

# 玉渡山水库生长季温室气体排放特征及其影响因素<sup>\*</sup>

李红丽 杨 萌 张明祥 雷 霆 雷光春<sup>\*\*</sup>

(北京林业大学自然保护区学院, 北京 100083)

**摘 要** 为了探讨温带水库温室气体排放规律, 采用静态箱-色谱分析法, 研究了温带地区库龄 10 年内的北京玉渡山水库生长季 3 种温室气体  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  及  $\text{N}_2\text{O}$  排放特征, 及其影响因素。结果表明: 样地类型、测定月份与样地类型交互作用对 3 种温室气体通量影响极显著, 5 月消落带  $\text{CO}_2$  通量 ( $664.31 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 达到最大, 显著高于入库口和浅水区; 8 月消落带  $\text{CH}_4$  通量 ( $0.87 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 及  $\text{N}_2\text{O}$  通量 ( $3.05 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ) 最大; 8 月, 切除消落带样地地上植物后, 3 种温室气体通量均有所降低。 $\text{CO}_2$  通量与地下 5 cm 地温、氧化还原电位和水体总氮显著正相关, 与地上生物量和水体 pH 显著负相关;  $\text{CH}_4$  通量与地表温度、地上生物量、水体 pH 呈显著相关, 与水体总氮和水体铵态氮显著负相关;  $\text{N}_2\text{O}$  通量与水体总氮含量显著相关, 与水体 pH 显著负相关。采取平均估值法初步推测, 在生长季, 水库消落带、入库口及浅水区  $\text{CO}_2$  排放量依次为  $15960$ 、 $2160$ 、 $-70 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;  $\text{CH}_4$  排放量依次  $20.04$ 、 $-7.05$ 、 $14.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;  $\text{N}_2\text{O}$  排放量依次  $83.42$ 、 $3.79$ 、 $-1.54 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ; 表明消落带 3 种温室气体的排放量均较高, 为玉渡山水库 3 种温室气体排放的重点区域。

**关键词** 玉渡山水库; 温室气体排放; 环境因子; 相关性分析

**中图分类号** Q938 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2012)2-0406-07

**Characteristics and environmental determinants of greenhouse gas emissions from Yudushan Reservoir during growth season.** LI Hong-li, YANG Meng, ZHANG Ming-xiang, LEI Ting, LEI Guang-chun<sup>\*\*</sup> (College of Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(2): 406-412.

**Abstract:** Wetland can produce and store large amount of organic matters, playing a significant role in the global carbon and nitrogen cycles, and in particular, greenhouse gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$ ) fluxes. Most of the previous studies are focused on the greenhouse gas emissions from peat lands, lakes, and crop fields, but few are targeted on reservoirs, especially those located in temperate zone. In this study, three greenhouse gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , and  $\text{N}_2\text{O}$ ) fluxes and their environmental determinants at different locations (eulittoral zone, reservoir entrance, and shallow water zone) in Yudushan Reservoir of Beijing were measured by using static opaque chamber-GC technique during the growth season (May, August, and October) in 2009 and 2010. A great variation in the greenhouse gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , and  $\text{N}_2\text{O}$ ) fluxes was observed among the sampling locations, and this variation was affected by the combined effect of sampling location and sampling month. In May, the  $\text{CO}_2$  flux in the eulittoral zone reached the highest ( $664.31 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ), which was significantly higher than that at the reservoir entrance and in shallow water zone. In August, the  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes in the eulittoral zone was the highest ( $0.87 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  for  $\text{CH}_4$  and  $3.05 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  for  $\text{N}_2\text{O}$ ), but the fluxes of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  in the zone had somewhat decrease after the vegetations above the ground were removed. Pearson correlation analysis indicated that  $\text{CO}_2$  flux was significantly positively correlated with soil temperature and redox potential at 5 cm depth and water total nitrogen content but significantly negatively correlated with above-ground biomass and water pH,  $\text{CH}_4$  flux was significantly correlated with surface soil temperature, above-ground biomass, and water pH but negatively correlated with

<sup>\*</sup> 林业公益性行业科研专项(200804005)和北京林业大学新进教师科研启动项目(BLX2009-021)资助。

<sup>\*\*</sup> 通讯作者 E-mail: guangchun8099@gmail.com

收稿日期: 2011-07-23 接受日期: 2011-11-06

water total nitrogen and  $\text{NH}_4^+$  contents, while  $\text{N}_2\text{O}$  flux was significantly correlated with water total nitrogen content but negatively correlated with water pH. By the mean value estimation method, it was deduced that the total greenhouse gas emissions in the eulittoral zone, reservoir entrance, and shallow water zone during growth season were 15960, 2160 and  $-70 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  for  $\text{CO}_2$ , 20.04,  $-7.05$  and  $14.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  for  $\text{CH}_4$ , and 83.42, 3.79 and  $-1.54 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  for  $\text{N}_2\text{O}$ , respectively, suggesting that the eulittoral zone was the most important zone for the greenhouse gas emissions in the Yudushan Reservoir.

**Key words:** Yudushan Reservoir; greenhouse gas emission; environmental factor; correlation analysis.

由  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  及  $\text{N}_2\text{O}$  等温室气体排放加速以及浓度变化而导致的环境问题已日益受到全球关注(马安娜和陆健健,2008),与此相关的生态系统碳氮循环及收支已成为当前全球变化研究的核心内容之一(王德宣等,2008)。而湿地生态系统在全球气候变化中发挥着重要的作用,如湿地的碳存储约占全球碳存储量的 1/3 以上,同时湿地中甲烷的排放占全球的 20% 左右,对全球温室气体贡献达到了 15% (张涛和高大文,2008;Juutinen *et al.*, 2008);也有专家认为湿地也是大气  $\text{N}_2\text{O}$  排放的重要源, $\text{N}_2\text{O}$  对全球温室效应的贡献达到 5%。因此,研究湿地在全球气候变化中的作用,有必要研究 3 种温室气体的排放特征及影响因素。

对湿地 3 种温室气体的排放特征及其影响因素研究目前仍侧重于沼泽湿地(王德宣等,2005;宋长春等,2006;孙丽等,2006;杨继松等,2006)、湖泊(Duan *et al.*, 2005;王洪君等,2006;Wang *et al.*, 2006)及稻田(李香兰等,2008;张涛和高大文,2008)。随着水电清洁能源的认识(dos Santos *et al.*, 2006),水电开发和水利工程建设进程相应加快,水库温室气体排放越来越受关注(赵小杰等,2008),由于水库的碳氮的输入和输出监测存在一定难度,被称为“暗箱”区域(Sikar *et al.*, 2005),因此针对水库温室气体排放的过程和监测技术也是目前研究的热点(陈小燕等,2009;戴会超等,2010)。研究表明,水库是大气中  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  的重要来源,特别是热带地区,由于高温及大量植被淹没导致库底产生大量的温室气体(赵小杰等,2008),对于瑞士不同纬度的水库研究表明,春季和夏季 3 种温室气体通量均表现为排放状态,其中  $\text{CH}_4$  大多以冒泡的形式排出(Diem *et al.*, 2008),但是对于温带地区水库的温室气体排放研究仍较缺乏。

对于水库的温室气体排放机理和过程受多种因素的影响,在水库淹没初期, $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  会出现短暂

的排放高峰(Chen *et al.*, 2010),若忽略水库碳通量的空间异质性,水库年龄的影响,对于碳通量的估算将会有超过 25% 的错误偏差(Roland *et al.*, 2010)。因此,研究温带地区库龄小于 10 年的水库温室气体排放特征及与影响因素,能够全面分析水库温室气体排放问题,为全面估测水库在全球气候变化中的作用提供一定的技术支撑。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

玉渡山水库南沿后河,古城河河谷,西起北京市第二高峰海拔 2241 m 的海陀主峰,东至龙庆峡,面积  $100 \text{ km}^2$ ,境内海拔 580 ~ 1589 m。玉渡山水库于 2002 年建成,库龄在 10 年内。

### 1.2 样点设计

根据玉渡山水库的情况,于 2009—2010 年的植物生长季节(5 月 19 日,8 月 14 日,10 月 26 日)分别测定温室气体  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  及  $\text{N}_2\text{O}$  的通量对比观测。观测点位于玉渡山水库的入库口( $40^\circ 32' 793'' \text{N}$ ;  $115^\circ 53' 860'' \text{E}$ ),消落带( $40^\circ 32' 743'' \text{N}$ ;  $115^\circ 53' 785'' \text{E}$ )及浅水区( $40^\circ 33' 072'' \text{N}$ ;  $115^\circ 53' 832'' \text{E}$ )。入库口和浅水区一直保持淹水状态,水深分别约为 30 和 150 cm,消落带植物分布湿生植物较多,主要为艾蒿(*Artemisia argyi*)、黄花蒿(*Artemisia annua*)及东风菜(*Doellingeria scaber*)等物种(图 1),每个监测区点分别各设 3 个样点,样点间距 2 m 左右。

### 1.3 样品采集及分析

温室气体样品的采集采用静态箱暗箱法。对于入库口及浅水区采用水面漂浮箱,箱体放于轮胎上支撑,箱体为直径 30 cm,高 50 cm 的圆筒形不锈钢箱;消落带样点采用不锈钢陆地采样箱,分为底座和顶箱部分,底座长、宽和高分别为 50、50 和 20 cm,带有水面凹槽;顶箱长、宽和高均为 50 cm。箱体外壳罩白色保温层,避免箱体内气温变化过快。箱体

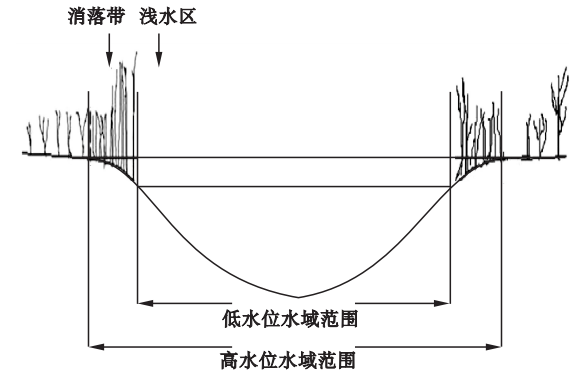


图 1 样点分布示意图  
Fig. 1 Location of sample sites

顶部有 3 个小孔,分别是聚四氟乙烯管(内径为 3 mm)连通的采气孔、风扇接线口和箱内温度探头接线口,箱内温度探头与显数温度计相连,便于测定箱内温度。箱体顶部装有小风扇,与 12 V 蓄电池相连,使箱内气体均匀。

消落带气体采集一般在 9:00—11:30 进行,采样前一天将采样箱底座压入土中 5 cm 深,外围踩实,采样时,先开启风扇。让箱内气体与采样点周围的空气充分混合 5 min,水封密封凹槽,立刻开启三通阀,用注射器采取背景值气样,气样量约为 500 mL,储存于气袋(大连光明化工研究设计院制造)中,随后每间隔 10 min 采集一次,共采集 4 次,完成一个样点的气体采集。随后,对于消落带样地,采用收割法将地上组织齐地表收集,重复气体采样过程,测定地上植物生物量鲜重,并将样品尽快带回实验室,于 80 ℃ 烘干,测量地上生物量干重,并将采集气体带回实验室测定气体样品。

采用 Agilent7890A 气象色谱仪测定样品 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 含量浓度变化,气体的通量分别用以下公式计算:

$$F = \rho \cdot \frac{V}{A} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{273}{273 + T} \cdot \frac{dC_t}{dt}$$

式中:  $F$  为被测气体通量 ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ );  $\rho$  为标准状态下的被测气体密度 ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ );  $V$  为采样箱内空

气体积 ( $\text{cm}^3$ );  $A$  为采样箱覆盖面积 ( $\text{cm}^2$ );  $P$  为采样点气压 (hPa);  $P_0$  为标准状态下的大气压 (hPa);  $T$  为采样时箱内平均气温 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $\frac{dC_t}{dt}$  为采样箱内被测气体的浓度变化率。

1.4 其他环境因子监测

在采样同时,用数字显示温度计测定地下 5 cm 地温,地表或水体表面温度,箱内气温及箱外气温,并用 HAC 便携式水质测定仪测定水体 pH、水体溶解氧 (DO) 和氧化还原电位,化学指标主要测定总氮、总磷、有机碳、硝态氮和铵态氮等。

1.5 数据分析

用 SPSS 17.0 统计分析软件进行 ANOVA 分析温室气体排放的时空特征,其中将月份和样地为固定因子,进行 two-way ANOVA 分析(显著性水平设为 0.05),并用 Pearson 相关分析环境因素与环境通量的关系,用 SigmaPlot 11.0 进行制图。

2 结果与分析

2.1 生长季温室气体排放的时空特征

统计分析表明,样地类型,生长季月份与样地类型的交互作用对 3 种温室气体通量均影响极显著,不同月份对 3 种温室气体通量影响却并不显著(表 1)。

不同月份及样地类型土壤-植物系统 3 种温室气体 CO<sub>2</sub> 通量、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 通量存在显著差异(图 2)。5 月消落带 CO<sub>2</sub> 通量达到最大,为 664.31  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,显著高于入库口和浅水区,其中浅水区的 CO<sub>2</sub> 通量小于 0,为 -7.79  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ; 8 月 CO<sub>2</sub> 通量规律与 5 月一致,但浅水区 CO<sub>2</sub> 通量大于 0; 10 月入库口 CO<sub>2</sub> 通量高于消落带和浅水区,而消落带的 CO<sub>2</sub> 通量小于 0(图 2A)。5 月,浅水区、入库口及消落带的 CH<sub>4</sub> 通量差异不显著,8 月消落带的 CH<sub>4</sub> 通量达到最大,为 0.87  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,CH<sub>4</sub> 通量显著高于浅水区的 0.46  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,而在 10 月,浅水区的 CH<sub>4</sub> 通量高于消落带,8 和 10 月的入库口

表 1 不同月份和样地类型下温室气体通量 Two-Way ANOVA 分析  
Table 1 Two-way ANOVA analysis of three greenhouse gas flux under different month and sample type

影响因素	月份		样地类型		月份×样地类型	
	$F_{2,18}$	$P$	$F_{2,18}$	$P$	$F_{4,18}$	$P$
二氧化碳通量 ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	1.9	0.16	502.1	<0.001	32.9	<0.001
甲烷通量 ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	1.2	0.31	436.8	<0.001	17.2	<0.001
氧化亚氮通量 ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	1.4	0.27	400.3	<0.001	16.7	<0.001

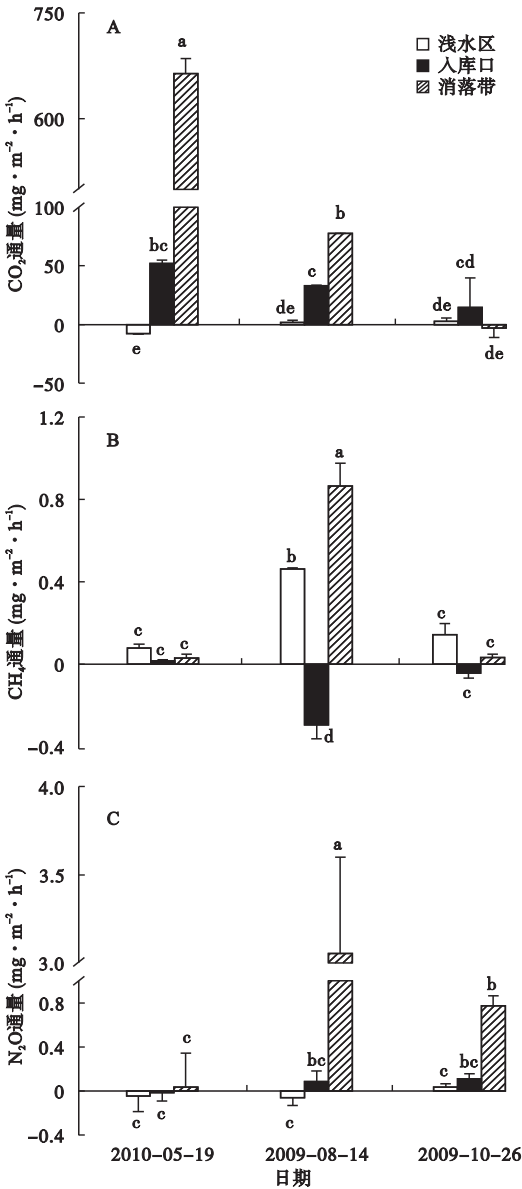


图2 不同月份及不同样地类型的3种温室气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O)通量

Fig.2 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O flux of different months and sample types

表2 植物地上组织对消落带温室气体排放的贡献

Table 2 Contribution of aboveground plants to the greenhouse gases flux

气体类型	时间	土壤-植物系统	土壤系统	植物地上部分通量
CO <sub>2</sub> 通量(mg·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	2010-5-17	664.31±8.39	680.76±113.73	-16.45
	2009-8-19	77.43±21.33	15.91±2.66	61.52
	2009-10-22	-2.75±0.14	-2.65±0.39	-0.10
CH <sub>4</sub> 通量(mg·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	2010-5-17	0.03±0.00	0.10±0.04	-0.07
	2009-8-19	0.87±0.11	0.38±0.03	0.48
	2009-10-22	0.03±0.02	0.07±0.06	-0.04
N <sub>2</sub> O通量(mg·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	2010-5-17	0.04±0.02	-0.10±0.02	0.13
	2009-8-19	3.06±0.54	0.97±0.23	2.09
	2009-10-22	0.77±0.09	0.21±0.08	0.56

CH<sub>4</sub>通量均小于0(图2B)。

5月,3类样地的N<sub>2</sub>O通量差异不显著,浅水区与入库口N<sub>2</sub>O通量均小于0;8和10月N<sub>2</sub>O通量规律一致,消落带N<sub>2</sub>O通量均显著高于入库口和浅水区,其中8月消落带N<sub>2</sub>O通量达到最大,为3.05 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>(图2C)。表明,3种温室气体排放通量随月份及样地类型存在显著差异。

2.2 植物地上组织对消落带3种温室气体通量的贡献

消落带样地去除地上组织处理对3种温室气体通量均有一定的影响。处理后,CO<sub>2</sub>通量5月略微升高,8月明显降低,而10月基本持平;处理后,5和10月CH<sub>4</sub>通量呈现升高趋势,分别为处理前的2倍和3倍;而8月却降低。N<sub>2</sub>O通量在5、8和10月均呈现下降趋势,但5月,处理后N<sub>2</sub>O通量小于0,由原来的排放转变为吸收(表2)。

2.3 生长季温室气体排放与其他环境因子的相关性

由表3可知,不同样地类型3种温室气体通量与各环境因子相关性存在一定差异。CO<sub>2</sub>通量与地下5 cm地温、水体氧化还原电位、水体总氮含量均呈显著相关,而与生物量和水体pH显著负相关;CH<sub>4</sub>通量与地表温度、地上生物量、水体pH显著相关,而与水体总氮和水体铵态氮呈显著负相关;N<sub>2</sub>O通量仅与水体总氮含量呈显著相关,与水体pH显著负相关(表3)。

2.4 玉渡山水库区域生长季温室气体排放量评估

根据生长季玉渡山水库区域消落带、入库口及浅水区温室气体的排放通量,通过分时段计算可以初步估算得到玉渡山水库3个不同区域3种温室气体排放总量。

生长季节(4—11月)玉渡山水库消落带、入库



表 3 生长季温室气体通量与各环境指标的 Pearson 相关性  
Table 3 Pearson correlation analysis between three greenhouse gases flux in growing season and environmental factors

样地类型	环境因素	CO <sub>2</sub> 通量	CH <sub>4</sub> 通量	N <sub>2</sub> O 通量
消落带、入库口 及浅水区	地下 5 cm 地温	0.692 *	0.349	-0.009
	地表温度	0.134	0.694 *	0.209
	箱内气温	0.308	0.644	0.199
	大气温度	0.273	0.648	0.244
消落带	地上生物量	-0.787 *	0.716 *	0.658
浅水区及入库口	水体 pH	-0.542 *	0.720 **	-0.498 *
	DO	-0.192	-0.254	0.065
	氧化还原电位 ORP	0.488 *	-0.416	0.342
	水体总氮	0.518 *	-0.496 *	0.504 *
	水体总磷	-0.305	0.211	0.157
	水体总有机碳	0.018	-0.138	0.092
	水体硝态氮含量	0.414	0.061	-0.121
	水体铵态氮含量	0.217	-0.539 *	0.418

\*\*  $P < 0.01$ , \*  $P < 0.05$ 。

表 4 生长季各个样点的 3 种温室气体 4—11 月通量估算化  
( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )  
Table 4 Estimation of three greenhouse gases in the growing season (April–November)

样点	CO <sub>2</sub> 通量	CH <sub>4</sub> 通量	N <sub>2</sub> O 通量
消落带	15960	22.04	83.42
入库口	2160	-7.05	3.79
浅水区	-70	14.81	-1.54

口、浅水区 3 个区域 CO<sub>2</sub> 排放量依次为 15960、2160、-70  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，呈现出消落带 CO<sub>2</sub> 气体排放量最大，入库口次之，浅水区最小，且为负值。CH<sub>4</sub> 排放量分别为 20.04、-7.05、14.8  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，呈现出消落带 CH<sub>4</sub> 气体排放量最大，浅水区次之，入库口 CH<sub>4</sub> 气体通量最小为负值。N<sub>2</sub>O 的排放量分别为 83.4、3.79、-1.54  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。因此，玉渡山水库温室气体排放组成与水库区域有关。

3 讨 论

3.1 CO<sub>2</sub> 季节变化与环境因子的相关性

玉渡山水库 CO<sub>2</sub> 排放随样地类型及时间呈现不同的特征，5—10 月，3 种样地类型大多表现为 CO<sub>2</sub> 的排放，5 月消落带和入库口 CO<sub>2</sub> 排放较强。这与其他研究结果一致，而对于小兴安岭森林沼泽研究表明，CO<sub>2</sub> 的排放大多集中在夏季（牟长城等，2010），可能与湿地类型不同有关。消落带水位不断变化，湿地植物和微生物种类相对较为丰富，5 月，温度逐渐升高，呼吸旺盛，因而排放较为剧烈。8

和 10 月，由于降水充足，样地存在一定的积水，土壤中植物残体、根系及有机物分解受到限制，因此，其 CO<sub>2</sub> 通量相对较低（王德宣等，2008）。

植物能够通过根系分泌物为土壤微生物提供底质，刺激土壤微生物活性，促进微生物呼吸，因此植物对土壤-植物系统 CO<sub>2</sub> 的排放起到关键性的作用（卢妍等，2007），消落带去除植物地上组织处理后，8 月，CO<sub>2</sub> 的通量显著降低，表明植物对植物-土壤系统的 CO<sub>2</sub> 排放贡献大，这与其他研究结果一致（卢妍等，2007），而在 5 月对植物刺激较大，反而刺激其有短暂的升高，10 月植物呼吸相对减弱，从而导致处理前后 CO<sub>2</sub> 的通量基本持平。消落带大型植物地上生物量与 CO<sub>2</sub> 排放通量呈显著负相关，这与其他湖泊水陆交界带规律一致（Xing *et al.*，2006）。

CO<sub>2</sub> 通量与地下 5 cm 地温显著相关，可能由于湿地植物大多为浅根系，根系主要分布在土壤上层，土壤温度的提高使土壤根系及微生物分解，使水库湿地 CO<sub>2</sub> 排放与地下 5 cm 温度显著相关。CO<sub>2</sub> 排放与水体 pH 呈显著负相关，当水体 pH 较高时，水体中游离的 CO<sub>2</sub> 转化为碳酸盐，水体中的 CO<sub>2</sub> 分压降低，导致水体中溶解的 CO<sub>2</sub> 处于不饱和状态，促进水体中的 CO<sub>2</sub> 进入到水体中（赵小杰等，2008）。水体中总氮含量在一定程度上能促进 CO<sub>2</sub> 的排放（Stadmark & Leonardson，2005），这与其他研究一致（嵇晓燕等，2006）。

3.2 CH<sub>4</sub> 季节变化与环境因子的相关性

玉渡山水库消落带和浅水区均为 CH<sub>4</sub> 排放源，且在 8 月份达到最大值，而入库口几个月份均表现为 CH<sub>4</sub> 的汇。这与其他类型湿地研究结果类似（Duan *et al.*，2005），8 月，温度较高，降水量较大，水位的频繁变化，致使压力改变，在缺氧的条件下，CH<sub>4</sub> 产生菌活性增强，同时浅水区及消落带的维管束植物根系分解加快，因此导致 CH<sub>4</sub> 排在 8 月达到峰值。而在入库口水面流动性较强，水体中 DO 含量较高，产生的 CH<sub>4</sub> 可能被生活在有氧-缺氧临界面的 CH<sub>4</sub> 氧化菌消耗掉（赵小杰等，2008），导致其排放与基质溶解氧浓度呈显著负相关（Huttenen *et al.*，2006），这可能也是入库口 CH<sub>4</sub> 通量较低的原因。研究表明，CH<sub>4</sub> 通量的异质性可能主要由不同季节各区域的环境因素差异性所致（周旺明等，2006）。

由于湿地植物在甲烷排放过程中起着提供底物及传输 CH<sub>4</sub> 和 O<sub>2</sub> 的作用，产甲烷菌主要以植物的

根系分泌物和脱落物为底物(段晓男等,2005),而且此过程产出的  $\text{CO}_2$  是  $\text{CH}_4$  产生的重要基质;较强的光合作用必然增大根系分泌物的产生,从而影响  $\text{CH}_4$  的产生与排放,湿地  $\text{CH}_4$  排放通量与生态系统净生产力(NEP)间存在密切的相关关系,地上生物量越高, $\text{CH}_4$  排放越多。消落带去除植物地上部分处理后,8月植物对  $\text{CH}_4$  排放贡献较大,由于湿地植物多为维管束植物,为甲烷菌提供底物,而且维管束植物具有导管,增加  $\text{CH}_4$  从底物中的排放(卢妍等,2007),5月,植物处理后,对植物刺激作用较大,导致植物反而有短暂的排放峰值。这也从侧面印证了  $\text{CH}_4$  排放与湿地植物生物量显著相关(周旺明等,2006;Cheng *et al.*,2007)。

$\text{CH}_4$  排放通量与地表温度呈显著相关,主要因为温度升高,增强了产甲烷菌的活性,导致  $\text{CH}_4$  排放升高。而水体酸碱直接抑制了产甲烷菌的活性,从而  $\text{CH}_4$  气体通量与 pH 显著相关,当水体 pH 在 6.9~7.1 时,  $\text{CH}_4$  产生速率最大(张涛和高大文,2008)。水体总氮及铵态氮含量对甲烷菌的活性有一定的抑制作用(于芳芳和伍健东,2008;祖波等,2008),这也证明了  $\text{CH}_4$  排放通量与总氮及铵态氮呈显著负相关(张丽华等,2007)。

### 3.3 $\text{N}_2\text{O}$ 季节变化与环境因子的相关性

玉渡山水库  $\text{N}_2\text{O}$  排放呈现不同时空异质性,消落带和入库口均表现  $\text{N}_2\text{O}$  的源,且在 8 月排放最高,浅水区在 5 和 8 月均表现为  $\text{N}_2\text{O}$  的汇,研究表明,太湖流域大部分时间为  $\text{N}_2\text{O}$  的源,小部分时间为  $\text{N}_2\text{O}$  的汇(吴平等,2007)。而对于三峡水库不同植被类型样地生长季均为  $\text{N}_2\text{O}$  的源(Chen *et al.*,2010),这也证实了水库  $\text{N}_2\text{O}$  的排放存在较强的异质性。由于  $\text{N}_2\text{O}$  的产生需要一定的厌氧条件,浅水区和入库口积水相对较深,DO 含量相对较为贫乏,使反硝化作用较为彻底,从而转化为  $\text{N}_2$ ,因此可能其排放较弱。

消落带植物地上部处理后,各个月份规律一致,表现为  $\text{N}_2\text{O}$  排放显著降低。 $\text{N}_2\text{O}$  的产生涉及到复杂的转化,水体的 pH 越大, $\text{N}_2\text{O}$  的产生则较低,这印证了其与水体 pH 呈显著负相关。氮元素为  $\text{N}_2\text{O}$  通量最终根本来源,因此两者呈现显著相关性(Teiter & Mander,2005;张丽华等,2007;Wu *et al.*,2009)。

### 3.4 玉渡山水库生长季排放量

对生长季节(4—11月)玉渡山水库消落带、入库口及浅水区 3 种温室气体的通量计算表明,消落

带  $\text{CO}_2$  排放最大,消落带及浅水区均为  $\text{CH}_4$  气体的排放源,入库口为  $\text{CH}_4$  气体排放的汇。消落带和入库口为  $\text{N}_2\text{O}$  气体排放的源,浅水区为  $\text{N}_2\text{O}$  的汇。表明,由水到陆过渡的消落带 3 种温室气体通量均最大,这与湖泊区域的水陆过渡带 3 种温室气体通量较高结论一致(王洪君等,2006)。除了消落带区域,浅水区和入库口  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  通量存在一定的源汇变化,表明玉渡山水库对主要引起全球气候变化 3 种温室气体的贡献较低,这与其他研究结论一致(Diem *et al.*,2008)。由于本研究样地类型仅限 3 种,取样时间没有涉及每个月份,因此探讨水库的源汇问题仍需要进一步的系统研究。

### 参考文献

- 陈小燕,戴会超,蒋定国,等. 2009. 水库温室气体排放过程中若干问题的研究. 水电能源科学, (5): 20-28.
- 戴会超,李 华,郑铁刚. 2010. 水库水域生态系统温室气体排放测量技术. 中国工程科学, (9): 20-28.
- 段晓男,王效科,欧阳志云. 2005. 维管植物对自然湿地甲烷排放的影响. 生态学报, 25(12): 3375-3382.
- 嵇晓燕,崔广柏,杨龙元,等. 2006. 太湖水-气界面  $\text{CO}_2$  交换通量观测研究. 环境科学, 27(8): 1479-1486.
- 李香兰,马 静,徐 华,等. 2008. 水分管理对水稻生长期  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放季节变化的影响. 农业环境科学学报, 27(2): 535-541.
- 卢 妍,宋长春,王毅勇,等. 2007. 植物对沼泽湿地生态系统  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  排放的影响. 西北植物学报, 27(11): 2306-2313.
- 马安娜,陆健健. 2008. 湿地生态系统碳通量研究进展. 湿地科学, 6(2): 116-123.
- 牟长城,刘 霞,孙晓新,等. 2010. 小兴安岭阔叶林沼泽土壤三种温室气体的排放及影响因子. 生态学报, 30(17): 4598-4608.
- 宋长春,张丽华,王毅勇,等. 2006. 淡水沼泽湿地  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量年际变化及其对氮输入的影响. 环境科学, 27(12): 2369-2375.
- 孙 丽,宋长春,黄 耀. 2006. 沼泽湿地  $\text{N}_2\text{O}$  通量特征及  $\text{N}_2\text{O}$  与  $\text{CO}_2$  排放间的关系. 中国环境科学, 26(5): 532-536.
- 王德宣,宋长春,王毅勇,等. 2008. 若尔盖高原沼泽湿地与草地二氧化碳通量的比较. 应用生态学报, 19(2): 285-289.
- 王德宣,宋长春,王跃思,等. 2005. 若尔盖高原泥炭沼泽湿地  $\text{CO}_2$  呼吸通量特征. 生态环境, 14(6): 880-883.
- 王洪君,王为东,卢金伟,等. 2006. 太湖湖滨带秋、冬季  $\text{CH}_4$  排放特征及其影响因素初步研究. 湿地科学, 4(1): 21-28.
- 吴 平,李香华,逢 勇. 2007. 太湖水-气界面温室气体  $\text{N}_2\text{O}$  日通量变化特征. 工业安全与环保, 33(8): 49-51.

- 杨继松, 刘景双, 王金达, 等. 2006. 三江平原生长季沼泽湿地  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  排放及其影响因素. 植物生态学报, **30**(3): 432–440.
- 于芳芳, 伍健东. 2008. 铵氮对厌氧颗粒污泥产甲烷菌的毒性研究. 化学与生物工程, **25**(4): 75–78.
- 张涛, 高大文. 2008. 稻田  $\text{CH}_4$  排放研究进展. 湿地科学, **6**(2): 130–135.
- 张丽华, 宋长春, 王德宣, 等. 2007. 外源氮对沼泽湿地  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  通量的影响. 生态学报, **27**(4): 1442–1449.
- 赵小杰, 赵同谦, 郑华, 等. 2008. 水库温室气体排放及其影响因素. 环境科学, **29**(8): 2377–2384.
- 周旺明, 王金达, 刘景双. 2006. 自然沼泽湿地生物量与  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  排放量关系初步研究. 中国科学院研究生院学报, **23**(6): 736–743.
- 祖波, 祖建, 周富春, 等. 2008. 产甲烷菌的生理生化特性. 环境科学与技术, **31**(3): 5–7, 51.
- Chen H, Yuan XZ, Gao YH, *et al.* 2010. Nitrous oxide emissions from newly created littoral marshes in the drawdown area of the Three Gorges Reservoir, China. *Water, Air, and Soil Pollution*, **211**: 25–33.
- Cheng XL, Peng RH, Chen JQ, *et al.* 2007.  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from *Spartina alterniflora* and *Phragmites australis* in experimental mesocosms. *Chemosphere*, **68**: 420–427.
- Diem T, Koch S, Schwarzenbach S, *et al.* 2008. Greenhouse gas emissions ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$ ) from perialpine and alpine hydropower reservoirs. *Biogeosciences Discussion*, **5**: 3699–3736.
- dos Santos MA, Rosa LP, Sikar B, *et al.* 2006. Gross greenhouse gas fluxes from hydro-power reservoir compared to thermo-power plants. *Energy Policy*, **34**: 481–488.
- Duan XN, Wang XK, Mu YJ, *et al.* 2005. Seasonal and diurnal variations in methane emissions from Wuliangsu Lake in arid regions of China. *Atmospheric Environment*, **39**: 4479–4487.
- Huttenen JT, Vaisanen TS, Hellsten K, *et al.* 2006. Methane fluxes at the sediment-water interface in some boreal lakes and reservoirs. *Boreal Environment Research*, **11**: 27–34.
- Juutinen S, Rantakari M, Kortelainen P, *et al.* 2008. Methane dynamics in different boreal lake types. *Biogeosciences Discussion*, **5**: 3457–3496.
- Roland F, Vidal LO, Pacheco FS. 2010. Variability of carbon dioxide flux from tropical (Cerrado) hydroelectric reservoirs. *Aquatic Sciences-Research Across Boundaries*, **72**: 283–293.
- Sikar E, Santos MA, Matvienko B, *et al.* 2005. Greenhouse gases and initial findings on the carbon circulation in two reservoirs and their watersheds. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie*, **7**: 1–4.
- Stadmark J, Leonardson L. 2005. Emissions of greenhouse gases from ponds constructed for nitrogen removal. *Ecological Engineering*, **25**: 542–551.
- Teiter S, Mander U. 2005. Emission of  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , and  $\text{CO}_2$  from constructed wetlands for wastewater treatment and from riparian buffer zones. *Ecological Engineering*, **25**: 528–541.
- Wang HJ, Wang WD, Yin CQ, *et al.* 2006. Littoral zones as the hotspots of nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ ) emission in a hyper-eutrophic lake in China. *Atmospheric Environment*, **40**: 5522–5527.
- Wu J, Zhang J, Jia WL, *et al.* 2009. Relationships of nitrous oxide fluxes with water quality parameters in free water surface constructed wetlands. *Science in China Series B: Chemistry*, **52**: 652–661.
- Xing YP, Xie P, Yang H, *et al.* 2006. The change of gaseous carbon fluxes following the switch of dominant producers from macrophytes to algae in a shallow subtropical lake of China. *Atmospheric Environment*, **40**: 8034–8043.

---

**作者简介** 李红丽,女,1980年生,博士,副教授,主要从事湿地生态学研究。E-mail: lhlred@gmail.com

**责任编辑** 李凤芹

---