

牛翠云,王树涛,郭艳杰,等. 白洋淀芦苇型水陆交错带湿地 CH_4 和 CO_2 的排放特征[J]. 江苏农业科学,2018,46(15):209-213.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.15.055

白洋淀芦苇型水陆交错带湿地 CH_4 和 CO_2 的排放特征

牛翠云^{1,3}, 王树涛², 郭艳杰^{1,3}, 刘 微⁴, 张俊梅²

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院, 河北保定 071001; 2. 河北农业大学国土资源学院, 河北保定 071001;

3. 河北省农田生态环境重点实验室, 河北保定 071001; 4. 河北大学化学与环境科学学院, 河北保定 071002)

摘要:选取河北省白洋淀地区典型的芦苇型水陆交错带作为研究对象,运用静态箱-气相色谱法对该水陆交错带湿地甲烷(CH_4)和二氧化碳(CO_2)排放通量的时空规律进行研究,取回土壤样品及气体样品,对土壤有机碳含量及土壤温度、表层土壤含水率、pH 值等相关环境因子进行测定。结果表明,2 个采样点(东里庄村东、南刘庄,分别设为 S_1 、 S_2 点) CH_4 排放通量的最大值均出现在夏季的 8 月,分别是 406.27、435.91 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; 2 个采样点 CH_4 全年排放通量中值(平均值)分别为 144.35、146.48 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; 2 个采样点 CO_2 排放通量最大值也出现在夏季的 8 月,分别为 356.53、533.09 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,在全年的 CO_2 排放通量中值(平均值)方面, S_2 点高于 S_1 点,分别为 262.21、178.49 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; 2 个采样点表层土壤(0~20 cm)中的有机碳含量平均值分别为 13.44、14.19 g/kg,且夏季的含量小于春季、秋季和冬季,夏季温度较高,深层土壤中的有机碳含量基本维持在 7.0 g/kg 左右的水平;采样箱内温度、土壤含水率、土壤温度和 pH 值等相关环境因子与甲烷、二氧化碳的排放通量也具有较高关联度。

关键词: CH_4 排放; CO_2 排放; 有机质; 水陆交错带

中图分类号: S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)15-0209-05

碳(C)是全球气候变化的重要影响因素之一,在大气圈碳库中主要以甲烷(CH_4)和二氧化碳(CO_2)的形式存在。其

收稿日期:2017-03-01

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(编号:21307025)。

作者简介:牛翠云(1990—),女,河北沧州人,硕士研究生,主要从事土壤学方面的研究。E-mail:niucuiyun@qq.com。

通信作者:郭艳杰,博士,讲师,主要从事土壤环境科学方面的研究。

E-mail:guoyanjie928@126.com。

蔬菜中重金属含量测定与健康风险评价[J]. 环境工程,2015,33(10):130-134.

[3] 翟丽梅. 矿业活动密集区农田土壤重金属的污染特征——以广西西江流域为重点. [D]. 北京:中国科学院研究生院. 2007.

[4] 张 凯,杨 晴,柴发合,等. 一种适用于大气干湿沉降中重金属分析的样品采集及提取方法:CN 201310065214.2[P]. 2013-06-26.

[5] 刘 勇,王成军,刘 华,等. 铅同位素解析技术在工业园污染源中的应用[J]. 环境工程学报,2015,9(6):3031-3036.

[6] 王 成,袁旭音,陈 旸,等. 苏州地区水稻土重金属污染源解析及端元影响量化研究[J]. 环境科学学报,2015,35(10):3269-3275.

[7] 范中亮,季 辉,杨 菲,等. 不同土壤类型下镉和铅在水稻籽粒中累积特征及其环境安全临界值[J]. 生态环境学报,2010,19(4):792-797.

[8] 李世区. 市售大米中 Pb 和 Cd 污染状况及对人体健康的影响[J]. 微量元素与健康研究,2015,32(4):34-36.

[9] 杨梦昕,杨东璇,李萌立,等. 湘江长沙段沿岸常见农作物重金属污染研究——Zn、Cu、Pb 和 Cd 的富集规律及污染评价[J]. 中南林业科技大学学报,2015,35(1):126-131.

中,作为主要温室气体的甲烷对全球气候变暖的贡献率达到了 20%~39% [联合国政府间气候变化专门委员会(intergovernmental panel on climate change,简称 IPCC),2007 年]。大气中的 CH_4 含量已从工业革命前(1750 年)的 0.72 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 上升到了 2012 年的 1.82 $\mu\text{mol}/\text{mol}$,提高了约 1.5 倍(IPCC,2014 年)。 CO_2 浓度已经从工业革命前的 280 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 增加到现在的 393 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ (IPCC,2014)^[1]。土壤碳库也是地球碳库的一个重要组成系统,土壤碳库与大

[10] 孙亚芳,王祖伟,孟伟庆,等. 天津污灌区小麦和水稻重金属的含量及健康风险评价[J]. 农业环境科学学报,2015,34(4):679-685.

[11] 仲维功,杨 杰,陈志德,等. 水稻品种及其器官对土壤重金属元素 Pb、Cd、Hg、As 积累的差异[J]. 江苏农业学报,2006,22(4):331-338.

[12] 国家环境保护总局. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990:329-492.

[13] 赵多勇,魏益民,魏 帅,等. 基于铅同位素解析技术的土壤铅污染来源研究[J]. 安全与环境学报,2015,15(6):329-333.

[14] 柳 检,罗立强. As、Cd 和 Pb 植物根系吸收途径和影响因素研究现状与进展[J]. 岩矿测试,2015,34(3):269-277.

[15] 王腾云,周国华,孙彬彬,等. 福建沿海地区土壤-稻谷重金属含量关系与影响因素研究[J]. 岩矿测试,2016,35(3):295-301.

[16] 张潮海,华村章,邓汉龙,等. 水稻对污染土壤中镉铅铜锌的富集规律的探讨[J]. 福建农业学报,2003,18(3):147-150.

[17] 王小玲,刘腾云,幸学俊,等. 水稻对土壤重金属元素富集差异及农艺调控措施研究进展[J]. 江西科学,2016,34(3):311-315.

气碳库间的循环对于温室气体的排放影响最大^[2]。大气圈环境与土壤圈环境间存在着密切联系^[3],特别是大气圈与土壤圈之间的碳循环^[4]。与此同时,湿地面积虽然只占土地面积及淡水面积的 6%~8%,但是却储存了约 15% 的地球上陆地有机碳含量^[5]。湿地系统是否是碳循环的源或汇,与碳在湿地系统中迁移转化和循环的过程关系密切,因此,研究碳在湿地中的迁移转化过程对于研究碳库循环的意义重大^[6]。

水陆交错带是处于水生态系统和陆地生态系统之间的重要界面区,其特殊的边界效应使其往往成为流域生物地球化学循环的“热区”^[6-7]。水陆交错带是具有特殊功能的环境过渡带,其在水陆系统之间的能量流动和物质循环中都发挥着独特的作用且具有显著的生态边缘效应。健康的水陆交错带对流经的河流水体及其所携带的物质具有较强的截留和过滤作用^[8]。近年来,国内外学者对水陆交错带的研究主要集中在湿地的开发利用和保护上,对生物多样性、水体净化及其截留、过滤作用也有一些研究^[9-10],但是关于该生态区域碳素循环特征的研究很少涉及。本研究以白洋淀地区具有代表性的芦苇型水陆交错带湿地区域为研究对象,对其甲烷、二氧化碳排放的时空规律及相关土壤环境因子进行研究,以期深入理解和认识芦苇型水陆交错带湿地的固碳功能及碳循环的变化特点,为研究大气圈与土壤圈之间的碳循环特征及利用湿地进行碳减排提供参考依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

白洋淀地处 38°43′~39°02′N、115°38′~116°07′E,由白洋淀、藻苻淀、马棚淀、腰葫芦淀等 143 个大小不等的淀泊组成,总面积为 366 km² (水面大沽高程为 10.5 m)^[11],其中 85.6% 的水域在安新境内,几乎占据安新县总面积的 1/2。淀区地势自西北向东南倾斜,自然坡度为 1:7 000。白洋淀总流域面积为 31 199 km²,占大清河水系流域面积的 96.13%。该区地处暖温带大陆性季风气候区,年降水量为 506.5 mm,年平均气温为 7~12℃。白洋淀上游主要有 8 条入淀河流,近年来入淀径流量很少,除府河外,其他河流基本已断流。白洋淀不同于其他内陆淡水湖泊,其间有台田、水道纵横分布于白洋淀各大淀区之间^[12],其台地植被主要以芦苇群落为主。在全淀范围内,水陆交错带发育相对良好,主要有芦苇植被群落、苇地间沟壕和开阔淀水,其中以芦苇植被为景观特征的水陆交错带面积约占 36%^[13]。

1.2 采样点设置

本研究依据白洋淀污染源及污染的空间分布特点,并兼顾采样的可行性和代表性,选择了 2 个典型水陆交错带样点,分别为东里庄(S₁点,地理位置 38°49.653′N、115°58.711′E)和南刘庄(S₂点,地理位置 38°53.990′N、115°56.635′E)。2 个采样点芦苇发育均良好,生长旺盛,面积适中,且基本无人破坏。S₁点周边临近村庄,生活污水乱排、垃圾乱堆现象严重,受生活污染影响较大。S₂点周边临近养鱼场,有封闭式或开放式鱼塘,鱼塘定期投放饵料,受渔业生产污染影响相对较大。确定采样点后,于 2015 年 3—11 月,历经近 1 年的时间,定期对采样点处的气体 CH₄ 和 CO₂、土壤等样品进行采集。

1.3 样品的采集与测定

1.3.1 气体的采集与测定 甲烷、二氧化碳气体采用密闭式静态箱法测定。箱体由 2 个部分组成:上部箱体为圆柱体形式的聚氯乙烯 (polyvinyl chloride,简称 PVC) 箱 (直径 14 cm、高 15 cm),箱体顶部设 1 个气体取样口,底部开口可以罩在 PVC 底座上;下部底座为四周有水槽的圆柱体,测定前将底座插入表层土中。抽气取样时,将水封槽内注满水,然后将气密室密封罩上,形成 1 个密闭性气体空间,然后从箱体顶端的取样口用 50 mL 注射器取气体样品。气体样品采用 CA-6 气体样品进样仪进样,利用 Agilent 7890A 型气相色谱仪进行分析。N₂O 检测器为电子捕获检测器 (ECD),分离柱内填充料为 80~100 目 Porapak Q,载气为高纯 N₂,流量为 30 mL/min,检测器温度为 330℃,分离柱温度为 55℃。

利用以下公式计算气体通量:

$$F = \rho \cdot (V/A) \cdot (\Delta C/\Delta T) \cdot 273/(273 + T) = \rho \cdot H \cdot (\Delta C/\Delta T) \cdot 273/(273 + T)。$$

式中: F 为被测气体通量,μg/(m²·h); A 为采样箱底座所包围的土壤面积,m²; V 为采样箱的容积,m³; $\Delta C/\Delta T$ 为采样箱内被测气体质量随时间的变化,一般气体浓度以体积比计,因此该项单位为 h⁻¹; ρ 为标准状态下温室气体的密度,μg/m³; H 为采样箱高度,m。

1.3.2 土壤样品的采集及测定 土样采集后自然风干,磨碎并过 100 目筛后备用。土壤 pH 值采用电位计法测定;土壤含水率采用烘干法测定;有机质含量采用重铬酸钾容量法—外加加热法测定。

所有数据均为所设置重复的平均值,数据处理分别采用 Excel 作图,用 SPSS 19.0 统计软件进行数据的相关统计分析。

2 结果与分析

2.1 芦苇型水陆交错带土壤 CH₄ 排放的季节变化特征

如图 1 所示,白洋淀湿地水陆交错带土壤 CH₄ 排放通量具有明显的季节变化规律,且不同采样点 CH₄ 排放通量均表现出一致的变化趋势。夏季 CH₄ 排放通量最大,秋、冬季次之,春季较小。在不同的月份,CH₄ 的排放通量各不相同,从 3 月到 11 月,2 个采样点的 CH₄ 排放通量均呈现出先增加后减少的变化趋势。从 3 月到 8 月,2 个采样点的 CH₄ 排放通量呈现出逐渐上升的趋势,并在 8 月芦苇生长最旺盛时期达到最大值,8 月之后则呈现出迅速下降的趋势,在春季的 3、4、5 月以及秋冬季的 9、10、11 月,CH₄ 的排放通量处于较低水平,但是秋冬季节的排放通量略高于春季。2 个采样点 CH₄ 排放通量的最大值均出现在夏季的 8 月,分别是 406.27、435.91 μg/(m²·h),S₂ 采样点略高于 S₁ 采样点;比较 2 个采样点的最小值可知,S₁ 采样点的最小值出现在 4 月,为 26.66 μg/(m²·h),S₂ 采样点的最小值出现在 3 月,为 15.91 μg/(m²·h);分析 2 个采样点 CH₄ 全年排放通量中值(平均值)可知,S₁、S₂ 采样点分别为 144.35、146.48 μg/(m²·h),处于同一水平。季节排放差异主要是受温度的影响,尤其是土壤温度对土壤微生物活性和 CH₄ 的产生排放都有非常重要的影响,它主要制约有机质的分解,调节参与 CH₄ 形成的微

生物活性,同时对 CH_4 的氧化输送起着至关重要的作用^[14]。2 个具有不同环境特点的水陆交错带湿地 CH_4 排放通量随季节变化呈现出良好的一致性,且季节性变化规律明显。很多研究表明, CH_4 排放量在夏季最高,在冬季和早春季节最低^[15-17],这与本研究的观测结果是一致的。

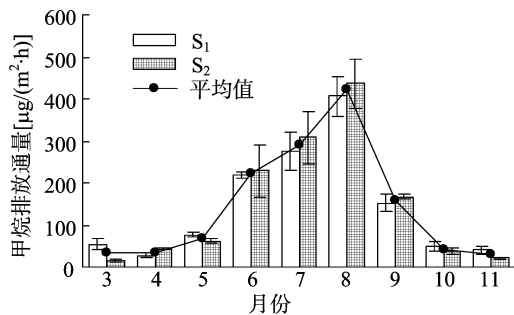


图1 白洋淀芦苇型水陆交错带湿地土壤 CH_4 排放通量的季节变化

2.2 芦苇型水陆交错带土壤 CO_2 排放的季节变化特征

如图 2 所示,在不同的月份, CO_2 的排放通量各不相同,从 3 月到 4 月出现了小幅度的下降,从 4 月到 11 月均呈现出先增加后减少的变化趋势。与 CH_4 排放通量的变化稍有区别, CO_2 的排放通量在春季的 3、4、5 月和冬季的 11 月出现排放低谷期,2 个采样点的最小值均出现在 4 月,最大值均出现在 8 月。对于采样点 1, CO_2 的排放通量在夏季的 6、7、8 月呈现出较高水平,中值(平均值)为 $337.77 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,该排放高峰期的最大值出现在 8 月,为 $356.53 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,在 8 月之后出现下降趋势。对于采样点 2, CO_2 排放高峰期较长,从夏季的 6 月一直持续到秋季的 10 月,其中值(平均值)为 $392.44 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,最大值出现在夏季的 8 月,为 $533.09 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, CO_2 排放低谷期为春季的 3、4、5 月,最小值出现在 4 月,为 $18.39 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。分析 2 个采样点 CO_2 在全年排放通量的中值(平均值)可知, S_1 、 S_2 分别为 178.49 、 $262.21 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,采样点 2 的 CO_2 全年排放通量的均值明显高于采样点 1,说明 2 个具有不同环境特点的水陆交错带湿地 CO_2 排放通量随季节变化呈现出良好的一致性,且季节性变化规律明显,但由于其具体环境特点的不同,导致其 CO_2 排放通量在各个月份的具体值及全年排放通量均值有所差别。

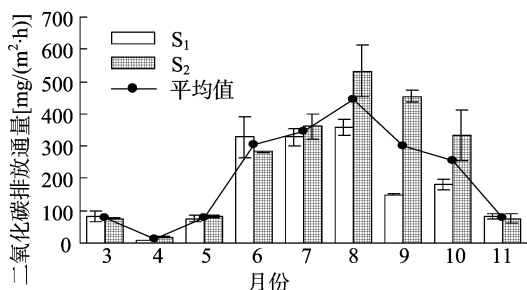


图2 白洋淀芦苇型水陆交错带湿地土壤 CO_2 排放通量的季节变化

2.3 土壤有机碳含量的季节变化特征及其与气体排放的关系

甲烷、二氧化碳分别是有机质厌氧分解和有氧分解的最终产物。由图 3 可以看出,2 个采样点土壤中有机碳含量在

不同季节的变化趋势大致相同,都随着土壤深度的加深,土壤有机碳的含量呈现出先下降后平稳的趋势,且在不同的季节具有同样的变化趋势,即表层土壤(0~20 cm 深度)中的有机碳含量明显大于其他各个土层,2 个采样点表层土壤(0~20 cm 深度)中的有机碳含量平均值分别为 13.44 、 $14.19 \text{ g}/\text{kg}$,采样点 2 略大于采样点 1,而在深层土壤中的有机碳含量基本维持在 $7.0 \text{ g}/\text{kg}$ 左右的水平。另外,不同季节表层土壤中有机碳的含量也有一定的规律,夏季的含量整体上低于春季、秋季和冬季,由于夏季温度较高,土壤中微生物的代谢活动较活跃,微生物的代谢活动以土壤中的有机碳为碳源,而秋冬季节温度较低,较低的温度限制了微生物的活动,同时,湿地地上部分的植物萎蔫也造成了表层碳素的积累。但是土壤有机碳的这种季节性变化和 CH_4 、 CO_2 排放通量的季节性变化特征正好相反, CH_4 、 CO_2 的排放通量均在夏季出现了高峰期。我国学者黄国宏等对辽河三角洲芦苇湿地甲烷排放的研究也表明,甲烷排放具有明显的季节变化,在夏季淹水期,芦苇旺盛生长,温度较高,存在良好的嫌气条件,甲烷排放通量较高,秋季虽然底物输入量增加,但温度和含水量的降低,使得甲烷排放通量明显减少^[18-19]。

分析不同季节表层土壤中的有机碳含量可知, S_2 采样点均大于 S_1 采样点。由于土壤有机碳是土壤有机质的一部分,所以土壤有机碳含量从侧面反映了土壤有机质含量的高低,2 地周边环境的差异及不同的碳素来源是造成土壤有机碳含量差别的主要原因。同时, CH_4 、 CO_2 的生成都是微生物对土壤碳素利用的结果,有研究表明,高土壤有机质含量是甲烷排放的重要潜在源^[20],同时甲烷在富营养化类型湿地系统中的排放量相对较大^[21]。分析 2 个采样点 CH_4 、 CO_2 的排放高峰期可知,2 种温室气体的排放通量均表现为夏季的排放量较大,春季与秋冬季节排放量较低,比较全年排放量均值及累计排放量可知, S_2 采样点明显大于 S_1 采样点,这很有可能是由于 2 个采样点的具体环境特点不同造成的,也可能与土壤有机碳含量有密切关系。

2.4 CH_4 和 CO_2 的排放通量与各类环境因子的相关关系

湿地中 CH_4 、 CO_2 排放的具体变化特征是由 CH_4 、 CO_2 在湿地土壤介质中的产生、氧化、传输这几个复杂过程共同决定的,这些过程同时受到各类环境因子的影响,如土壤的各种物理、化学性质,具体有温度、氧化还原电位、土壤含水率、pH 值等。由表 1、表 2 所列的 2 个采样点的 CH_4 、 CO_2 排放通量和各环境指标之间的相关关系可知,2 个采样点 CH_4 、 CO_2 的排放通量均在 0.01 水平(双侧)上呈现出极显著正相关关系(S_1 采样点: $r=0.832$, $n=27$, $P<0.01$; S_2 采样点: $r=0.748$, $n=27$, $P<0.01$)。

2.4.1 CH_4 、 CO_2 的排放通量季节变化与土壤含水率的关系

经分析表明,2 个采样点 CO_2 、 CH_4 的排放通量与表层土壤含水率均在 0.01 水平(双侧)上呈现显著正相关关系,详见图 4。土壤含水率会影响土壤含氧量,而厌氧条件有利于甲烷的产生,有氧条件有利于二氧化碳的产生,故这 2 种温室气体的产生与排放与土壤含水率有着密切的关系。土壤含水率在夏季也应明显高于秋冬季节,土壤水分含量较高,可同时为植物的生长和微生物的生命活动提供必要的条件,因此土壤含水率是影响 CH_4 、 CO_2 排放的主要环境因子。

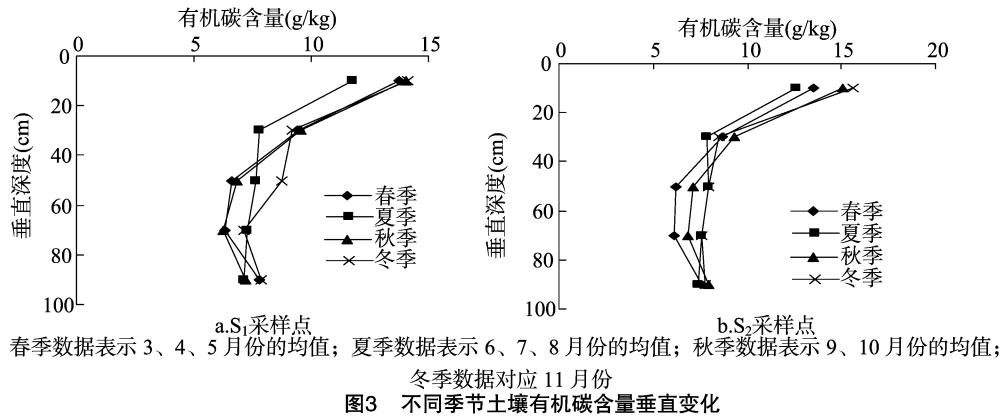


表 1 采样点 1 的 CH₄ 和 CO₂ 排放通量和各环境指标之间的相关性

参数	相关系数					
	CH ₄ 排放通量	CO ₂ 排放通量	表层土壤含水率	采样箱内温度	土壤温度(5 cm)	土壤温度(15 cm)
CH ₄ 排放通量	1.000	0.832 **	0.700 **	0.784 **	0.786 **	0.806 **
CO ₂ 排放通量		1.000	0.522	0.628 **	0.626 **	0.639 **
表层土壤含水率			1.000	0.558 **	0.581 **	0.579 **
采样箱内温度				1.000	0.997 **	0.996 **
土壤温度(5 cm)					1.000	0.996 **
土壤温度(15 cm)						1.000

注：“**”表示在 0.01 水平上(双侧)呈现显著相关；“*”表示在 0.05 水平上(双侧)呈现显著相关。表 2 同。

表 2 采样点 2 的 CH₄ 和 CO₂ 排放通量和各环境指标之间的相关性

参数	相关系数					
	CH ₄ 排放通量	CO ₂ 排放通量	表层土壤含水率	采样箱内温度	土壤温度(5 cm)	土壤温度(15 cm)
CH ₄ 排放通量	1.000	0.748 **	0.845 **	0.689 **	0.694 **	0.743 **
CO ₂ 排放通量		1.000	0.598 **	0.397 *	0.406 *	0.431 *
表层土壤含水率			1.000	0.686 **	0.713 **	0.763 **
采样箱内温度				1.000	0.995 **	0.989 **
土壤温度(5 cm)					1.000	0.992 **
土壤温度(15 cm)						1.000

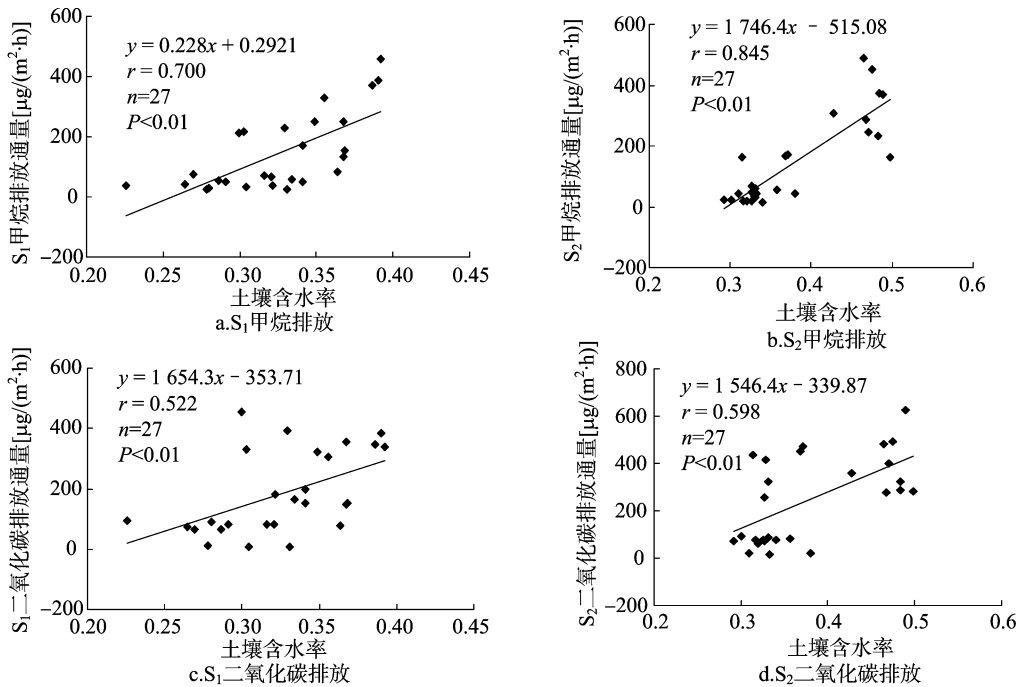


图4 白洋淀水陆交错带湿地 CH₄、CO₂ 排放与土壤含水率的关系

2.4.2 CH₄ 和 CO₂ 的排放通量季节变化与土壤温度的关系

关于 CH₄、CO₂ 排放通量和温度的关系,目前的研究中还没有统一的结论。一些研究表明,CH₄、CO₂ 的排放通量与温度的变化密切相关^[22],但也有报道指出,CH₄ 和 CO₂ 排放通量的季节变化与土壤温度的相关性较差或没有明显的相关关系^[23]。如表 1 所示,经过相关性分析,2 种温室气体在不同季节的排放通量与取气箱中温度及 5、15 cm 土壤温度均存在极显著正相关关系。可以看出,随着季节变化,气温也随之改变,气温的变化会影响土壤温度的变化,但是两者的变化并不是同步的,土壤温度的变化会滞后于大气温度的变化,而土壤温度会对微生物的代谢活动产生直接影响,从而影响 CH₄、CO₂ 的排放。

2.4.3 CH₄、CO₂ 的排放通量季节变化与土壤温度、pH 值的关系 白洋淀土壤母质主要是第四纪冲积物,淀内以沼泽土为主,土壤养分含量较高,土壤肥沃,质地黏重,土壤 pH 值呈弱碱性。经测定,2 个采样点表层土壤 pH 值在 7.93 ~ 8.49 之间,且不同季节的 pH 值变化幅度非常小,都稳定在 8 左右,因此 pH 值并不是影响这 2 种温室气体季节性排放变化的主要环境因素。土壤 pH 值是影响土壤微生物量碳含量的主要因子,当 pH 值 < 5 时,会抑制土壤中微生物的生长,致使土壤微生物量明显减少,从而抑制土壤 CO₂、CH₄ 气体的排放^[24]。

事实上,无论是 CH₄ 还是 CO₂ 气体的排放都是诸多环境因子综合作用的结果,但是目前对各类环境因子的交互效应的研究较为缺乏,因此,对此方面进行深入探究的意义重大。

3 结论

(1) 2 处典型水陆交错带湿地的 CH₄、CO₂ 气体排放通量有相对一致的季节变化特点,均在夏季达到排放通量的最大值,春季、秋冬季节的排放通量明显低于夏季;2 个具有不同环境特点的水陆交错带湿地 CH₄、CO₂ 的排放通量随季节变化呈现出良好的一致性,且季节性变化规律明显。(2) 2 个采样点在不同季节土壤中有机碳含量的垂直变化趋势相对一致,即表层土壤有机碳含量最高,随着土壤深度的加深,土壤中有机碳的含量呈现出先下降后平稳的趋势;不同季节表层土壤中有机碳含量表现出的趋势为夏季的含量整体上低于春季、秋季和冬季,与 CH₄、CO₂ 排放通量的季节性变化特征正好相反。(3) CH₄、CO₂ 的排放通量与土壤含水率、取气箱中温度及 5、15 cm 层次土壤温度均在 0.01 水平(双侧)上呈现出显著正相关关系,在本研究中与土壤 pH 值没有相关关系。

参考文献:

- [1] 沙晨燕,谭娟,王卿,等. 不同类型河滨湿地甲烷和二氧化碳排放初步研究[J]. 生态环境学报,2015,24(7):1182-1190.
- [2] 李英臣,宋长春. 氮磷输入对湿地生态系统碳蓄积的影响[J]. 土壤通报,2012,43(1):224-228.
- [3] 葛瑞娟,宋长春,王丽丽. 湿地甲烷生物化学过程及影响因素的研究进展[J]. 土壤通报,2011,42(1):229-235.
- [4] Wuebbles D J, Hayhoe K. Atmospheric methane and global change[J]. Earth - Sci Rev,2002,57(3/4):177-210.

- [5] Zhou L, Zhou G S, Jia Q Y. Annual cycle of CO₂ exchange over a reed (*Phragmites australis*) wetland in Northeast China[J]. Aquatic Botany,2009,91(2):91-98.
- [6] Naiman R J, Decamps H. The ecology of interfaces: riparian zones[J]. Annual Review of Ecology and Systematics,1997,28(1):621-658.
- [7] Gopal B, Hillbricht-Ilkowska A, Wetzel R G. Wetlands and ecotones: studies on land - water interactions[M]. New Delhi, India: National Institute of Ecology,1993,43(1):301-312.
- [8] Peterjohn W T, Correll D L. Nutrient dynamics in an agricultural watershed: observations on the role of a riparian forest[J]. Ecology,1984,65(5):1466-1475.
- [9] 尹澄清. 内陆水 - 陆地交错带的生态功能及其保护与开发前景[J]. 生态学报,1995,15(3):331-335.
- [10] 王庆所,冯宗炜,罗菊春. 生态交错带与生态流[J]. 生态学杂志,1997,16(6):52-58.
- [11] 李成保,徐仁扣,肖双成. 几种有机酸对土壤中磷活动性的增强效应[J]. 土壤学报,2005,42(3):508-512.
- [12] 温志广. 白洋淀湿地生态环境面临的危机及解决措施[J]. 环境保护,2003(9):332-335.
- [13] 王为东,王亮,聂大刚,等. 白洋淀芦苇型水陆交错带水化学动态及其净化功能研究[J]. 生态环境学报,2010,19(3):537-543.
- [14] 杨红霞,王东启,陈振楼,等. 长江口崇明东滩潮间带甲烷(CH₄)排放极其季节变化[J]. 地理科学,2007,27(3):408-413.
- [15] Alford D P, Delaune R D, Lindaau C W. Methane flux from Mississippi River deltaic plain wetlands[J]. Biogeochemistry,1997,37(4):227-236.
- [16] Singh S N, Kulshreshtha K, Agnihotri S. Seasonal dynamics of methane emission from wetlands[J]. Chemosphere - Global Change Science,2000,2(1):39-46.
- [17] 高建华,杨桂山,欧维新. 苏北滩涂湿地植被对沉积物 N、P 含量的影响[J]. 地理科学,2006,26(2):224-230.
- [18] 黄国宏,肖笃宁,李玉祥,等. 芦苇湿地温室气体甲烷(CH₄)排放研究[J]. 生态学报,2001,21(9):1494-1497.
- [19] 黄国宏,李玉祥,陈冠雄,等. 环境因素对芦苇湿地 CH₄ 排放的影响[J]. 环境科学,2001,22(1):1-5.
- [20] Xing Y P, Xie P, Yang H, et al. Methane and carbon dioxide fluxes from a shallow hypereutrophic subtropical lake in China[J]. Atmos Environ,2005,39(30):5532-5540.
- [21] Borken W, Xu Y J, Beese F. Conversion of hardwood forests to spruce and pine plantations strongly reduced soil methane sink in Germany[J]. Global Change Biology,2003,9(6):956-966.
- [22] Schutz H, Seiler W, Conrad R. Influence of soil temperature on methane emission from rice paddy fields[J]. Biogeochem,1990,11(2):77-95.
- [23] 丁维新,蔡祖聪. 植物在 CH₄ 产生、氧化和排放中的作用[J]. 应用生态学报,2003,14(8):1379-1384.
- [24] Joergensen R G, Anderson T H, Wolters V. Carbon and nitrogen relationships in the microbial biomass of soils in beech (*Fagus sylvatica* L.) forests[J]. Biology and Fertility of Soils,1995,19(2/3):141-147.