

盐度对长江河口芦苇湿地甲烷排放的影响

刘紫玟^{1,2}, 魏雪馨^{1,2}, 许运凯^{1,2}, 葛振鸣^{1,3}, 王东启^{1,2}

(1. 华东师范大学 GIS 教育部重点实验室, 上海 200241; 2. 华东师范大学 地理科学学院, 上海 200241; 3. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241)

摘要: 盐度对河口湿地甲烷气体的产生与排放影响重大。为揭示海水入侵对河口湿地 CH_4 排放的影响, 利用静态密闭箱—气相色谱法在 2016 年 4~10 月期间对崇明东滩芦苇群落 CH_4 气体的排放通量进行测定。结果表明: CH_4 排放总体表现出春夏季较高, 秋冬季较低的季节变化规律; 排放通量在 $0.19 \sim 7.68 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 间波动, 4~10 月这半年内平均排放通量为 $3.41 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。在一定范围内, 较高的盐度抑制 CH_4 的产生与排放, 较低的盐度不足以对 CH_4 产生抑制作用, 甚至会促进 CH_4 的产生; 在高盐环境下, CH_4 排放通量与盐度呈现出显著的对数负相关关系。在芦苇群落生长旺盛的初期(4~6 月), CH_4 排放通量与温度、光照呈现正相关关系; 而在芦苇生长后期(7~10 月)则呈现负相关关系。

关键词: 盐度; 排放通量; 动态变化; 长江口湿地

中图分类号: X142

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2018)03-0356-06

Effects of salinity on methane emission at Yangtze Estuary *Phragmites australis* wetland

LIU Zi-wen^{1,2}, WEI Xue-xin^{1,2}, XU Yun-kai^{1,2}, GE Zhen-ming^{1,3}, WANG Dong-qi^{1,2}

(1. Key Laboratory of GIS of Ministry of education, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. School of Geographical Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 3. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: Salinity has a profound influence on methane (CH_4) production and emission in estuarine wetlands. In order to reveal the effects of seawater intrusion on CH_4 emission from estuarine wetlands, static closed chamber combined with a gas chromatograph technique was used to investigate the flux of CH_4 at a *Phragmites australis* wetland in Chongming Dongtan from april to october in 2016. The results showed that the flux of CH_4 was higher in spring and summer than in autumn and winter. The flux ranged from 0.19 to $7.68 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ and the average flux was $3.41 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ from april to october. High salinity level inhibits the production and emission of CH_4 , while low salinity promotes CH_4 production within certain range. In high-salinity conditions, CH_4 emission flux has a significant logarithmic negative correlation with salinity. In the early stage of growth of *Phragmites australis*, the flux of CH_4 is positively correlated with temperature and light; however, in the later stage of growth, it is negatively correlated with temperature and light.

Key words: salinity; emission flux; dynamic change; Yangtze Estuary wetland

甲烷(CH_4)是地球大气中重要的温室气体之一,在目前各温室气体种类中,其年增长速率最

快^[1]。 CH_4 对全球温室效应的贡献率仅次于二氧化碳(CO_2),达到了 22%。湿地作为水陆间重要

收稿日期: 2017-05-25, 修订日期: 2017-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(41671467, 41473094); 科技基础性工作专项(2014FY210600); SKLEC 自主课题(2015KYYW03); 国家自然科学基金人才培养项目(J1310028)

作者简介: 刘紫玟(1996-), 女, 四川达州人, 本科生, 主要研究方向为环境地学, E-mail: tylx794800258@163.com

通讯作者: 王东启, 教授, E-mail: dqwang@geo.ecnu.edu.cn

的过渡性地带,是大气 CH_4 的主要排放源,全球 CH_4 排放量的 20% ~ 39% 都来源于湿地。IPCC 第五次评估报告指出,全球范围内沿海地区盐水入侵现象十分明显,全球海平面自 20 世纪初至 2010 年近 110 a 间平均上升约 $0.19 \text{ m}^{[2]}$,湿地处于显著的盐分变化形势之中。 CH_4 排放是其产生、氧化和传输三大过程综合作用的结果,会受到多种外界因素的影响,土壤盐度就是影响 CH_4 排放的重要环境因子之一。

近年来,盐水入侵对湿地温室气体排放及碳、氮元素循环的影响已成为全球性的环境问题,引发广泛关注^[3-5]。Weston 等^[3]通过对淡水沼泽的模拟盐水入侵实验发现,模拟盐水入侵提高了含碳气体总排放量中 CH_4 排放量的比例。卢昌义等^[4]通过室内短期培养模拟实验发现,随着盐度提高土壤 CH_4 产生率降低。王纯等^[5]运用室内泥浆厌氧培养法得出随着盐度增加, CH_4 产生潜力降低的结论。在当前盐水入侵、海平面上升的背景下,研究盐度对河口湿地 CH_4 气体排放的影响显然至关重要。然而,目前针对盐度影响 CH_4 排放的相关研究结果分别得出抑制、促进及无明显作用三种不同的结论,存在较大差异^[3-5]。本文选取长江口崇明东滩湿地公园芦苇群落为研究对象,运用室内模拟实验分析结合气相色谱测定等方法,探究在不同盐度的模拟海水入侵事件下长江口芦苇湿地 CH_4 排放的响应特征,以期在海水入侵、盐度变化的环境下,利用盐度对湿地 CH_4 排放的影响机制调控大气中 CH_4 的排放总量。

1 材料与方法

1.1 样本采集与预处理

2016 年 1 月在崇明东滩大堤外围的自然湿地区域进行野外植被群落的采集工作,主要方法为在湿地内的芦苇带 ($121^\circ 55' \text{E}$, $31^\circ 32' \text{N}$) 设置 24 个沉积物样方(长、宽和高分别为 40 cm, 30 cm 和 50 cm),采集时连带地上枯株及沉积物内的植被根系迅速装入预先订做的塑料桶并运至华东师范大学中山北路校区内进行人工培养。

在华东师范大学中山北路校区河口海岸研究所大楼楼顶的天台上搭建人工模拟环境放置芦苇群落样方,同时在室外放置 24 个芦苇群落样方并用透光膜大棚进行遮挡,用以模拟自然通风时的环境。整个模拟环境包含 4 种不同盐度(0、5、15、

30) 的控制因素,每种盐度水平下设置两个平行样,分以下两步进行这 4 种盐度水平的设置:首先在植株发芽之前使用一级水将样方内的沉积物润洗至同一盐度水平,之后将预先配制的不同浓度的人工海水灌入样方至规定的高度。沉积物样方运到人工环境中便开始进行淋洗操作,这离芦苇发芽有 2 个月左右的时间,对沉积物内部环境的影响控制在比较低的水平。人工环境设置完成后,进一步进行 CH_4 排放通量对外来盐度输入的模拟试验。

1.2 气体样品的采集

使用静态密闭箱法进行气样采集,采集装置由基座(不锈钢材质)和箱体(有机玻璃制成)两部分组成。不锈钢基座长、宽和高分别为 40 cm, 30 cm 和 10 cm,在基座顶部有一 U 型凹槽(高 3 cm,宽 2 cm),凹槽的接缝处做焊接处理且使用硅胶密封。圆柱箱长、宽和高分别为 40 cm, 30 cm 和 100 cm,可根据植株高度选择是否需要加装 50 cm 高度的延长柱体。采样箱的顶部安装橡胶管(长度 20 cm,内径 0.5 cm)进行气体采集,其末端则采用医用三通阀进行密封。芦苇植株叶片气体排放通量的采集装置由一个圆柱形有机玻璃罩箱(内径 10 cm,厚度为 3 mm,净高 50 cm)以及一个高度可调节的底座组成。

采样时将箱体放置于不锈钢基座的 U 型槽中,接着向凹槽中注入适量的水,对箱体和基座间结合部位进行水封。分别在每次采样日的 9 时、12 时、15 时和 21 时进行气体样品的采集,每次罩箱时间定为 30 min,并在 0 min、10 min、20 min 和 30 min 用医用注射器抽取 50 mL 气体,注入氟莱得材质的气体采样袋(FLU11-0.05,大连海得科技)。待采样结束之后,将气袋运回实验室并尽快完成上机测试分析。

1.3 样品的分析测试

CH_4 浓度使用 Agilent 7890A 气相色谱仪进行测定。 CH_4 检测器为离子化氢焰检测器(FID),工作温度为 200°C ,载气是高纯 N_2 ,流量设为 $30 \text{ cm}^3/\text{min}$ 。采用 60 ~ 80 目的 XMS 填充物分离柱(长度 2 m,直径 2 mm)进行 CO_2 和 CH_4 的分离,温度设定在 55°C 。在不同时段连续使用大连海德公司生产的接近大气浓度的 CH_4 标准气体进行外标校正。

1.4 CH₄通量的计算方法

经由上机测试得出标准气体及待测气体的峰面积后,可利用常用气体通量公式计算得到 CH₄ 排放通量^[6]:

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

式中: F 为 CH₄排放通量,单位 $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$; M 为 CH₄摩尔质量,单位 g ; V 是标准状态下 1 摩尔 CH₄的体积,单位 L ; $\frac{dc}{dt}$ 表示采样箱内 CH₄浓度随时间的变化率,单位 $\text{mg}/(\text{L}\cdot\text{h})$; H 是指静态箱内气体部分的高度(即中箱高度+顶箱高度),单位 m ; T 为静态箱内温度,单位 $^{\circ}\text{C}$ 。算出某时刻 3 个平行样排放通量的平均值,将该值作为该时刻的排放通量。

1.5 数据处理

使用 Origin 9.1 等作图软件完成论文插图的绘制;平均值和标准误均采用 Excel 2016 计算得出,图表中数据所示的误差棒是指 3 个平行数据的标准偏差;使用 SPSS 22.0 进行数据相关性分析及显著性检验。当 $P<0.05$ 时,则能通过显著性检验。

2 结果与讨论

2.1 CH₄排放通量特征

CH₄在 4 种不同盐度水平下的平均排放通量如图 1 所示,在芦苇生长初期(4 月),CH₄排放通量很小;5、6 月 CH₄通量显著上升;7~9 月通量不断降低,10 月出现短暂的回升。CH₄排放总体上呈现出明显的春夏季较高,秋冬季较低的季节排放规律。在不同盐度下,月均排放通量在 $0.19\sim7.68\text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 之间波动;半年均排放通量为 $3.41\text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,从大到小依次为 5 月>6 月>10 月>7 月>8 月>9 月>4 月,其中 5 月平均排放通量最大,为 $7.68\text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,4 月为 $0.19\text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,通量最小。

2.2 盐度对 CH₄排放通量的影响

由图 2 可看出,在 4 种盐度(0、5、15、30)下,每月都呈现出随着盐度升高,CH₄排放通量先增大后减小的趋势。在中低盐度下(0、5),CH₄排放通量随着盐度升高而增加,盐度为 5 时排放量达到峰值;中等盐度下(5~15),CH₄排放量总体较

高;在中高盐度下(15~30),随着盐度升高,CH₄排放通量不断降低,盐度为 30 时排放量为最小值。以上结果表明:在一定范围内,较高的盐度抑制 CH₄的产生与排放,较低的盐度不足以对 CH₄产生抑制作用,甚至会促进 CH₄的产生。

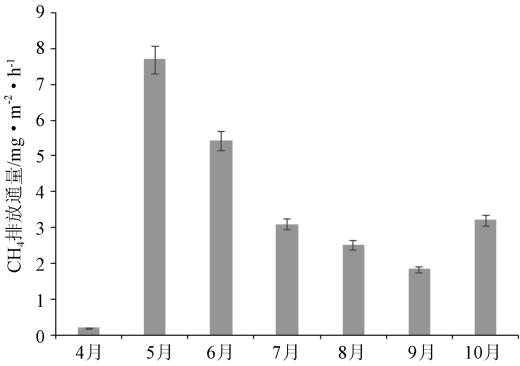


图 1 各月 CH₄平均排放通量的变化

Fig. 1 The changes of CH₄ monthly average emission flux

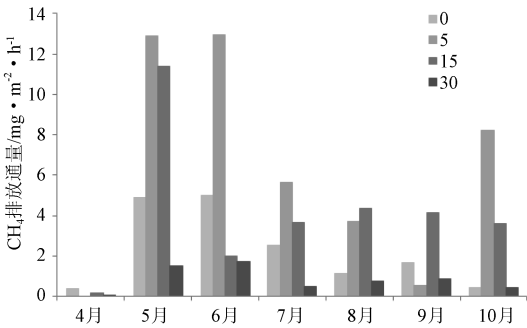


图 2 4~10 月不同盐度下 CH₄排放通量

Fig. 2 CH₄ emission flux under different salinity levels from April to October

盐度是对河口湿地 CH₄产生及排放有深刻影响。湿地 CH₄排放是一个复杂的生物化学过程,包括有 CH₄产生、氧化与传输三大关键过程,共同构成 CH₄代谢(也被称为 CH₄厌氧碳循环)。在湿地生态系统中,CH₄的产生是其排放的重要基础。Krauss 等^[7]发现在海水入侵导致的盐分梯度下,美国 Savannah 河流域潮汐树林的 CH₄排放通量与盐度并无显著性关系。而仝川等^[8]在闽江河口芦苇湿地的研究表明,盐度与 CH₄排放通量的关系表现出指数负相关关系。本实验研究结果表明中等盐度条件下 CH₄排放量最高,盐度过高或者过低都会导致排放量大幅减少(图 3)。

为定量分析盐度对 CH₄排放通量的影响,当盐度处于 5~30 范围中时,利用曲线估计回归模

型建立通量(Y)与盐度(X)间的对数回归方程(图4): $Y = -3.57\ln(x) + 13.32, R^2 = 0.394; P = 0.003 < 0.01$,两者具有显著的对数负相关关系。

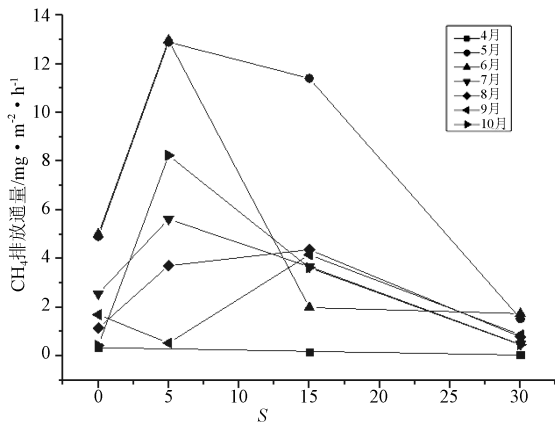


图3 不同盐度下CH₄排放通量

Fig. 3 CH₄ emission fluxes under different salinities

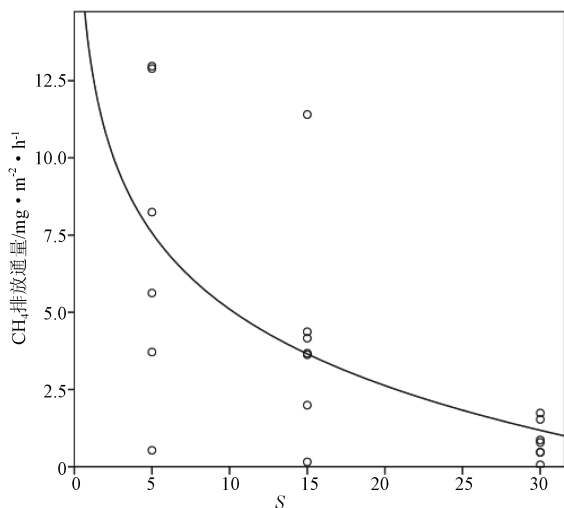


图4 通量-盐度对数回归模型

Fig. 4 CH₄ emission flux-salinity logarithmic regression model

盐度增大在一定范围内抑制CH₄产生可从生物化学循环的视角来解读。土壤产CH₄能力受盐度影响的根本原因,主要在于盐度能够对CH₄的产生途径以及产CH₄菌的微生物活性起作用^[9]。

(1)由CH₄排放关键过程可知,土壤有机物在不同种产CH₄菌的作用下,进行醋酸发酵及氢还原是产生CH₄常见的途径。尽管随着盐度增大,醋酸型产CH₄菌对CH₄产生的贡献会提高,但在严格厌氧的湿地土壤环境中,产CH₄菌竞争底物的能力处于劣势,远远不及硫酸盐(SO₄²⁻)还原菌;伴随着盐水入侵(或周期性涨潮)引起的土壤盐度升高,SO₄²⁻还原菌可利用的SO₄²⁻含量随之增

加^[10]。由于SO₄²⁻还原菌在竞争中处于优势,直接导致湿地产生CH₄这一过程转变为SO₄²⁻还原作用过程,从而使得CH₄产生量显著降低。

此外,SO₄²⁻还原菌还可氧化产生的CH₄,使得湿地中的CH₄浓度降低,进而传输到大气中的CH₄通量显然会减少。简言之,盐度增加使得土壤中电子受体的数量随之提高,较高浓度的SO₄²⁻会发生还原作用,从而与产CH₄菌竞争醋酸、氢等反应底物,加之SO₄²⁻还原过程中还能对植物产生毒害及改变周边环境因子,这些方式都会抑制CH₄的代谢过程^[11]。CH₄的产生当且仅当电子受体全都还原殆尽后才会开始,这导致CH₄排放显著减少^[12]。

(2)在高离子强度的作用下,微生物体内会发生渗透胁迫,这使得细胞的繁殖及其它功能受到干扰,甚至可能引发细胞裂解,导致微生物种群内部产生分歧进化^[13]。盐水入侵(或周期性涨潮)会增加湿地土壤盐分及Cl⁻离子(NaCl)浓度,两者主要通过某些次级反应途径,影响湿地产CH₄菌种群的活性及其发生还原反应需要的底物供应;此外,孔隙水电导率会随着盐分的输入(主要是NaCl)而增加,这会降低CH₄的产生量,从而导致排放量随之减少^[11]。

此外,高盐环境并不利于芦苇植物生长,芦苇生物量会随盐分增加而大幅降低,植株矮小甚至提前停止生长。植物高度低矮,其密度及生物量都会减小,从而CH₄排放通量减少。

除上述结论外,Weston等^[3]通过在美国New Jersey某个潮汐淡水沼泽的研究发现,潮汐淡水湿地的CH₄排放量低于寡盐湿地,从而得出少量盐分的输入会使得土壤CH₄排放量增加的结论。这与本研究的结果相符:在中低盐度(0~5)下,随着盐度升高,CH₄排放通量增加。研究表明,芦苇植物具有较强的耐盐性:在海水浓度为2.40%时几乎完全不受影响,正常完成整个生长发育过程;矿化度为6 g/L以下的咸水灌溉对芦苇的生长情况影响不显著^[14],甚至在某些盐度下对植株生长产生促进作用,芦苇生物量增加、密度增大,从而CH₄排放量也随之升高。这表明较低的盐度不足以对植物生成CH₄的过程产生抑制作用,甚至会促进CH₄的产生。

2.3 温度、光照对CH₄排放通量的影响

由图5,4~6月随着温度先增大后减小,CH₄

排放通量也随着先增大后减小,呈现出正相关关系($R=0.094$; $P=0.008<0.01$); 7~10 月温度先增大后减小,而排放通量呈现出先减小后增大的趋势,这段时期内 CH_4 排放通量与温度变化呈现负相关关系($R=-0.457$; $P=0.043<0.05$)。

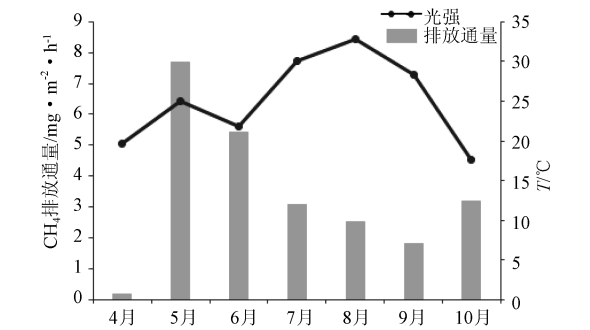


图 5 不同温度下 CH_4 排放通量的动态变化

Fig.5 Dynamic changes of CH_4 emission fluxes under different temperatures

由图 6, 4~6 月随着光照先增强后变弱, CH_4 排放通量也随着先增大后减小, 呈现出正相关关系($R=0.142$; $P=0.081>0.05$); 7~10 月随着光照先增强后变弱, 排放通量呈现先减小后增大的趋势, 这段时期内 CH_4 排放通量与光照强度变化呈现出负相关关系($R=-0.183$; $P=0.037<0.05$)。其中 5 月光照最强, 排放通量也最大。

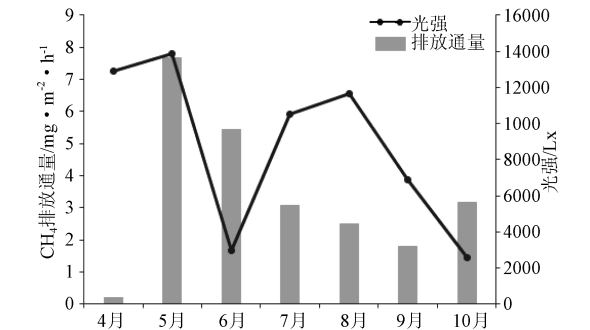


图 6 不同光强下 CH_4 排放通量的动态变化

Fig.6 Dynamic changes of CH_4 emission fluxes under different light intensity

温度,特别是土壤温度对土壤或沉积物中参与 CH_4 形成的微生物(如产 CH_4 菌等)的数量和活性有重要影响,它通过对有机质的分解进行制约,调节土壤微生物活性,同时对 CH_4 的氧化输送影响显著^[15]。有关温度对 CH_4 排放通量的作用效果,现目前的研究说法不一。Wagner 等^[15] 在 5、10、15 和 20℃ 4 种温度梯度下的研究发现,温度从 5℃ 增加到 20℃,河流沼泽地沉积物 CH_4 的排

放通量增加大约 10 倍之多; Van Der Nat F J 等^[16] 的实验认为, CH_4 排放呈现显著的季节变化规律,但植物自身的生理机能是主要影响因素,此外温度才起到一定作用。光照辐射除了改变环境温度高低外,在有光照的情况下,植物以光合作用为主;而在黑暗条件中,则主要进行呼吸作用,进而影响 CH_4 的排放^[17]。

本研究中 CH_4 总体上呈现出明显的春夏季较高,秋冬季较低的季节排放规律,而春夏季温度明显高于秋冬季,光照强度也明显更强。4~6 月随着温度、光照先增大后减小, CH_4 排放通量也随着先增大后减小,呈现出正相关关系,这表明在芦苇群落生长旺盛的初期,尽管植被进行光合作用时会使其植株根部分泌产生氧气,从而使得部分 CH_4 发生氧化反应导致排放量减少,但光合作用同时也可可为土壤中的微生物提供容易降解的有机碳,作为产生 CH_4 的反应底物从而提高产生量^[18]; 随着温度逐渐升高,土壤或沉积物中微生物的数量不断变多、活性不断增强从而有利于 CH_4 的产生,再加上光合作用对 CH_4 产生的传输作用,这些现象都加速了 CH_4 向大气中的排放。7~10 月随着温度、光照先增强后变弱,排放通量呈现先减小后增大的趋势,与温度及光照条件变化呈现出负相关关系,以上表明在芦苇生长后期,植株根部对新鲜、容易降解的有机碳的产生能力越来越弱,从而使得植物根际分泌氧气的氧化作用增强, CH_4 的氧化速率大于产生速率^[19],因而与环境条件(温度、光照)变化成负相关关系。

2.4 芦苇生物量对 CH_4 排放通量的影响

芦苇群落的生长变化情况见表 1。由表 1 可以看出,在同一盐度水平下,芦苇群落的生长表现出明显的月际变化规律:4 月份芦苇刚刚开始生长,生物量很低,到 8 月芦苇生长茂密,生物量出现最大值。这期间芦苇生长状况旺盛,生物量不断增大。此后随着温度的降低植物生长开始变缓,植株逐渐枯萎,生物量也随之降低。

芦苇植被的生长状况受盐度的影响显著。在 0~5 范围内,随着盐度越高,植被生物量增加, CH_4 排放通量增大,且在盐度为 5 时通量达到最大值;在 5~30 范围内,随着盐度越高,植被株数、高度等参数减小,植被生物量降低, CH_4 排放通量减少。因而盐度对植被生理的影响是通量控制的一部分。

表1 碱蓬群落变化情况
Tab.1 Variation of *Phragmites australis* commumty

月份	盐度	植株高度 /cm	植株密度 /株·cm ⁻²	生物量 /株·m ⁻¹	CH ₄ 通量 /mg·m ⁻² ·h ⁻¹
4	0	22	100.0	22	0.36
	5	31	75.0	23	—
	15	14	83.3	12	0.15
	30	18	8.3	2	0.06
6	0	155	91.7	142	5.01
	5	128	83.3	107	12.97
	15	120	41.7	50	1.99
	30	100	25.0	25	1.74
8	0	164	83.3	137	1.15
	5	159	108.3	172	3.71
	15	140	66.7	93	4.37
	30	53	75.0	40	0.78

利用曲线估计回归模型建立 CH₄通量(Y)与生物量(X)间的指数回归方程(图7): $y = 0.005e^{0.02x}$, $R^2 = 0.531$; $P = 0.01$, 可知两者具有显著的指数正相关关系。

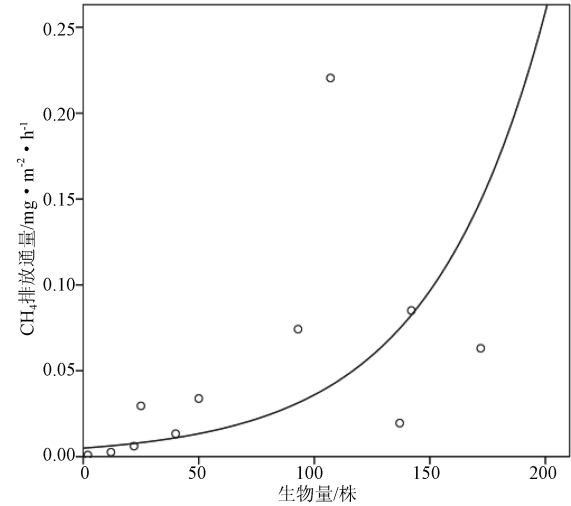


图7 CH₄排放通量与碱蓬地上生物量的关系

Fig.7 The relation between CH₄ flux and biomass of *Phragmites australis*

3 结 论

(1)CH₄排放通量总体呈现出春夏季较高,秋冬季较低的季节排放规律。总体上排放通量在0.19~7.68 mg/(m²·h)间波动,4到10月这半年内平均排放通量为3.41 mg/(m²·h)。

(2)随着盐度不断升高,CH₄排放通量表现出先增大后减小的动态变化趋势。在低盐度环境下(0~5) CH₄排放随盐度增加,中等盐度下(5~

15)排放量最多,高盐度下(15~30)排放通量又减少,与盐度变化呈负相关。在一定范围内,较高的盐度抑制CH₄的产生与排放,较低的盐度不足以对CH₄产生抑制作用,甚至会促进CH₄的产生。在高盐环境下,CH₄排放通量与盐度呈现出显著的对数负相关关系。

(3)在芦苇群落生长旺盛的初期(4~6月),随着温度、光照先增大后减小,CH₄排放通量也随着先增大后减小,呈现出正相关关系;在芦苇生长后期(7~10月),随着温度、光照先增强后变弱,排放通量呈现先减小后增大的趋势,与温度及光照条件变化呈现出负相关关系。

(4)芦苇群落的生长表现出明显的月际变化规律,且受盐度的影响显著;盐度对植被生理的影响是通量控制的一部分。CH₄排放通量与生物量具有显著的指数正相关关系。

参考文献:

[1] BARTLETT K B, BARTLETT D S, HARRISS R C, et al. Methane emissions along a salt marsh salinity gradient[J]. Biogeochemistry, 1987, 4(3): 183-202.

[2] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[3] WESTON N B, VILE M A, NEUBAUER S C, et al. Accelerated microbial organic matter mineralization following salt-water intrusion into tidal freshwater marsh soils[J]. Biogeochemistry, 2011, 102(1/2/3): 135-151.

[4] 卢昌义, 叶勇, 林鹏, 等. 海南海莲红树林土壤CH₄的产生及其某些影响因素[J]. 海洋学报, 1998, 20(6): 132-138.

[5] 王纯, 张璟钰, 黄佳芳, 等. 盐度对感潮区淡水沼泽土壤甲烷产生潜力的影响[J]. 湿地科学, 2015, 13(5): 593-601.

[6] 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[J]. 湿地科学, 2003, 1(1): 63-67.

[7] KRAUSS K W, WHITBECK J L. Soil greenhouse gas fluxes during wetland forest retreat along the lower Savannah River, Georgia (USA) [J]. Wetlands, 2011, 32(1): 73-81.

[8] 全川, 黄佳芳, 王维奇, 等. 闽江口半咸水芦苇潮汐沼泽湿地甲烷动态[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1165-1180.

[9] 曾志华, 杨民和, 余晨兴, 等. 闽江河口区淡水和半咸水潮汐沼泽湿地土壤产甲烷菌多样性[J]. 生态学报, 2014, 34(10): 2674-2681.