

DOI: 10.5846/stxb201501120087

盛宣才¹, 吴明^{1,*}, 邵学新¹, 李长明², 梁雷², 叶小齐¹

Sheng X C, Wu M, Shao X X, Li C M, Liang L, Ye X Q. Effects of simulated water levels on diurnal variation in the emission of three greenhouse gases in reed wetlands in summer. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(15): - .

模拟水位变化对杭州湾芦苇湿地夏季温室气体日通量的影响

盛宣才¹, 吴明^{1,*}, 邵学新¹, 李长明², 梁雷², 叶小齐¹

1 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 国家林业局杭州湾湿地生态系统定位观测研究站, 杭州 310036

2 杭州师范大学生命与环境科学学院, 杭州 310036

摘要: 水位是影响湿地温室气体排放的重要因子。采用静态箱-气相色谱法研究了模拟条件下不同水位(0cm、5cm、10 cm 和 20 cm)对芦苇湿地温室气体(CO_2 、 CH_4 、 N_2O)夏季昼夜通量变化的影响。结果表明, 1) 4 种不同水位 CO_2 通量日变化均表现为昼低夜高, 且白天为汇, 夜间为源, 整体均表现为 CO_2 的汇; 不同水位 CH_4 通量日变化则均表现为昼高夜低, 且整体上均表现为 CH_4 的源; N_2O 通量总体上水淹后均表现为昼高夜低而 0cm 水位表现为昼低夜高; 2) 随着水位的增加 CH_4 和 CO_2 平均通量呈现先增加后降低的趋势, 且 10cm 水位下 CH_4 和 CO_2 平均通量最高, N_2O 通量则在 5cm 水位最高; 3) 通过相关性和主成分分析表明, 气温、水温是土壤 CH_4 、 N_2O 通量日变化的主导因子, 而土壤温度是 CO_2 日变化通量的主导因子, 同时, 土壤 pH、Eh 及水体 pH、Eh 是 CO_2 通量日变化的重要因子之一。

关键词: 水位; 温室气体; 日变化; 温度; pH; Eh

Effects of simulated water levels on diurnal variation in the emission of three greenhouse gases in reed wetlands in summer

SHENG Xuancai¹, WU Ming^{1,*}, SHAO Xuexin¹, LI Changming², LIANG Lei², YE Xiaoqi¹

1 Wetland Ecosystem Research Station of Hangzhou Bay, State Forestry Administration, Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 310036, China

2 College of Life and Environment Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310036, China

Abstract: Water level affects greenhouse gas fluxes in wetlands. A static chamber-gas chromatographic technique was used to study the release of three greenhouse gases, CO_2 , CH_4 , and N_2O at simulated water levels (0, 5, 10, and 20 cm) of reed wetlands in the Hangzhou Bay area. The results indicated that, 1) the CO_2 flux was higher at night and lower during the day—acting as sink during daytime and source at night—with a net flux as sink of CO_2 irrespective of water level. CH_4 was lower at night and higher during the day with a net flux as source of CO_2 . N_2O flux was lower at night but higher during the day, except at 0 cm; 2) the CH_4 flux and the CO_2 flux increased, followed by a decrease, with increasing water level. The water levels for the highest average fluxes were 10 cm for CH_4 and 5 cm for CO_2 ; and 3) correlation and principal component analysis showed that water temperature was the dominant factor for the daily variation in soil CH_4 and N_2O flux, and soil temperature was the dominant factor for the daily variation in CO_2 flux. Meanwhile, soil pH, soil Eh, water pH, and water Eh were all important factors for the variation in CO_2 flux.

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201404305, 201404210); 中国林科院基本科研业务费专项(CAFYBB2014MA002); “十二五”国家科技支撑计划专题(2012BAC13B02-2)

收稿日期: 2015-01-12; 修订日期: 2015-06-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hangzhoubay@126.com

Key Words: Water level; Greenhouse gases; diurnal variation; temperature; pH; Eh

近年来,CO₂、CH₄和N₂O作为大气中三种主要的温室气体,越来越受到科学研究的重视。而湿地是一种水陆相互作用形成的特殊自然综合体,是三种温室气体(CO₂、CH₄和N₂O)的重要的源或汇^[1-2]。土壤、植被、水文是湿地生态系统中最重要三大因子,其中水位波动是土壤中有机碳循环过程和温室气体排放的重要影响因素^[3-4]。一方面,水位通过影响水体的氧化还原电位与溶解氧浓度^[5],进而改变微生物种类与活性^[6],从而影响温室气体的排放;另一方面,水位是通过影响水生植物的分布和生长而影响温室气体的传输过程^[7-8]。目前,关于水位波动对温室气体的影响研究已有很多^[9-13],但仍尚未明确。例如万忠梅^[14]通过模拟发现CH₄排放通量随水位增加呈显著增加趋势,而丁维新等^[9]研究认为CH₄排放通量随水位增加呈先增加后降低趋势。因此,水位对温室气体的影响还需要进一步探究。

杭州湾湿地目前不断地被围垦利用,其中围垦区80%以上面积由沼泽、池塘和浅水滩构成,平均水深维持在0.5m左右。此外,目前围垦区高等水生植物以芦苇(*Phragmites australis*)为主,而芦苇是富集营养化水体湿地修复和人工湿地的代表性植物,同时也是土壤温室气体排放重要的传输者^[15]。目前关于杭州湾湿地方面只研究了自然滩涂芦苇湿地的温室气体排放^[16],而围垦区尤其是不同水位波动下的温室气体排放尚不清楚。因此,本文通过选取杭州湾围垦区芦苇湿地的土壤,采用室内盆栽模拟试验,研究不同水位芦苇湿地温室气体CO₂、CH₄和N₂O排放通量的昼夜变化,着重探讨包括温度、水位在内的环境因素在昼夜变化尺度上对土壤温室气体排放通量的影响,从而为实施杭州湾围垦湿地低排放生态恢复工程提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

杭州湾位于浙江省东部,西接钱塘江,东至东海,呈喇叭口形状,属河口海湾(见图1)。气候为北亚热带季风气候,四季分明,年均气温16℃,年均降水量1273 mm,日照2038 h,无霜期244 d。2014年7月气温27.2—34.5℃,月降水量129 mm,月平均风速1.8m/s,8月气温为25.3—31.8℃,月降水量136 mm,月平均风速1.5m/s。

1.2 实验设计及样品采集

2013年12月,挖取杭州湾围垦区芦苇湿地0—30cm土壤运回杭州湾生态站进行风干混合备用。2014年3月初,在杭州湾生态站境内采集芦苇幼苗后在常温下预培养1个月。同时将事先备好的土壤,装入高60 cm、内径25cm的PVC特制钵钵(顶部带有水槽,水槽宽度3cm),4月份移植到PVC特制钵钵里,每钵移栽大小一致的芦苇2—3株,平均株高30cm。移栽7 d、待芦苇植株生长稳定后,模拟围垦区芦苇分布的水位梯度,水位梯度为0cm、5cm、10cm、20cm,每个处理4个重复。同时每隔一天灌水以维持水位,加水取自当地的原位湖水,水的pH为8.50,盐度为1.95‰。实验采用静态明箱-气相色谱法采集温室气体。静态箱为直径30cm,高100cm。顶箱中部设置一个3cm长的硅胶管作为采气管道(外径为6mm,内径为4mm),同时设置一根短硅胶管(50cm)连接箱体内外大气,以保持箱体内外压强的一致(见图2)。日变化采样时间为2014年7月15—16日和8月16—17日。早上06:00开始采样,每间隔4 h采样一次,每个观测点罩箱30 min,罩箱后立即采集第一个气体样品,之后每隔10 min采集一次,30 min内共采集4个气体样品。用IQ150pH计记录水体温度、pH、Eh以及5 cm处的土壤温度、pH和Eh。同时测定了7月、8月不同水位芦苇的株数和株高(见表1)



图1 采样区地理位置

Fig.1 Location of study area

1.3 分析方法

采集的温室气体采用 Agilent 6820 气相色谱仪检测,甲烷检测器为 FID,载气为氮气,流速 30ml /min,燃气为氢气,流速 30 ml/ min,助燃气为空气,流速为 400 ml/min,检测器温度为 200℃,分离柱温度为 55℃。

温室气体排放通量的计算公式为^[17]:

$$F=\frac{M}{V} \cdot \frac{dc}{dt} \cdot H \cdot \frac{273}{273+T}$$

式中, $F[\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}]$ 为温室气体排放通量(正值表示气体排放到大气,负值表示气体的吸收); $M(\text{g})$ 为温室气体的摩尔质量; $V(\text{L})$ 为标准状态下 1mol 温室气体的体积; dc/dt 为采样期间静态箱内温室气体的浓度变化率; $H(\text{m})$ 为静态箱高度; $T(^{\circ}\text{C})$ 为静态箱内的平均温度。

1.4 数据统计与分析方法

使用 Excel 软件、SPSS18.0 软件和 origin 软件进行数据处理及统计分析,所有数据使用单因素方差分析, LSD 法显著性检验($p<0.05$),主成分分析和 pearson 相关性分析数据

均采用 7 月和 8 月取样测量值,并在 0.05 水平上进行显著性分析。

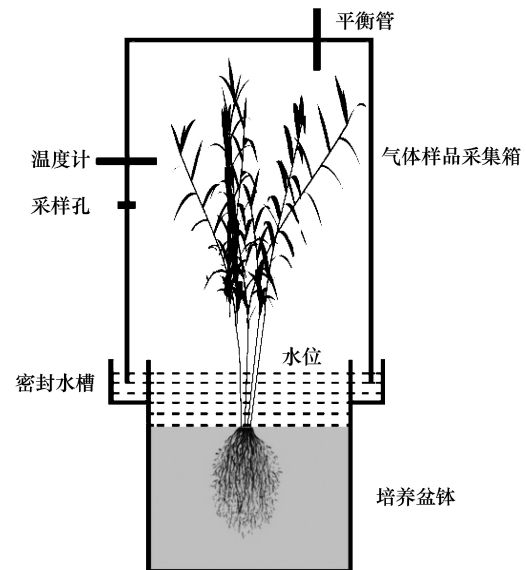


图 2 温室气体采集装置

Fig.2 A mesocosm system for measurement of greenhouse gases

表 1 7 月和 8 月不同水位芦苇株数、株高

Table 1 Ramets number and shoot height of the reed plants at different water level in July and August

时间 Time 水位 Water level	7 月 July		8 月 August	
	株数 Ramets number	株高/m Plant height	株数 Ramets number	株高/m plant height
0cm	8±2.16	0.82±0.12	12±3.77	1.10±0.07
5cm	8±2.87	0.75±0.23	13±3.86	1.03±0.23
10cm	7±2.58	0.83±0.32	11±1.12	1.13±0.03
20cm	9±1.5	0.83±0.19	13±0.24	1.18±0.37

2 结果与分析

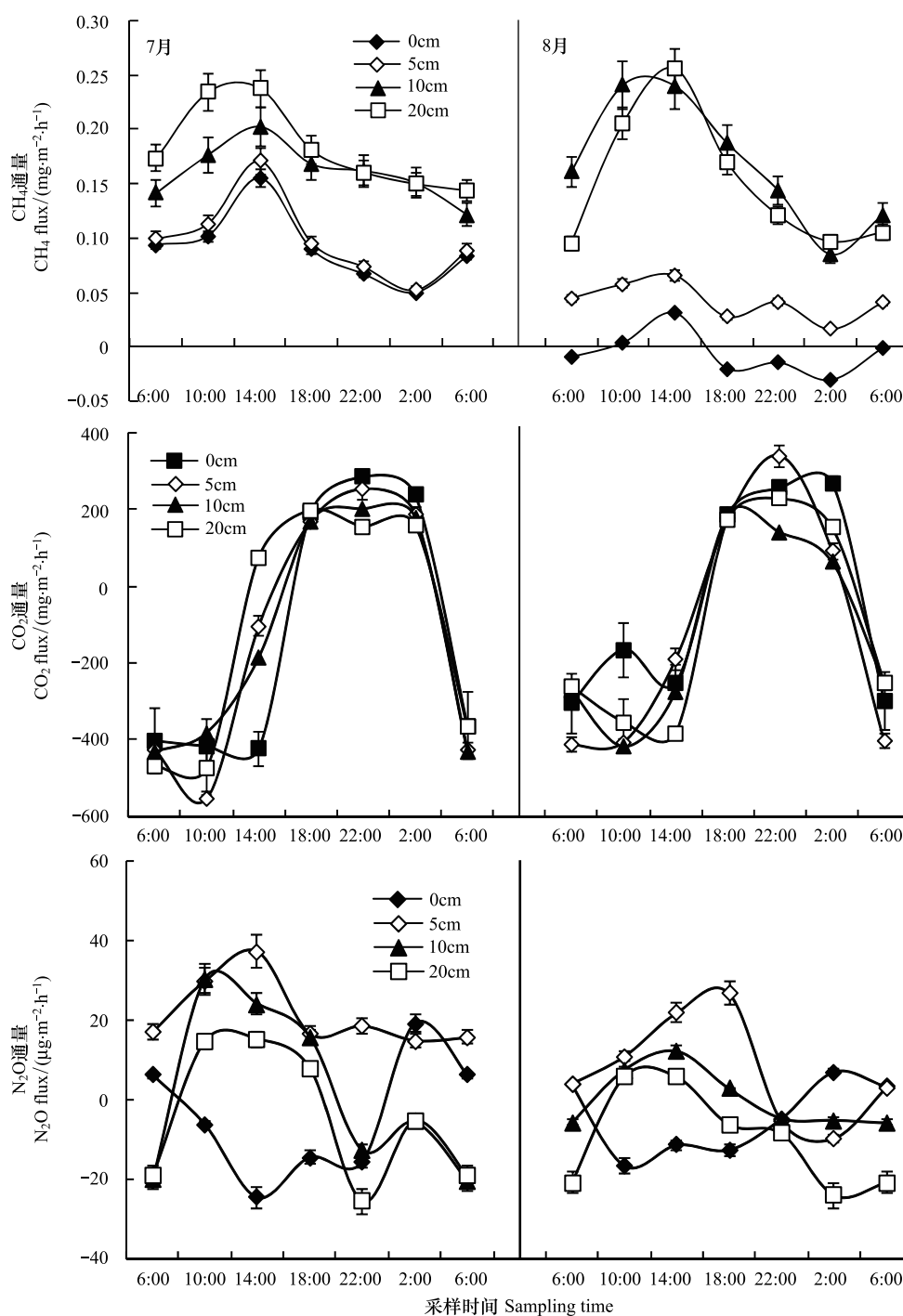
2.1 不同水位温室气体通量日变化规律

4 种不同水位梯度下三种温室气体(CH_4 、 CO_2 、 N_2O)表现出不一样的昼夜变化规律,且昼夜差异较大(见图 3)。对 CH_4 而言,除 8 月 0cm 水位表现为微弱的汇外,其他三个水位梯度都基本呈现 CH_4 的源,并且随着水位的加深, CH_4 排放先升高后降低。不同水位甲烷排放日动态基本呈单峰模式,14:00 为排放高峰,02:00 为排放低峰。对于 CO_2 而言,7 月和 8 月四种水位梯度皆表现出昼低夜高的规律,并且白天 CO_2 呈现吸收状态,夜晚 CO_2 呈现排放状态。且均表现为上午 10:00 左右为 CO_2 吸收高峰,晚上 10:00 左右为 CO_2 排放高峰,而 0cm 水位表现为 02:00 为 CO_2 排放高峰,早上 06:00 为吸收高峰。总体上,不同水位平均 CO_2 通量表现 7 月大于 8 月。对于 N_2O 而言,7 月和 8 月四种水位梯度总体上均表现为微弱的排放或吸收状态,且在不同时段表现出不一样的变化,其中 0cm 水位基本表现出吸收状态,除了早上 06:00 和凌晨 02:00 有少量的排放外,而 5cm 水位、10cm 水位、20cm 水位在白天皆呈现出排放状态,在夜间则呈现吸收状态。

2.2 土壤、水体等环境因素与不同水位 CH_4 、 CO_2 、 N_2O 通量关系

2.2.1 土壤、水体等环境因素变化

在测量水位 CH_4 、 CO_2 、 N_2O 通量日变化的同时同步测定了气温、土壤温度 5cm 温度、pH、Eh 以及水体温

图3 不同水位 CH_4 、 CO_2 、 N_2O 通量日变化Fig.3 Diurnal Variation of CH_4 、 CO_2 and N_2O flux at different water levels

度、pH、Eh 等一些环境因素变化(见图4、图5),由于0cm水位是未淹水的,因此这里就没有0cm水位的水体温度pH、Eh。测定结果显示,总体上7月和8月环境因子表现出一致的昼夜变化。气温由于受太阳辐射的影响因而昼夜温差较大,白天气温较高,其中7月在29.2—39.4℃范围内波动,日间平均气温为34.6℃;夜间气温在28.0—30.2℃范围内波动,夜间平均气温为28.9℃。昼夜气温差可达差可达到5.5℃。8月气温在22.0—39.2℃范围内波动,日间平均气温为31.4℃;夜间气温在22.0—26.2℃范围内波动,夜间平均气温为24.3℃。昼夜气温差可达差可达到7.1℃。水温24h内波动受气温影响也存在一定的差异,但差异不显著($p>0.05$);

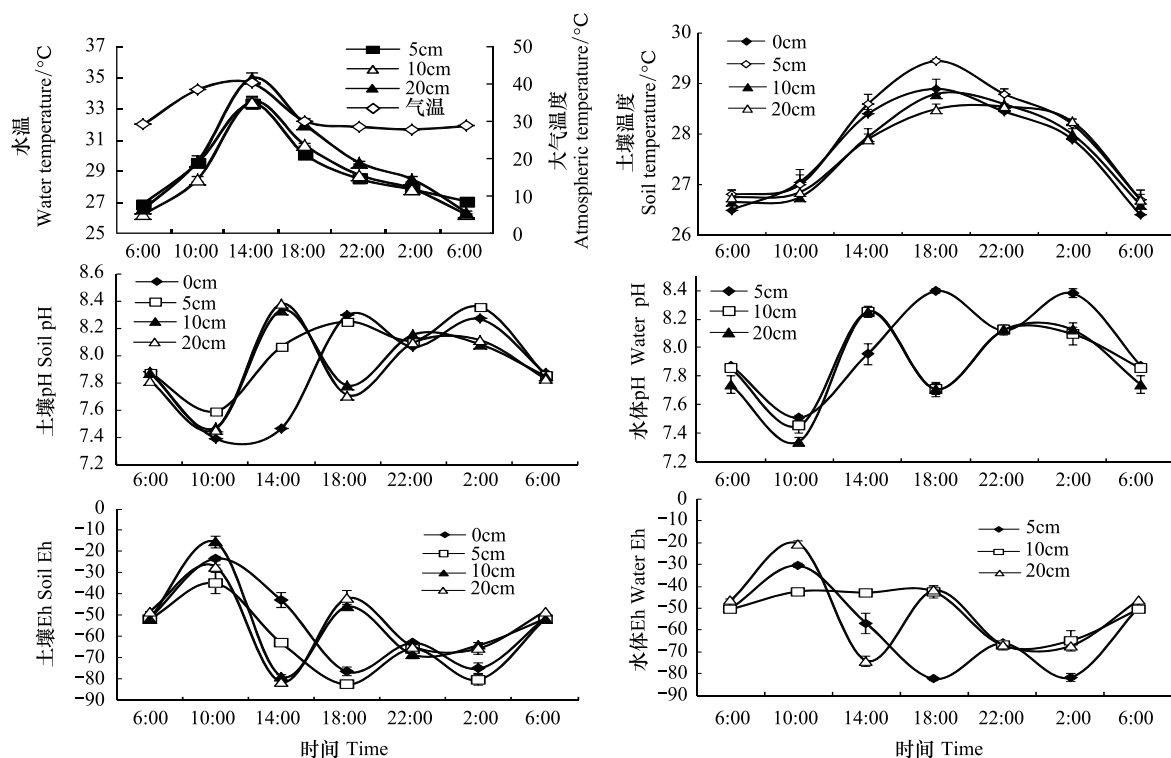


图4 7月不同水位环境因子昼夜变化

Fig.4 Diurnal Variation of environmental factors at different water levels in July

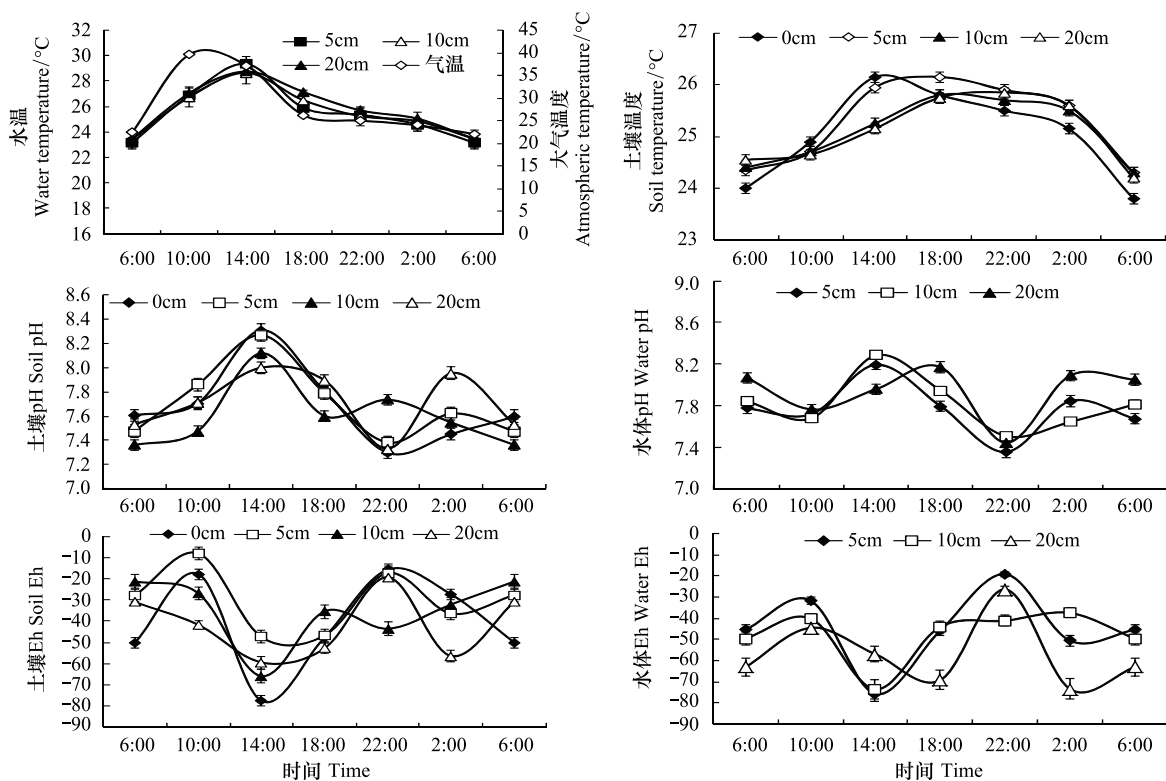


图5 8月不同水位环境因子昼夜变化

Fig.5 Diurnal Variation of environmental factors at different water levels in August

其中 7 月 5cm 水位平均水温为 29.1℃, 10cm 水位平均水温为 28.8℃, 20cm 水位平均水温为 29.7℃; 8 月 5cm 水位平均水温为 25.5℃, 10cm 水位平均水温为 25.6℃, 20cm 水位平均水温为 25.8℃。7 月和 8 月不同水位土壤 Eh 以及水体的 Eh 昼夜变化也表现较为一致的趋势, 总体上不同水位土壤以及水体 Eh 值从早上 6:00 开始先是缓慢上升, 接着 10:00 以后又开始下降至下午 2:00 达到最低之后又开始上升, 呈现“S”增长, 不同水位 pH 值均呈碱性, 同 Eh 值一样没有明显的昼夜规律, 最小值出现在上午 10:00 左右, 最小值出现在凌晨 02:00。

2.2.2 土壤、水体等环境因素与不同水位 CH₄、CO₂、N₂O 通量的相关关系

不同水位 CH₄、CO₂、N₂O 通量日变化与温度、pH、Eh 之间的相关关系见表 2。结果得出气温、水温与不同水位 CH₄、N₂O 通量日变化之间呈显著相关 ($P < 0.05$), 而与 CO₂ 之间相关关系不显著 ($P > 0.05$)。土壤 pH、Eh 以及水体 pH、Eh 对不同水位 CH₄、CO₂、N₂O 通量日变化皆不显著 ($P > 0.05$)。而土壤温度对不同水位 CH₄、CO₂、N₂O 通量日变化各不相同。其中土壤温度对不同水位 CH₄ 排放也呈现较强的正相关, 其中与 0cm 和 5cm 水位相关性达到显著 ($P < 0.05$); 而不同水位 N₂O 通量与土壤温度皆不显著 ($P > 0.05$)。土壤温度对不同水位 CO₂ 通量均呈现显著的正相关, 其中与 5cm 水位、10 水位、20cm 水位相关性达到极显著 ($P < 0.01$)。

表 2 土壤、水体等环境因素与不同水位 CH₄、CO₂、N₂O 通量的相关关系

Table 2 Correlation between environmental factors of soil and water and CH₄、CO₂、N₂O fluxes at different water levels

温室气体 Greenhouse	水位 Water Level	气温 Atmospheric temperature	土温 Soil temperature	水温 Water temperature	土壤 pH Soil pH	土壤 Eh Soil Eh	水 pH Water pH	水 Eh Water Eh
CH ₄	0cm	0.665 **	0.767 **	—	0.288	-0.306	—	—
	5cm	0.753 **	0.596 *	0.836 **	0.332	0.175	-0.378	-0.175
	10cm	0.807 *	0.44	0.907 **	0.259	0.168	-0.131	0.386
	20cm	0.749 **	0.275	0.740 **	0.355	-0.167	-0.361	0.217
N ₂ O	0cm	-0.587 *	-0.313	—	0.207	-0.19	—	—
	5cm	0.759 **	0.351	0.857 **	0.466	0.292	-0.502	-0.292
	10cm	0.715 **	0.144	0.713 **	0.032	-0.152	0.074	0.251
	20cm	0.811 **	0.167	0.669 **	0.073	-0.29	-0.077	0.336
CO ₂	0cm	-0.111	0.858 *	—	0.493	-0.542	—	—
	5cm	-0.295	0.897 **	0.238	0.892 *	0.858 *	-0.876 *	-0.875 *
	10cm	-0.114	0.931 **	0.499	0.763 *	0.742 *	-0.632	-0.402
	20cm	-0.036	0.972 **	0.625	0.536	0.639	-0.541	-0.593

* 表示显著相关 ($P < 0.05$); ** 表示极显著相关 ($P < 0.01$); “—” 表示无相关关系

3 讨论

3.1 不同水位下 CH₄、CO₂、N₂O 通量的日变化规律

本研究中不同水位 CH₄ 通量的日变化均表现出一致的昼夜变化规律, 且均表现为昼高夜低, 这与相关研究得到的结果相似^[18-20], 原因是白天光照充足且温度高甲烷以传输效率较高的对流传输方式为主, 而夜间则以传输效率较低的分子扩散为主, 同时, 由于夜间积累的甲烷在白天通过对流传输释放到大气中, 这也是导致芦苇湿地白天甲烷排放量高的原因。此外, 本研究中除 8 月 0cm 水位下甲烷排放白天表现为排放状态, 夜间表现为吸收状态外, 其他水位全天均表现为排放状态。这是因为在 CH₄ 排放方面, 湿地水位越低, 沼泽产生和排放 CH₄ 就越少^[7]。而当芦苇没有水淹情况下夜晚由于 CH₄ 排放较少, 可能全部被氧化, 因而 0cm 水位情况下 CH₄ 通量夜晚可能呈吸收状态。总体上, 夏季芦苇湿地各水位均表现为 CH₄ 的源。这是因为随着水位的加深, 水体中溶解氧质量浓度是影响水体与大气间 CH₄ 通量日变化的主要环境因子^[21], 当水位较高时所形成的甲烷气泡在逐渐上升的过程逐渐被氧化为 CO₂, 从而降低了扩散到大气中的甲烷。研究中不同水位 CO₂ 通量

全天整体上均表现为 CO_2 的汇,且均表现为昼低夜高,这与张发兵^[22]等在太湖春季研究得出的结果一致,但与黄文敏^[23]等在香港河水-气界面秋季测量的结果相反。说明 CO_2 通量日变化在不同季节具有不同的变化规律。而本文研究得出昼低夜高的原因可能是白天太阳光辐射增强,水体温度升高,植物的光合作用也增强,有利于 CO_2 从大气进入水体;太阳光辐射减弱,水温降低,光合作用减弱,有利于水体中的 CO_2 进入大气。汪青^[24]对崇明东滩温室气体排放的研究表明,无论是围垦湿地还是自然湿地,温室气体排放通量都有明显的日变化规律,表现出夜高于昼,极大值和极小值分别出现在凌晨和上午。研究中 10cm 水位下 CO_2 通量高于其他水位,这是因为土壤淹水深度直接影响到土壤的氧化还原环境,进而影响微生物活动和 CO_2 的排放。也有研究指出, CO_2 排放与湿地水位呈负相关关系^[25-26],这与本研究存在一定的出入。 N_2O 排放是硝化-反硝化共同作用的结果,而在湿地环境中,因为土壤水淹的条件,较低的含氧量和丰富的碳、氮营养物质,一般把反硝化作用认为是湿地 N_2O 排放的主要因素^[27]。可能与沉积物中参与硝化-反硝化作用的微生物活性对环境温度的响应存在滞后效应有关。相关研究^[28-30]也表明, N_2O 排放通量的日变化受环境温度的影响极为明显,且其变化与温度变化存在明显的时间滞后性。此外,8 月份深水位 (10cm、20cm 水位) CH_4 排放略高于 7 月份,这可能与与芦苇不同时期的生物量和植株密度等密切相关^[31-32],随着水位增加芦苇的株高、分蘖数也相应增加,且气体“通道”较多,植物对 CH_4 传输的阻力减小。

3.2 环境因子对温室气体通量日变化的影响

通过主成分分析对气温、水温、土温、土壤 pH、Eh、水体 pH、Eh 以及风速等 8 个环境指标与温室气体通量日变化的影响进行进一步的筛选 (见图 5),分析得出气温和水温是影响湿地土壤 CH_4 和 N_2O 通量日变化的主

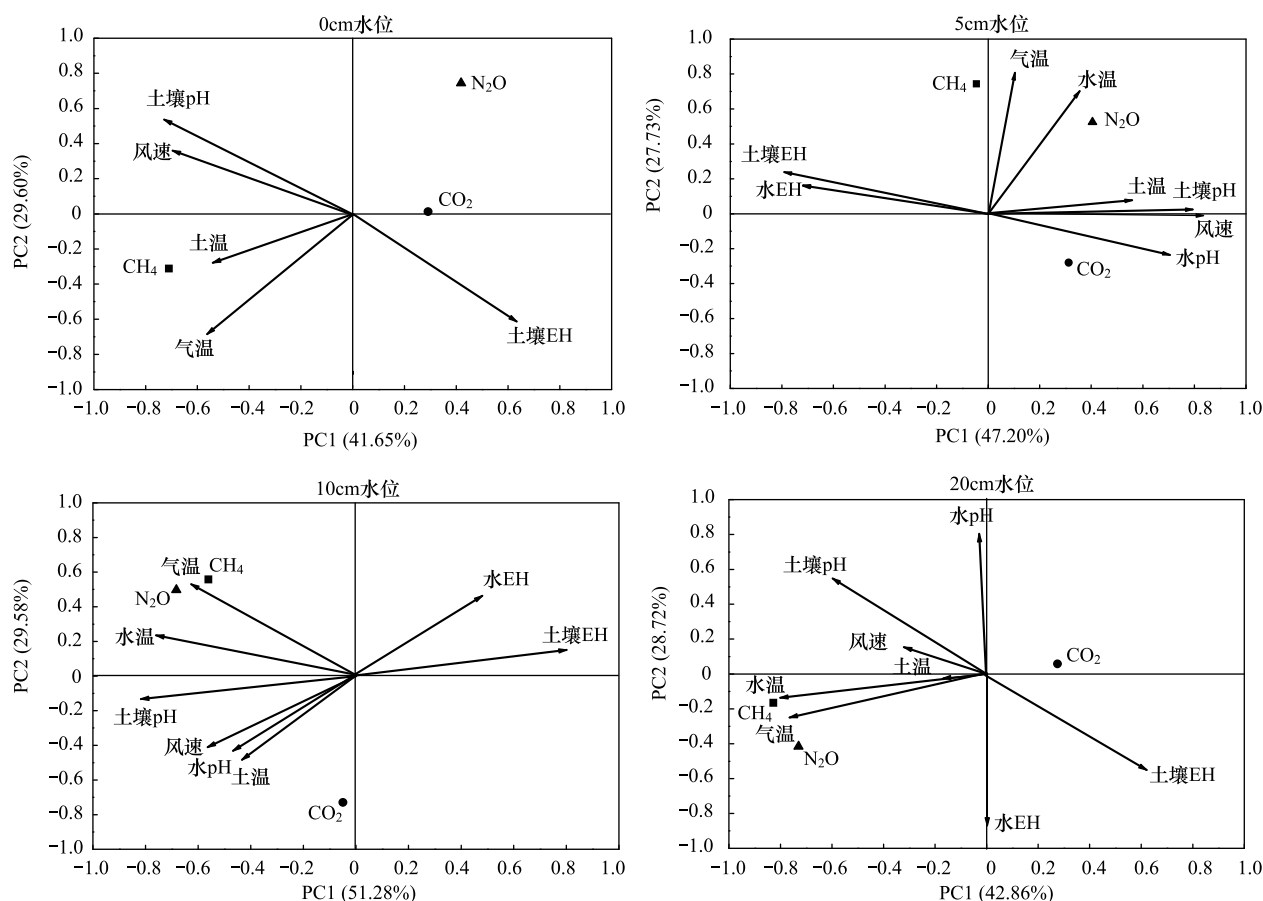


图 6 不同水位环境因子的主成分分析

Fig.6 Principal component analysis based on environmental factors of different water level

导因子,土壤温度是影响湿地土壤 CO_2 通量日变化的主导因子。同时通过相关性分析也得出气温与 CH_4 通量均呈显著正相关,说明气温是影响 CH_4 通量的重要因子;气温对 N_2O 通量的影响有所不同,0cm 水位下与 N_2O 通量呈显著负相关,而与其他水位下(5cm、10cm、20cm 水位)呈显著正相关,这是因为在 0cm 水位土壤 N_2O 主要有土壤硝化作用主导,而当水淹后由反硝化作用主导,随着温度升高硝化作用会减弱,反硝化速率则会随着增强^[33]。气温与 CO_2 通量的相关性不显著,这可能与采样时研究区风速较高有关(平均风速高达 3.5m/s)。黄文敏^[23]等研究也指出风速较高时, CO_2 通量与气温的相关性降低。土壤温度与 0cm、5cm 水位下 CH_4 通量呈显著正相关,而与 10cm、20cm 水位下 CH_4 通量相关性不显著,表明土壤温度对未淹水或低水位的 CH_4 通量影响要明显大于对较深水位的 CH_4 通量影响。这是由于随着水位加深土壤温度日变化波动减小,因而对土壤微生物的活性影响减弱,故相关性分析中得出了较深水位与 CH_4 通量相关性不明显的结果。土壤温度与各水位 CO_2 通量均呈显著正相关,其中与 5cm、10cm、20cm 水位相关性达到极显著。水温与 5cm、10cm、20cm 水位 CH_4 、 N_2O 通量相关系数较高,且均达到显著的正相关,分析原因如下:随着水体温度的升高气体的溶解度降低,从而有利于气体由水面扩散到大气中;而当水体温度降低时气体更易从空气中进入水体。此外,水体的温度还能影响水中气泡的形成,有报导指出,水温较高的水体中扩散到水中的甲烷量低于沉积物中积累的甲烷量,使得甲烷过饱和而形成气泡^[34]。水温与 5 cm、10 cm、20 cm 水位 CO_2 通量的相关系数分别为 0.238、0.499、0.625($p>0.05$),表明水温与 CO_2 通量之间没有明显的相关关系,这与香溪河温室气体通量日变化研究得到的结果一致。

本研究结果显示土壤和水体 pH、Eh 与不同水位 CH_4 和 N_2O 通量相关性相对较弱,这是因为在昼夜尺度上土壤和水体 pH、Eh 波动不大,因而它不是造成土壤 CH_4 和 N_2O 昼夜和小时尺度波动的主要原因^[35]。而土壤和水体 pH、Eh 与不同水位 CO_2 通量相对较强,这是因为 pH 可以直接影响水体碳酸盐的平衡^[36],而 Eh 可以改变土壤通透性和供氧状况,因而与 CO_2 通量之间具有直接的关系。

4 结论

(1)观测期间,夏季不同水位 CH_4 、 CO_2 、 N_2O 通量具有明显的日变化特征。不同水位 CO_2 日变化通量均表现为昼低夜高,且白天为汇,夜间表现为源,且整体上均表现为 CO_2 的汇;不同水位 CH_4 日变化通量同样均表现为昼高夜低,且整体上均表现为 CH_4 的源; N_2O 通量总体上水淹后均表现为昼高夜低而 0 cm 水位表现为昼低夜高,全天 5 cm、10 cm 水位表现为 N_2O 的源,0 cm、20 cm 水位表现为 N_2O 的汇。

(2)在不同水位温室气体日变化过程中,气温、水温是土壤 CH_4 、 N_2O 日变化通量的主导因子,而土壤温度是 CO_2 日变化通量的主导因子,同时,土壤 pH、Eh 及水体 pH、Eh 是 CO_2 日变化通量的重要因子之一。

参考文献(References):

- [1] Houghton J T, Meira Filho L G, Callander B A, Harris N, Kattenburg A, Maskell K. Climate Change 1995: the Science of Climate Change. New York: Cambridge University Press, 1998.
- [2] 孙志高, 牟晓杰, 王玲玲. 滨海湿地生态系统 N_2O 排放研究进展. 海洋环境科学, 2010, 29(1): 159-164.
- [3] Ström L, Christensen T R. Below ground carbon turnover and greenhouse gas exchanges in a sub-arctic wetland. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(7): 1689-1698.
- [4] Tiiva P, Faubert P, Rätty S, Holopainen J K, Holopainen T, Rinnan R. Contribution of vegetation and water table on isoprene emission from boreal peatland microcosms. Atmospheric Environment, 2009, 43(34): 5469-5475.
- [5] van Oorschot M, van Gaalen N, Maltby E, Mockler N, Spink A, Verhoeven J T A. Experimental manipulation of water levels in two French riverine grassland soils. Acta Oecologica, 2000, 21(1): 49-62.
- [6] Kraigher B, Stres B, Hacin J, Ausec L, Mahne I, van Elsas J D, Mandic-Mulec I. Microbial activity and community structure in two drained fen soils in the Ljubljana marsh. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(9): 2762-2771.
- [7] 丁维新, 蔡祖聪. 沼泽甲烷排放及其主要影响因素. 地理科学, 2002, 22(5): 619-624.
- [8] 段晓男, 王效科, 陈琳, 牟玉静, 欧阳志云. 乌梁素海湖泊湿地植物区甲烷排放规律. 环境科学, 2007, 28(3): 455-459.

- [9] Ding W X, Cai Z C, Tsuruta H, Li X P. Effect of standing water depth on methane emissions from freshwater marshes in northeast China. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(33): 5149-5157.
- [10] Saarnio S, Alm J, Martikainen P J, Silvola J. Effects of raised CO₂ on potential CH₄ production and oxidation in, and CH₄ emission from a boreal mire. *Journal of Ecology*, 1998, 86(2): 261-268.
- [11] 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. *湿地科学*, 2012, 10(1): 121-128.
- [12] 杨继松, 刘景双, 王金达, 于君宝, 孙志高, 李新华. 三江平原生长季沼泽湿地 CH₄、N₂O 排放及其影响因素. *植物生态学报*, 2006, 30(3): 432-440.
- [13] 牟长城, 石兰英, 孙晓新. 小兴安岭典型草丛沼泽湿地 CO₂, CH₄ 和 N₂O 的排放动态及其影响因素. *植物生态学报*, 2009, 33(3): 617-623.
- [14] 万忠梅. 水位对小叶章湿地 CO₂、CH₄ 排放及土壤微生物活性的影响. *生态环境学报*. 2013, 22(3): 465-468.
- [15] 胡泓, 王东启, 李杨杰, 陈振楼, 吴杰, 尹秋晓, 管永健. 崇明东滩芦苇湿地温室气体排放通量及其影响因素. *环境科学研究*, 2014, 27(1): 43-50.
- [16] 王蒙, 吴明, 邵学新, 盛宣才. 杭州湾滨海湿地 CH₄ 排放通量的研究. *土壤*, 2014, 46(6): 1003-1009.
- [17] 王德宣, 丁维新, 王毅勇. 若尔盖高原与三江平原沼泽湿地 CH₄ 排放差异的主要环境影响因素. *湿地科学*, 2003, 1(1): 63-67.
- [18] 仝川, 曾从盛, 王维奇, 闫宗平, 杨红玉. 闽江河口芦苇潮汐湿地甲烷通量及主要影响因子. *环境科学学报*, 2009, 29(1): 207-216.
- [19] 曾从盛, 王维奇, 仝川. 不同电子受体及盐分输入对河口湿地土壤甲烷产生潜力的影响. *地理研究*, 2008, 27(6): 1321-1330.
- [20] 田慎重, 宁堂原, 迟淑绮, 王瑜, 王丙文, 韩惠芳, 李成庆, 李增嘉. 不同耕作措施的温室气体排放日变化及最佳观测时间. *生态学报*, 2012, 32(3): 879-888.
- [21] Schrier-Uijl A P, Veraart A J, Leffelaar P A, Berendse F, Veenendaal E M. Release of CO₂ and CH₄ from lakes and drainage ditches in temperate wetlands. *Biogeochemistry*, 2011, 102(1/3): 265-279.
- [22] 张发兵, 胡维平, 杨龙元. 太湖春季水-气界面碳通量日变化观测研究. *生态环境*, 2004, 13(2): 186-190.
- [23] 黄文敏, 朱孔贤, 赵玮, 余博识, 袁希功, 冯瑞杰, 毕永红, 胡征宇. 香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析. *环境科学*, 2013, 34(4): 1270-1276.
- [24] 汪青. 崇明东滩湿地生态系统温室气体排放及机制研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2006.
- [25] Awasthi K D, Sitaula B K, Singh B R, Bajracharya R M. Fluxes of methane and carbon dioxide from soil under forest, grazing land, irrigated rice and rainfed field crops in a water shed of Nepal. *Biology and Fertilizer of Soils*, 2005, 41(3): 163-172.
- [26] 王毅勇, 宋长春, 闫百兴, 王德宣, 赵志春, 姜彦景, 宋新山. 三江平原不同土地利用方式下湿地土壤 CO₂ 通量研究. *湿地科学*, 2003, 1(2): 111-114.
- [27] 李英臣, 宋长春, 刘德燕. 湿地土壤 N₂O 排放研究进展. *湿地科学*, 2008, 6(2): 124-129.
- [28] 谢军飞, 李玉娥. 土壤温度对北京旱地农田 N₂O 排放的影响. *中国农业气象*, 2005, 26(10): 7-10.
- [29] 卢妍, 宋长春, 徐洪文. 沼泽湿地草甸 N₂O 排放通量日变化规律研究. *上海环境科学*, 2009, 28(4): 139-148.
- [30] 杨平, 仝川. 不同干扰因素对森林和湿地温室气体通量影响的研究进展. *生态学报*, 2012, 32(16): 5254-5263.
- [31] 段晓男, 王效科, 欧阳志云. 维管植物对自然湿地甲烷排放的影响. *生态学报*, 2005, 25(12): 3375-3382.
- [32] 黄国宏, 肖笃宁, 李玉祥, 陈冠雄, 杨玉成, 赵长伟. 芦苇湿地温室气体甲烷排放研究. *生态学报*, 2001, 21(9): 1494-1497.
- [33] 徐慧, 陈冠雄, 马成新. 长白山北坡不同土壤 N₂O 和 CH₄ 排放的初步研究. *应用生态学报*, 1995, 6(4): 373-377.
- [34] St Louis V L, Kelly C A, Duchemin É, Rudd J W M, Rosenberg D M. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: A global estimate. *BioScience*, 2000, 50(9): 766-775.
- [35] 李长生, 肖向明, Frolking S, Moore B III, Salas W, 邱建军, 张宇, 庄亚辉, 王效科, 戴昭华, 刘纪远, 秦小光, 廖柏寒, Sass R. 中国农田的温室气体排放. *第四纪研究*, 2003, 23(5): 493-503.
- [36] 严国安, 刘永定. 水生生态系统的碳循环及对大气 CO₂ 的汇. *生态学报*, 2001, 21(5): 827-833.