00 达到最大值是因为:内秦淮河白天有冒泡现象,但内秦淮河由于河水较深,温度对底泥微生物的影响有一定的滞后,因而于 16:00 才达到排放峰值。内秦淮河  $\text{CH}_4$  和气温、水温均呈显著的正相关( $r=0.716$ ,  $P<0.01$ ,  $r=0.61$ ,  $P<0.01$ ,  $N=13$ )。16:00 有部分空船经过,虽然频率不如晚上高,但空船速度更快,水浪更大,也导致该时段排放量最大。

当水位发生显著变化时,水柱静水压力也会突然改变。冒泡是  $\text{CH}_4$  的排放途径之一,在潮汐过程中水位下降或水中静水压力的降低都会使  $\text{CH}_4$  冒泡速率增加<sup>[29]</sup>。因此当水位处于低值时,  $\text{CH}_4$  的排放量会增加。Rosa 等<sup>[32]</sup>对巴西 Samuel 和 Tucui 水库的研究发现,水位最浅的地方是甲烷的最大排放区域。溶解氧含量随水深减少而增加。水位突然降低,使含有大量溶解氧的表层水覆盖于底泥之上,因此当水位降到最低之前,大量的溶解氧将底泥中的  $\text{CH}_4$  氧化成  $\text{CO}_2$ 。另外,由于  $\text{CO}_2$  易溶于水(淡水中溶解度约为  $39\text{mol/m}^3$ , 20 $^{\circ}\text{C}$ )而  $\text{CH}_4$  几乎不溶( $1.6\text{mol/m}^3$ , 20 $^{\circ}\text{C}$ )<sup>[29]</sup>, 水中

$\text{CH}_4$  浓度和扩散速率均不高。因此当底泥被较薄水层覆盖时,  $\text{CO}_2$  更容易通过水-气界面扩散出来,使得  $\text{CO}_2$  的排放峰值出现在  $\text{CH}_4$  之前(图 5)。当水位降到最低,形成短暂的消落区,由于  $\text{N}_2\text{O}$  还原酶对氧气及其敏感,极少的  $\text{O}_2$  也会抑制  $\text{N}_2\text{O}$  进一步还原为  $\text{N}_2$ , 而不会影响其产生<sup>[33]</sup>, 导致  $\text{N}_2\text{O}$  排放量的上升。此外,当底泥裸露,部分湿润的土壤可能会为  $\text{N}_2\text{O}$  提供充满空气的排放路径,使得其更容易地从土壤溶剂中逃离,并最终释放到大气<sup>[9]</sup>。因此昼夜变化中  $\text{N}_2\text{O}$  排放量最大值均出现在水位最低,底泥裸露的时刻(图 5)。

金川河 3 种温室气体表现出明显的昼夜排放规律。金川河水生生物(如浮游植物)的光合作用对  $\text{CO}_2$  排放影响较强。与太湖<sup>[34]</sup>、南四湖<sup>[35]</sup>等天然湖泊  $\text{CO}_2$  昼夜变化趋势一致,昼间随着水面温度升高,光合作用增强,水体中溶解的无机碳向有机碳的转化,致使水中  $\text{CO}_2$  分压下降,  $\text{CO}_2$  排放通量减少。但由于金川河污染严重,底泥和水体含有大量有机物,在微生物的呼吸作用下,  $\text{CO}_2$  在昼间没有成为吸收汇。夜间与昼间相反,转为呼吸作用,使水表的  $\text{CO}_2$  分压增加,因而导致金川河  $\text{CO}_2$  夜间的排放量占全天排放量的 60.68%(表 3)。由于冒泡集中在河中,对岸边影响较小,因此,  $\text{CH}_4$  主要以自由扩散方式排放。Liikanen 等<sup>[36]</sup>通过实验室微生物培养实验发现,温度是控制底泥释放  $\text{CH}_4$  的重要因素。由于观测过程中水位基本无变化(50cm),并且河水透明度低,水温的垂直变化大,并且水的比热大,底层水温整体变化幅度较小,因而对底泥微生物的影响不明显。因此,金川河  $\text{CH}_4$  的昼夜排放趋势较平缓,无大的波动。Beaulieu 等<sup>[9]</sup>研究发现,  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量和河流生态系统的呼吸作用负相关,促进好氧呼吸的影响因子(水中不稳定碳的含量)可能会降低  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量。夜间呼吸作用强,可能导致  $\text{N}_2\text{O}$  进一步被还原为  $\text{N}_2$ , 因此导致夜间金川河成为  $\text{N}_2\text{O}$  的汇。昼间水体成为  $\text{N}_2\text{O}$  的排放源主要因为:温度升高,  $\text{N}_2\text{O}$  溶解度降低,同时水中微生物活性增强,均能促进  $\text{N}_2\text{O}$  的排放。和  $\text{CO}_2$  与温度的趋势相反,  $\text{N}_2\text{O}$  的排放量与气温、水温均呈显著正相关关系( $r=0.914$ ,  $P<0.01$ ,  $r=0.87$ ,  $P<0.01$ ,  $N=13$ )。



团结河的昼夜变化主要受夜间风速和昼间太阳辐射和温度上升的共同影响所致.夜间 3 种温室气体排放通量同风速均表现为由大到小变化.由于风速对排放量的影响主要在夜间,受昼间温度、太阳辐射度等因素的影响,CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O 和风速的相关性并不如 CH<sub>4</sub> 显著( $r=0.662$ ,  $P<0.05$ ,  $N=13$ ).而昼间随着太阳辐射增强,温度升高,使底泥和水中微生物活性增强,因而在 12:00~14:00 3 种温室气体排放量均达到极大值.其中 CH<sub>4</sub> 的排放量和气温、水温呈显著正相关性( $r=0.712$ ,  $P<0.01$ 、 $r=0.805$ ,  $P<0.01$ ,  $N=13$ )

表 4 不同河流温室气体昼夜通量

Table 4 Diurnal fluxes from different experimental sites

采样地点	气体	日均通量 [mg/(m <sup>2</sup> ·h)]	昼均通量 [mg/(m <sup>2</sup> ·h)]	夜均通量 [mg/(m <sup>2</sup> ·h)]	夜间通量/ 日总通量 (%)
金川河 a	CH <sub>4</sub>	102.55	82.40	126.06	51.22
	CO <sub>2</sub>	260.08	189.92	341.93	54.78
	N <sub>2</sub> O	-1.93	2.27	-6.82	147.24
团结河 b	CH <sub>4</sub>	80.56	89.49	70.14	36.28
	CO <sub>2</sub>	1457.48	1366.67	1563.44	44.70
	N <sub>2</sub> O	0.031	0.034	0.027	36.29
外秦淮 河 c	CH <sub>4</sub>	20.92	28.34	9.06	18.04
	CO <sub>2</sub>	216.53	190.44	258.27	49.70
	N <sub>2</sub> O	0.06	0.067	0.048	33.33
内秦淮 河 d	CH <sub>4</sub>	8.20	9.64	5.89	29.93
	CO <sub>2</sub>	177.18	178.64	174.86	41.12
	N <sub>2</sub> O	0.094	0.079	0.119	52.74
丁解水 库 e	CH <sub>4</sub>	0.56	0.70	0.36	26.79
	CO <sub>2</sub>	32.23	37.11	25.39	32.82
	N <sub>2</sub> O	0.036	0.04	0.029	33.56

注:a、b、c、d、e表示昼间通量计算时间分别为5:06~18:57、5:01~19:04、5:12~18:51、5:04~19:00、5:41~18:31,平均气温分别为24.99、26.25、23.65、23.52、17,平均水温分别为24.79、22.69、23.55、23.49、19.60

将日变化的时间细分为昼、夜 2 个时间段,结果发现,金川河 3 种温室气体夜间排放量占整日排放量的 56%以上,团结河 3 种温室气体夜间排放量也都超过了整日排放量的 40%.其他河流个别气体也出现夜间占全天排放量 45%以上的情况.表 4 的结果表明,在以往的观测中,由于普遍认为夜间气候条件变化,尤其是

温度的变化以及水中、底泥中微生物活性相对较低,同时由于夜间不利于手动采样,对夜间采样频率的有意降低可能会导致温室气体夜间排放量的漏检.

3.2 环境因子对水-气界面温室气体通量影响  
气、液间主要靠水气界面分子的扩散、冒泡和高等水生植物内部通气组织.尽管采样点都在河岸边,但并无大型植被生长,因此 5 种水体主要以扩散和冒泡 2 种方式排放温室气体.而这 2 种排放方式容易受到温度、气压、风速等环境因子的影响.

3.2.1 温度的影响 温度是影响水-气界面温室气体排放的一个主要因素.对于 CO<sub>2</sub>,一方面气温升高,水温随之上升,水生植物的光合作用也相应增强,使得水体界面 CO<sub>2</sub> 分压降低,有利于 CO<sub>2</sub> 从大气进入水体,因此在金川河昼夜变化中,CO<sub>2</sub> 的排放量与气温、水温均呈显著的负相关关系( $r=-0.737$ ,  $P<0.01$ 、 $r=-0.681$ ,  $P<0.05$ ,  $N=13$ ).另一方面,温度上升促进水体中有机质分解和水中及底泥微生物活性.此外,气体在水中的溶解度与温度呈反比,当温度升高,有利于 CO<sub>2</sub> 从水中释放到大气;反之,温度降低,CO<sub>2</sub> 从大气进入水体.因此气温及水温均与团结河、内、外秦淮河 CO<sub>2</sub> 的排放呈正相关关系(表 5),这也说明城市受污河流 CO<sub>2</sub> 排放主要受有机质分解和微生物活性的影响,而光合作用的影响较弱.对于金川河和丁解水库,由于天气现象的多变、风速等因素的干扰下,与温度的相关性并不明显.

对于 CH<sub>4</sub>,除了温度对溶解度的影响外,气温及水温的上升,对底泥温度产生影响,进而促进产甲过程和甲烷氧化过程中细菌的数量和活性,从表 5 中可以看出,4 条河流 CH<sub>4</sub> 的排放量与气温和水温均呈正相关,但由于静态箱对 CH<sub>4</sub> 的冒泡排放存在较大的测量误差<sup>[37]</sup>,导致 CH<sub>4</sub> 的通量出现激增(图 3),只有金川河和内秦淮河 CH<sub>4</sub> 排放量和气温、水温达到显著正相关.

水体中 N<sub>2</sub>O 的产生是好氧的硝化作用和厌氧的反硝化作用的共同结果.一方面温度升高,硝化反硝化速率相应增加.但是,温度的变化同时影响了沉积物中耗氧速率,温度升高,溶解氧浓度降

低,导致硝化速率下降.同时,温度对硝化菌的抑制作用大于反硝化菌<sup>[38]</sup>.因此温度对 N<sub>2</sub>O 的影响作用比较复杂,本研究中,金川河和团结河 N<sub>2</sub>O 排放量与温度呈负相关,这主要是由于这两条河流于 3 月 3 日和 3 月 9 日进行了第 1 次采样观测,气温和水温也相应较低,而较低的温度只能暂时抑制硝化、反硝化细菌的活性.当气温在 0~5 ℃ 时,反硝化作用仍然存在<sup>[39]</sup>.又由于春季这两条河流的氨氮含量较高(表 2),因此硝化作用对 N<sub>2</sub>O 产生的贡献更多.但是,由于团结河和金川河严重受污,随着温度继续上升水体进而缺氧黑臭,因此抑制了硝化菌的活性.相反,内、外秦淮河一方面受硝化作用影响弱,另一方面它们第一次采样时间相对较晚,因此与温度呈正相关.

表 5 5 种水体春季水-气界面温室气体通量与环境因素之间的关系  
Table 5 The correlation between GHGs flux on the water-air interface and the envrionmental factors in spring

水体	气体	气温	水温	气压	辐照度	风速
金川河	CO <sub>2</sub>	0.242	-0.396	-0.21	0.96*	-0.46*
	CH <sub>4</sub>	0.601**	0.609*	-0.625**	-0.177	-0.504*
	N <sub>2</sub> O	-0.168	-0.661*	0.328	0.938	0.139
团结河	CO <sub>2</sub>	0.451*	0.423*	-0.12	0.806	0.414*
	CH <sub>4</sub>	0.317	0.026	0.026	0.917*	-0.057
	N <sub>2</sub> O	-0.378*	-0.372	0.036	0.131	-0.265
内秦淮河	CO <sub>2</sub>	0.126	0.464*	-0.175	0.994	0.435*
	CH <sub>4</sub>	0.437*	0.335	-0.396	-0.61	0.649**
	N <sub>2</sub> O	0.133	0.467*	-0.066	0.751	0.182
外秦淮河	CO <sub>2</sub>	0.252	0.464*	-0.385	0.809	-0.123
	CH <sub>4</sub>	0.192	0.296	-0.255	0.822	0.508*
	N <sub>2</sub> O	0.039	0.002	0.039	0.492	-0.162
丁解水库	CO <sub>2</sub>	-0.126	0.557**	-0.005	-0.212	0.384*
	CH <sub>4</sub>	0.12	-0.214	0.339	0.771	-0.212
	N <sub>2</sub> O	0.21	-0.217	0.253	0.769	-0.273

注:\*\*表示在0.01水平上显著相关,\*表示在0.05水平上显著相关

3.2.2 气压的影响 气压是影响温室气体在水中溶解度的重要参数.当温室气体的浓度在水中相对于大气过饱和时,其水界面分压大于气界面分压,进而促进温室气体的分子扩散排放.气压升高时,气体在水中的溶解能力增强,使得温室气体从大气进入水体,反之,气压降低,气体从水体进入大气.当变化的气压影响温室气体溶解度的同时,也影响了水中溶解氧的浓度,而 CH<sub>4</sub> 在好氧的环境中会被氧化成 CO<sub>2</sub>.因此气压与 5 种水体的 CO<sub>2</sub> 排放均呈负相关关系(表 5).CH<sub>4</sub> 在水中的传输除了分子扩散还有冒泡排放过程,Casper 等<sup>[29]</sup>发现,气压降低 2%引发了 CH<sub>4</sub> 从底泥 10 倍的增长.因此对于冒泡现象严重的金川河,其 CH<sub>4</sub> 的排放和气压呈显著的负相关( $r=-0.625, P<0.01, N=13$ ).同样也由于静态箱法对冒泡排放的测量

误差,导致其他河流 CH<sub>4</sub> 与气压无显著相关性.而 N<sub>2</sub>O 由于受硝化反硝化的共同作用,气压对其的影响也就更加复杂,因此观测期间所有河流和 N<sub>2</sub>O 都无显著相关性.

3.2.3 风速的影响 本研究中,丁解水库和团结河 CO<sub>2</sub>、金川河 N<sub>2</sub>O、外秦淮 CH<sub>4</sub> 和内秦淮 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 均与风速呈显著正相关关系.这主要是因为:风的切应力导致水表面破碎,增加水气交换面积,从而增加温室气体的交换量;风浪过后,藻类大量漂浮于水面,藻类的光合或呼吸作用增强,将使表层水的 CO<sub>2</sub> 分压降低或增加,从而使水气交换通量增大或减小;对于浅层水体,大风持续一段时间后,风应力引起底泥悬浮,促使底泥中碳酸盐和 CO<sub>2</sub> 进入水体,增加水体表面 CO<sub>2</sub> 分压,同时悬浮的底泥对光合作用产生影响.而金川河 CO<sub>2</sub> 和

CH<sub>4</sub> 与风速呈显著负相关关系,这可能是因为金川河水生生物含量较多,光合作用较强,因此 CO<sub>2</sub> 在金川河可能是不饱和的.而且,20 时 CO<sub>2</sub> 在水中的溶解度高达 39mol/m<sup>3</sup>,CH<sub>4</sub> 的溶解度为 1.6mol/m<sup>3</sup>.因此,对于欠饱和水体,高风速在水面可能形成向下的泵吸作用<sup>[40]</sup>.而当风速小于某一临界值时,对水气界面的气体交换量无影响<sup>[41]</sup>,这导致其余河流温室气体和风速无显著相关性.

**3.2.4 其他因素的影响** 辐照强度可以通过调节气温、水温、光合作用以及微生物活性等来影响温室气体的排放.从表 5 可以看出,太阳辐照度和金川河 CO<sub>2</sub> 团结河 CH<sub>4</sub> 呈显著正相关.尽管在实验过程中没有对水中溶解氧进行检测,但是可以推断金川河昼夜变化过程中 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放通量和溶解氧有紧密关系.这是因为昼间水生生物光合作用水体中溶解氧含量较高,而高的溶解氧含量促进了硝化作用,从而使 N<sub>2</sub>O 的排放量较低.相反夜间由于呼吸作用,水中溶解氧含量降低,抑制了硝化作用.因此 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 之间呈显著的负相关( $r=-0.862$ ,  $p<0.01$ ,  $N=13$ ).此外,有研究表明,高铵态氮对 CH<sub>4</sub> 氧化细菌有抑制作用<sup>[42]</sup>.因此,较高的氨氮含量可能也是团结河和金川河 CH<sub>4</sub> 排放通量较高的原因之一.

## 4 结论

**4.1 南京春季受污染的 4 条河流及作为对照的丁解水库均为大气 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 的排放源,受污染最严重的团结河 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的排放量最大,分别为 1023.34,89.45mg/(m<sup>2</sup>·h),金川河两种气体排放量次之,内外秦淮河 CO<sub>2</sub> 排放量相当,而内秦淮 CH<sub>4</sub> 的排放量比外秦淮小 1 个量级.由于金川河附近污水处理厂的影响,其 N<sub>2</sub>O 排放量在 5 种水体中最高,为 151.31μg/(m<sup>2</sup>·h),团结河 N<sub>2</sub>O 排放量次之(111.74μg/(m<sup>2</sup>·h),其他 2 条河流和丁解水库 N<sub>2</sub>O 的排放量均在一个量级上(10<sup>1</sup>).整个春季,不同河流的温室气体主要受温度、气压、风速、辐照度等环境因子的影响.**

**4.2 昼夜观测结果表明,内秦淮河和丁解水库昼夜变化主要受人为因素的影响,3 种气体昼夜变化均呈双峰型.水位的变化影响了外秦淮河温**

**室气体的昼夜排放,CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 均在水位最低时达到排放峰值,而 CO<sub>2</sub> 在水位达到最低前,即尚有水层覆盖于底泥上时达到排放峰值.团结河的昼夜变化主要受夜间风速和昼间太阳辐射和温度上升的共同影响所致.由于水生生物的影响,金川河 3 种温室气体均具有明显的排放特征,CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的排放量均夜间高于昼间,而对于 N<sub>2</sub>O,金川河在昼间表现为排放夜间又转为吸收,整体上表现为对 N<sub>2</sub>O 的吸收.此外,金川河和团结河 3 种温室气体夜间排放总量均占整日排放量的 40%以上,其余河流个别气体夜间也占到全天排放量的 45%以上.今后对河流昼夜变化的观测试验中,夜间的排放量也应受到重视.**

## 参考文献:

- [1] Karlén W. Global Temperature forced by solar irradiation and greenhouse gases? [J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2001,30(6):349-350.
- [2] Griggs D J, Noguer M. Climate change 2001: The scientific basis. contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change [J]. *Weather*, 2002,57(8):267-269.
- [3] Le Mer J, Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2001,37(1):25-50.
- [4] 孙丽,宋长春,黄耀.沼泽湿地 N<sub>2</sub>O 通量特征及 N<sub>2</sub>O 与 CO<sub>2</sub> 排放间的关系 [J]. *中国环境科学*, 2006,26(5):532-536.
- [5] 虞中杰.上海市河网水体溶存氧化亚氮和甲烷的时空分布及排放通量 [D]. 上海:华东师范大学, 2011.
- [6] Richey J E, Melack J M, Aufdenkampe A K, et al. Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO<sub>2</sub> [J]. *Nature*, 2002,416(6881):617-620.
- [7] Diane H, Palmer S M, Billett M F, et al. Carbon dioxide and methane evasion from a temperate peatland stream [M]. Waco, TX, ETATS-UNIS: American Society of Limnology and Oceanography, 2001.
- [8] Cole J J, Caraco N F. Emissions of nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) from a Tidal, Freshwater River, the Hudson River, New York [J]. *Environmental Science and Technology*, 2001,35(6):991-996.
- [9] Beaulieu J J, Tank J L, Hamilton S K, et al. Nitrous oxide emission from denitrification in stream and river networks [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011,108(1): 214-219.
- [10] 王佳宁,晏维金,陈能汪,等.我国河流 N<sub>2</sub>O 饱和度与释放系数变

- 化及其与河流氮水平的关系研究 [J]. 农业环境科学学报, 2012,31(08):1576-1585.
- [11] Solomon S. Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [12] 谭 燕.长江口、黄河口邻近海域 CO<sub>2</sub> 通量及东海 pCO<sub>2</sub> 估测模型的讨论 [D]. 青岛:中国海洋大学, 2004.
- [13] Xing Y, Xie P, Yang H, et al. Methane and carbon dioxide fluxes from a shallow hypereutrophic subtropical Lake in China [J]. Atmospheric Environment, 2005,39(30):5532-5540.
- [14] Jacinthe P A, Filippelli G M, Tedesco L P, et al. Carbon storage and greenhouse gases emission from a fluvial reservoir in an agricultural landscape [J]. CATENA, 2012,94(0):53-63.
- [15] 张永勋,曾从盛,黄佳芳,等.人为干扰对闽江河口短叶茳芩湿地 N<sub>2</sub>O 排放的影响 [J]. 中国环境科学, 2013,33(1):138-146.
- [16] 杨 谨,鞠丽萍,陈 彬.重庆市温室气体排放清单研究与核算 [J]. 中国人口资源与环境, 2012,22(03):63-69.
- [17] 姚亦锋.南京城市水系变迁以及现代景观研究 [J]. 城市规划, 2009,33(11):39-43.
- [18] 童朝锋,岳亮亮,郝嘉凌,等.南京市外秦淮河水质模拟及引调水效果 [J]. 水资源保护, 2012,28(06):49-54.
- [19] 罗玉兰,徐 颖,曹 忠.秦淮河底泥及间隙水氮磷垂直分布及相关性分析 [J]. 农业环境科学学报, 2007,26(04):1245-1249.
- [20] 郑恩才,谢金福.丁解水库养鱼高产经验 [J]. 水利渔业, 1991,(5):41.
- [21] Yuesi W, Yinghong W. Quick measurement of CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from a short-plant ecosystem [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003,20(5):842-844.
- [22] 胡正华,李岑子,陈书涛,等.臭氧浓度升高对土壤-冬小麦系统 CO<sub>2</sub> 排放的影响 [J]. 环境科学, 2011,32(1):46-50.
- [23] Hlavacova E, Rulik M, Cap L, et al. Greenhouse gas (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) emissions to the atmosphere from a small lowland stream in Czech Republic[J]. Archiv für Hydrobiologie, 2006, 165(3): 339-353.
- [24] 2002 G B 18918 城镇污水处理厂污染物排放标准 [S].
- [25] 王仕禄,刘丛强,万国江,等.太湖及其周围河流中 N<sub>2</sub>O 的空间分布与释放通量 [J]. 第四纪研究, 2009,29(1):9.
- [26] 赵 炎,曾 源,吴炳方,等.三峡水库香溪河支流流域温室气体排放通量观测 [J]. 水科学进展, 2011,22(04):546-553.
- [27] 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.
- [28] Beaulieu J J, Tank J L, Hamilton S K, et al. Nitrous oxide emission from denitrification in stream and river networks [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011,108(1):214-219.
- [29] 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):1-19.
- [30] Lilley M D, Angelis D M A, Olson J E. Methane concentrations and estimated fluxes from Pacific Northwest rivers [J]. Mitt. Internat. Verein. Limnol., 1996,25:187-196.
- [31] 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(08):2377-2384.
- [32] Rosa L P, Dos Santos M A, Matvienko B, et al. Biogenic gas production from major Amazon reservoirs, Brazil [J]. Hydrological Processes, 2003,17(7):1443-1450.
- [33] Hochstein L I, Tomlinson G A. The enzymes associated with denitrification [J]. Annu. Rev. Microbiol., 1988,42:231-261.
- [34] 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 [J]. 生态学杂志, 2005,24(12):1425-1429.
- [35] 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(04):665-669.
- [36] Liikanen A. Greenhouse gas and nutrient dynamics in lake sediment and water column in changing environment [D]. Kuopio: Kuopion yliopisto, 2002.
- [37] Swati K, Sharma M P, Arun K. Measurement techniques for GHG emission from hydropower Reservoirs [J]. International Journal of Energy Science, 2012,2(6):156-163.
- [38] 马 娟,彭永臻,王 丽,等.温度对反硝化过程的影响以及 pH 值变化规律 [J]. 中国环境科学, 2008,28(11):1004-1008.
- [39] 吴耀国.地下水环境中反硝化作用 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2002,3(03):27-31.
- [40] Crosswell J R, Wetz M S, Hales B, et al. Air-water CO<sub>2</sub> fluxes in the microtidal Neuse River Estuary, North Carolina [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2012,117(C8): C08017.
- [41] Cole J J, Caraco N F, Kling G W, et al. Carbon dioxide supersaturation in the surface waters of lakes [J]. Science (New York, NY), 1994,265(5178):1568-1570.
- [42] 白玉涛,周 玉,赵 吉.内蒙古高原干涸湖泊反硝化及甲烷氧化细菌的群落分析 [J]. 中国环境科学, 2012,32(7):1293-1301.
- 作者简介：韩 洋(1988-),男,宁夏中卫人,南京信息工程大学硕士研究生,主要从事气候变化及应对方面的研究.发表论文 2 篇.