

胡泓,王东启,李杨杰,等.崇明东滩芦苇湿地温室气体排放通量及其影响因素[J].环境科学研究,2014,27(1):43-50.

HU Hong ,WANG Dongqi ,LI Yangjie *et al.* Greenhouse gases fluxes at Chongming Dongtan *Phragmites australis* wetland and the influencing factors[J]. Research of Environmental Sciences 2014 27(1):43-50.

崇明东滩芦苇湿地温室气体排放通量及其影响因素

胡 泓¹,王东启^{1*},李杨杰¹,陈振楼¹,吴 杰²,尹秋晓²,管永健²

1. 华东师范大学资源与环境科学学院地理系,上海 200241

2. 上海市东滩国际湿地有限公司,上海 202183

摘要: 通过静态箱-气相色谱法对崇明东滩芦苇群落在生长周期内的 3 种温室气体——CH₄、N₂O 和 CO₂ 的排放、吸收特征进行研究. 结果表明: 芦苇群落湿地 CH₄ 排放通量受温度影响较大,夏季排放通量明显高于其他季节,年均排放通量为 74.46 μg/(m²·h); N₂O 年均排放通量为 2.22 μg/(m²·h),冬季排放通量最大; CO₂ 的吸收率季节变化明显,年均排放通量为 -101.93 mg/(m²·h). 温度、芦苇植株光合作用及呼吸作用是影响 CH₄ 产生和排放的主要因素; 而沉积物氮素不足和限制,则是促使芦苇群落表现出对 N₂O 吸收的原因; 芦苇的光合作用及土壤呼吸作用随温度和季节的变化是控制芦苇湿地 CO₂ 的排放和吸收的主要因素. 芦苇植株发达的通气组织是 CH₄ 和 N₂O 由大气向沉积物扩散的通道,同时分子扩散过程也是沉积物产生的 CH₄、N₂O 和 CO₂ 扩散到大气中的途径和方式.

关键词: 芦苇; 温室气体; 排放通量; 影响因子; 传输机制

中图分类号: X51 文章编号: 1001-6929(2014)01-0043-08

文献标志码: A DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2014.01.07

Greenhouse Gases Fluxes at Chongming Dongtan *Phragmites australis* Wetland and the Influencing Factors

HU Hong¹, WANG Dong-qi¹, LI Yang-jie¹, CHEN Zhen-lou¹, WU Jie², YIN Qiu-xiao², GUAN Yong-jian²

1. Department of Geography, School of Resources and Environment Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China

2. Dongtan Wetlands International Co., Ltd., Shanghai 202183, China

Abstract: Methane (CH₄), nitrous oxide (N₂O) and carbon dioxide (CO₂) are primary greenhouse gases, many recent studies indicate that wetland is one of the major atmospheric greenhouse gases sources in the world. In order to understand the mechanisms and factors that influence greenhouse gases production in and emission from reed (*Phragmites australis*) wetland during its growth cycle, static closed chamber combined with a gas chromatograph technique was used to investigate the fluxes of three greenhouse gases (CH₄, N₂O and CO₂) at a *Phragmites australis* wetland in Chongming Dongtan. The results showed that the flux of CH₄ was greatly influenced by temperature, which the fluxes were significantly higher in summer than in other seasons. Annual average flux of CH₄ is 74.46 μg/(m²·h). The maximum flux of N₂O is in winter and the annual average flux of N₂O is 2.22 μg/(m²·h). There is obviously seasonal change in CO₂ absorption with the annual average flux as -101.93 mg/(m²·h). The production and emission of CH₄ were also affected by the photosynthesis and respiration of *Phragmites australis*, while the *Phragmites australis* communities showed consumption of N₂O because of the shortage and limitation of nitrogen in sediment. The emission and consumption of CO₂ were mainly controlled by the photosynthesis of *Phragmites australis* and the soil respiration which was influenced by temperature seasonal change. The developed aerenchyma of *Phragmites australis* provides a channel which makes CH₄ and N₂O diffuse from atmosphere to sediments, meanwhile molecular diffusion process is also a way and methods that makes CH₄, N₂O and CO₂ diffuse from sediments to atmosphere.

Key words: *Phragmites australis*; greenhouse gases; emission flux; impact factor; transport mechanism

收稿日期: 2013-06-02 修订日期: 2013-08-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(40903049, 40971259); 科学技术部项目(2010BAK69B15)

作者简介: 胡泓(1988-),男,福建龙岩人,dlu_hong@126.com.

* 责任作者,王东启(1976-),男,上海人,副研究员,博士,主要研究方向为环境地球化学, dqwang@geo.ecnu.edu.cn

全球变暖已经成为全球变化中最显著特征之一,并且该趋势已然成为事实^[1-2]. 最新研究^[3]表明,全球变暖的趋势还在进一步持续进行,在未来的几十年

内还会继续加快. 对于全球变暖, 由人类活动以及大自然原因向大气输送的温室气体占有重要地位^[4-5]. CO_2 、 CH_4 和 N_2O 是3种最为重要的温室气体, 在全球变暖过程中占有超过70%的贡献^[6]. 研究^[7]发现2010—2011年大气中 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 的浓度平均每年分别以0.28%、0.31%和0.51%的速率增加.

河口湿地是温室气体重要排放源, 河流、河口和大陆架每年有 $11 \times 10^{12} \sim 17 \times 10^{12}$ g N_2O 排入大气, 占水生 N_2O 排放量的35%^[8-9]. 在河口, 由于河流碳输入相互作用、沉降和再悬浮过程, 水和沉积物中微生物过程、潮汐交换等, CH_4 和 CO_2 的排放具有较大的时空变异性. 其中河口 CH_4 排放通量为 $0.32 \sim 8 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ^[10]. 芦苇(*Phragmites australis*) 是全球湿地分布最广、生产力最高的大型水生植物^[11], 具有发达的根系组织和通气组织, 是与外界大气传输的重要媒介. 许多研究^[12-13]表明, 温室气体的排放量与具有通气组织的植被之间存在明显的正相关关系, 因此芦苇植被是影响河口湿地温室气体排放的重要生物因子, 并且也是重要的温室气体排放源^[14-15]. 目前对崇明东滩温室气体排放通量的研究主要集中在中潮滩的海三菱蘆草的温室气体排放上^[16-17]. 由于高潮滩芦苇植株较高, 难以进行长期的、连续性的研究, 所以该类研究尚属薄弱. 笔者通过对崇明东滩湿地公

园芦苇群落从生长季节到凋亡季节 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 排放通量的监测, 分析芦苇群落温室气体的排放特征, 以及温度和芦苇植株光合作用、呼吸作用对芦苇湿地温室气体排放通量的影响, 以期开展河口芦苇湿地温室气体排放研究提供参考.

1 研究地区和研究方法

1.1 研究地区概况

崇明东滩位于崇明岛的最东端, 是长江口自然保护区规模最大的滩涂湿地. 东滩湿地公园处于崇明东滩92#~98#大堤之间, 面积为6.5 km², 该园处于《拉萨姆公约》所认定的国家重要湿地内, 并且园内生长的大片芦苇植株与东滩高潮滩的芦苇植株为同一品种. 采样地选在东滩湿地公园的芦苇群落中, 测定园内芦苇带土壤基本理化指标, 结果如表1所示. 3—12月环境参数也见表1. 春季(3—5月)为多雨季节、降水量大, 故表层土壤10 cm平均含水率达到最高, 约是其他季节含水率的1.3倍; 春季土壤平均容重比夏季(6—8月)高, 比秋、冬季(9—12月)低; 全年最高平均气温出现在7月, 当月在5、10及15 cm深度的地温也处于全年最高, 致使土壤表层植被凋落物易被微生物分解成腐殖质, 使得当月的土壤 w (有机碳) 较高.

1.2 样品采集

表1 环境参数和表层10 cm土壤理化指标

Table 1 Environmental parameters and properties of top 10 cm sediment

采样时间	w (有机碳)/(g/kg)	含水率/%	容重/(g/cm ³)	平均气温/°C	地温/°C		
					5 cm	10 cm	15 cm
3月	8.81 ± 1.08	48.70	1.38 ± 0.23	10.0	13.2	13.0	12.9
4月	9.31 ± 1.13	45.20	1.34 ± 0.19	12.7	17.7	17.3	16.6
5月	12.06 ± 0.54	44.00	1.20 ± 0.15	19.5	20.3	19.6	18.7
6月	8.29 ± 1.51	37.60	1.21 ± 0.21	28.0	28.0	26.7	24.7
7月	12.01 ± 1.46	38.49	1.20 ± 0.26	28.3	28.4	28.0	26.8
8月	7.25 ± 1.03	33.84	1.44 ± 0.21	20.8	26.7	26.1	24.9
9月	8.00 ± 1.79	33.92	1.55 ± 0.23	19.8	22.9	22.1	21.7
10月	7.02 ± 0.11	33.22	1.75 ± 0.17	16.9	18.2	17.9	17.4
12月	7.81 ± 1.08	39.10	1.67 ± 0.17	1.4	7.0	6.5	6.4

于2012年3—10月、12月的每个月下旬, 在崇明东滩湿地公园芦苇样地进行样品采集. 采样同时记录光照强度、气温、地温(5、10、15 cm)和气压等环境参数. 7月为芦苇最茂盛时期, 除了采集芦苇群落正常排放的温室气体样品外, 还剪除芦苇地上部分及对芦苇茎截面进行封口处理, 分别采集前述2个处理芦苇群落排放的温室气体样品, 以期对比芦苇光合作用对温室气体产生和排放的影响.

芦苇采样装置仿照静态箱的原理自制设计. 采样装置用钢架结构搭建, 规格为2.4 m × 2.4 m × 3.0 m, 外部选用透光性良好的透明塑料布罩住, 形成密封体系. 采样时在装置内部吊一风扇用于混匀箱内气体, 装置一侧伸出带有三通阀的气管进行采气. 每月采样周期为1 d, 分别在00:00、06:00、12:00和18:00四个时间点采集气体样品, 每次罩箱时间为1 h, 用100 mL的注射器每隔20 min抽取3个平行装

置内的气体,并转移到气袋中,带回实验室分析.采样完成后,打开罩子让内外空气交换;同时,采集3根芦苇湿地土壤柱样,按照1 cm 分层装入自封袋,分析土壤理化指标.

1.3 样品处理和分析

$\rho(\text{CH}_4)$ 、 $\rho(\text{N}_2\text{O})$ 和 $\rho(\text{CO}_2)$ 由Agilent 7890型气相色谱仪测定,采用标准气体进行外标法校正. CH_4 与 CO_2 检测器均为离子化火焰检测器(FID),工作温度为200℃,使用长度为2 m的60~80目(180~250 μm) XMS填充物分离柱(直径2 mm)完成 CH_4 分离,柱温55℃,载气为高纯氮,流量为30 cm^3/min . N_2O 检测器为电子捕获检测器(ECD),工作温度为330℃,使用2根长分别为1和3 m的80~100目(150~180 μm)的PORAPAKOQ填充物分离柱(直径2 mm)完成 N_2O 的分离和反吹功能,柱温55℃,载气为高纯氮,流量为35 cm^3/min .

采集的土壤柱样按1 cm 分层后,置于70℃的烘箱内烘干至恒质量.根据样品湿质量和干质量差值计算土壤含水率和容重.烘干的土壤柱样经研磨后过60目(250 μm)筛,按照重铬酸钾油浴法测定土壤 w (有机碳).

1.4 计算方法

通过标准气体和待测气体峰面积,采用下式计算温室气体排放通量:

$$F = \frac{\Delta c}{\Delta t} \cdot \frac{V}{A} = H \times 10^{-3} \times \frac{\Delta c}{\Delta t}$$

$$c = \frac{P}{RT} \times m$$

式中: V 为采样箱体积, m^3 ; F 为温室气体排放通量, $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 或 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; A 为采样箱横截面积, m^2 ; H 为采样箱净高, m ; $\Delta c/\Delta t$ 为采样箱内气体质量浓度随时间的变化率, $\text{mg}/(\text{L}^2 \cdot \text{h})$ 或 $\mu\text{g}/(\text{L}^2 \cdot \text{h})$; P 为采样箱气压; R 为普适常数; T 为采样箱温度(取采样开始和结束时的平均值), K ; m 为气体分子摩尔质量.计算出某一时刻3个平行样的排放通量,取平均值作为该时刻的排放通量.

2 结果

2.1 CH_4 排放特征

CH_4 排放通量如图1所示.由图1可见,在芦苇生长初期(3—4月), CH_4 排放通量小,昼、夜变化不大;5月以后排放通量显著升高,昼、夜差异明显;7—8月芦苇群落中 CH_4 的排放通量变小;进入9月则出现明显的吸收过程,其中白天表现出较强的 CH_4 吸收;10月和12月,芦苇开始凋零, CH_4 排放通量减小,基本趋于零,并且昼、夜基本相近.全年芦苇群落 CH_4 表现为排放趋势,年均排放通量为74.46 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,其中6月排放通量(平均值为672.63 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)最大,9月吸收通量(平均值为194.34 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)最大.

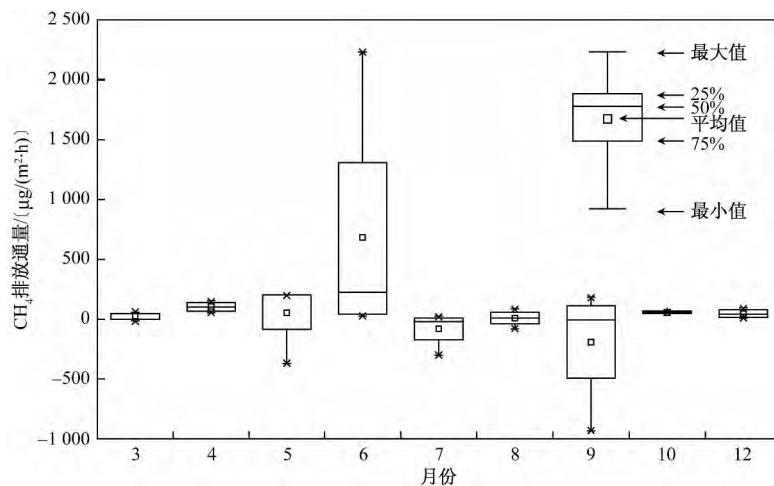


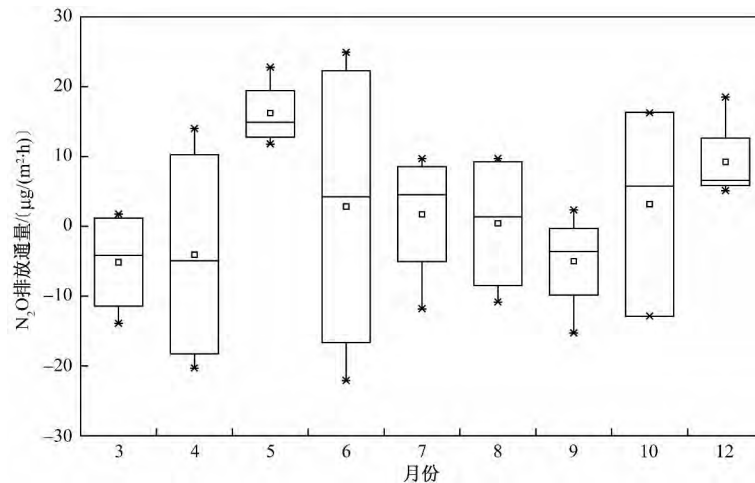
图1 各月 CH_4 排放通量的变化

Fig. 1 The changes of CH_4 emission fluxes

2.2 N_2O 排放特征

受土壤中可利用硝酸盐的限制, N_2O 的产生量和排放通量均较小;同时,受芦苇影响, N_2O 排放通量日变化差异较大.芦苇群落 N_2O 年均排放通量为2.22

$\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,其中5月排放通量(16.19 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)达到最大,9月吸收通量(4.95 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)最大(见图2). N_2O 排放通量昼、夜变化明显,其中白天表现为排放趋势,夜晚主要表现为吸收趋势.6月昼、夜



注: 图例见图1.

图2 各月 N_2O 排放通量的变化

Fig. 2 The changes of N_2O emission fluxes

温差最大,此时 N_2O 的排放通量的昼、夜变化也处于最大.

2.3 CO_2 的年吸收通量和季节变化

在全年芦苇生长期中,芦苇群落在白天均表现为大气 CO_2 的强吸收汇,夜晚则表现为排放源.从图3可知,芦苇群落 CO_2 的交换季节变化明显,3—4月芦苇生长季节,植株个体较小,吸收 CO_2 能力较弱;5月

芦苇生物量较大,个体生长最为旺盛,其对 CO_2 的吸收通量明显高于其他月份,吸收通量为 $250.15 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;在6—10月,随着气温的升高,土壤呼吸作用增强,同时8月以后芦苇生长进入衰退期,因此,芦苇群落中 CO_2 净吸收通量逐渐降低;12月芦苇死亡,土壤呼吸使得群落表现出微弱的 CO_2 排放.芦苇群落 CO_2 年均排放通量为 $-101.93 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$.

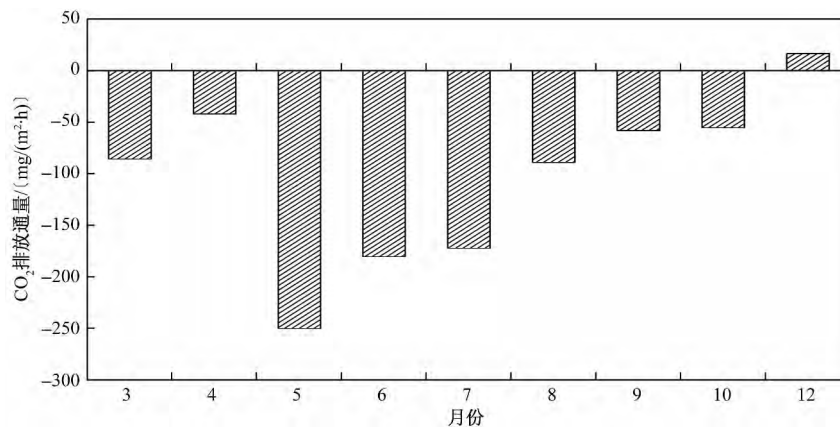


图3 各月 CO_2 排放通量变化

Fig. 3 The changes of CO_2 exchange fluxes

3 分析与讨论

3.1 温度对 CH_4 和 N_2O 排放通量的影响

温度是影响湿地 CH_4 排放的主要因素之一^[18].土壤温度不仅会影响土壤或沉积物中产甲烷菌的数量和活性^[19],对分解有机物的微生物也有影响^[20].Thomas等^[21]认为, CH_4 排放通量的大小直接取决于温度,当气温由 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 升至 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, CH_4 的排放通量

会提高1倍;Wagner等^[22]在不同温度(5 、 10 、 15 和 $20 \text{ }^\circ\text{C}$)下的培养试验表明,河流沼泽从 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 升至 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 则沉积物 CH_4 的排放量提高了近10倍;而Schütz等^[23]却认为, CH_4 的排放率和土壤温度的相关性较差,甚至没有明显的相关性;也有研究^[24]表明, CH_4 的排放季节性变化显著,主要和植物的生理机能相关,其次才和温度有关.该研究中,夏季(6—8月,平

均气温 25.68 °C) 气温显著高于春季(3—5 月, 平均气温 14.06 °C), 并且 CH₄ 排放通量也比春季大; 但在秋季(9—10 月, 平均气温为 18.35 °C), CH₄ 呈吸收趋势, 芦苇带沉积物中 CH₄ 的产生速率小于其氧化速率, 表现为吸收作用, 排放通量为负值; 冬季(12 月) 气温最低, CH₄ 的排放通量也最小(见图 4)。这说明在芦苇的生长旺盛季节, 虽然其进行光合作用时根部泌氧会导致部分 CH₄ 的氧化, 但同时也为沉积

物中微生物提供易降解的有机碳; 随着温度的升高, 微生物的数量和活性也不断增强, 有利于 CH₄ 产生, 加之光合作用对 CH₄ 产生的传输作用, 均加速了 CH₄ 向大气中的排放。在芦苇生长后期, 其根部提供新鲜易降解有机碳的能力逐渐减弱, 根际泌氧的氧化作用加强, 使得 CH₄ 的氧化速率大于其产生速率, 出现了吸收大气 CH₄ 的现象。

Dobbie 等^[25] 在 5、12 和 18 °C 下的模拟试验发现,

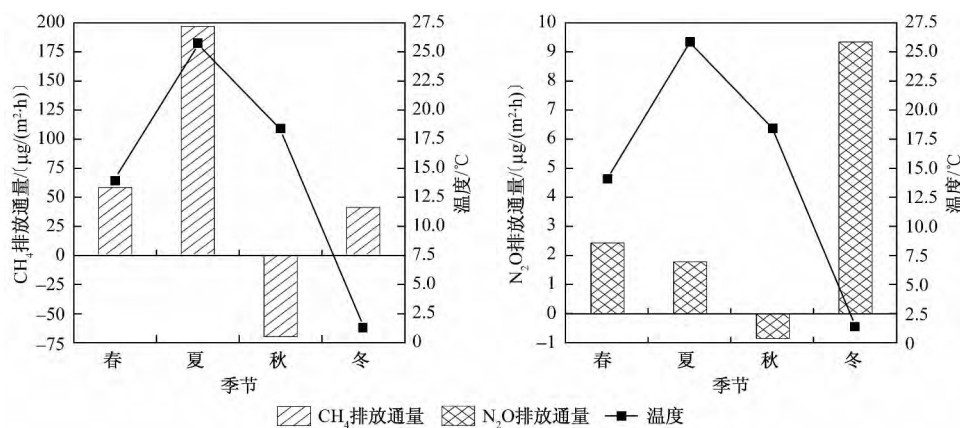


图 4 CH₄ 与 N₂O 季节排放通量的变化

Fig. 4 The seasonal changes of CH₄ and N₂O emissions

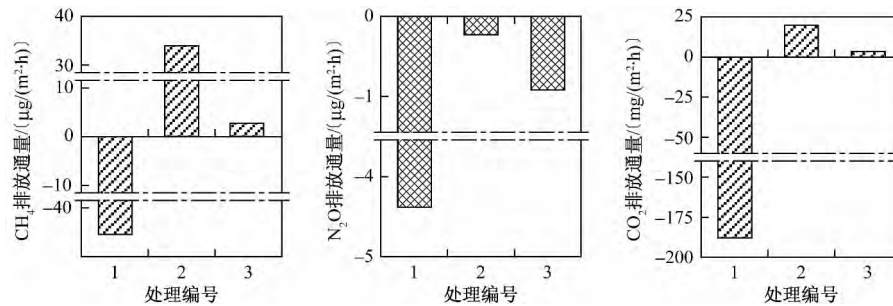
N₂O 的排放通量随着温度的升高急剧上升。同样在 Smith^[26] 等的研究中也得到 N₂O 的排放通量和土壤温度呈显著正相关的结论。但在该研究中, 随着气温升高, N₂O 的排放通量却减少, 在秋季变成对 N₂O 的吸收; 而冬季温度最低时, N₂O 的排放通量却最高。这表明 N₂O 排放量和气温并无显著的相关关系。在春季(3—5 月), 土壤中水分充足(含水率平均值为 46.22%), 易保持更为缺氧的环境, 有利于反硝化进行和 N₂O 的产生。Arriaga 等^[27] 研究表明, 当土壤孔隙水饱和度在 60%~90% 之间时, 反硝化能力较强。Dobbie 等^[25] 研究也发现, 当温度(18~25 °C) 适宜、草地土壤孔隙水饱和度在 60% 时, N₂O 排放量较大。夏季土壤含水率平均值为 36.65%, 低于春季(46.22%), 有利于氧气向土壤扩散, 导致反硝化能力减弱。秋季(9—10 月) 芦苇的生长吸收加剧了沉积物中硝酸盐的匮乏, 同时其光合作用对根际微生物活性的影响, 使得在秋季出现对大气 N₂O 吸收的现象。冬季(12 月) 芦苇死亡, 有机质逐渐分解, 虽然此时低温使得微生物总体活性降低, 但有机质分解提供了反硝化需要的氮源, 同时在低温下反硝化过程有较高比例的 N₂O 产生^[28-29], 因此沉积物 N₂O 排放速率

较高。

3.2 芦苇植株对温室气体排放的影响

湿地植被对 CH₄ 产生和排放过程有着重要影响^[30-31]。湿地 CH₄ 排放是其产生、氧化和传输过程的最终结果^[32-34]。植物体传输在芦苇湿地 CH₄ 传输中占有重要地位^[35]。在湿地中, 芦苇是 CH₄ 产生底物的重要提供者, 不过芦苇同样也成为氧气传输到根部加速氧化 CH₄ 的内部通道^[36-38]。芦苇对 CH₄ 的传输有对流传输和分子扩散传输 2 种方式, 其中对流传输更为重要, 其对 CH₄ 排放量的贡献率为 54%~87%, 而分子扩散传输仅为 13%~46%^[36]。Christensen 等^[33] 研究表明, 分子扩散对 CH₄ 排放量的贡献率为 18%~50%, 不超过总贡献率的一半。

对芦苇样地的剪切试验结果如图 5 所示。由图 5 可见, 芦苇光合作用使得芦苇群落 CH₄、N₂O 和 CO₂ 均呈现较强的吸收。剪去芦苇地上部分, N₂O 的吸收能力显著减小, 而 CH₄ 和 CO₂ 均呈排放趋势, 这是因为芦苇植株在气体交换过程中对气体传输效率和根部泌氧有重要影响。许多研究认为, 湿地产生的 CH₄ 90% 以上在释放到大气前会被氧化^[39]; 甚至还有研究认为, CH₄ 被氧化的概率达到 100%^[40]。剪去



1—芦苇; 2—剪芦苇地上部分; 3—剪芦苇地上部分, 并对截面进行封口处理。

图5 芦苇植被对 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 排放通量的影响

Fig. 5 The effect of *Phragmites australis* on the emission of CH_4 , N_2O and CO_2

芦苇的地上部分, 没有了光合作用对 CO_2 的吸收和根部的泌氧作用, 使得根部形成缺氧环境, 易于 CH_4 和 N_2O 的产生. 剪芦苇只是失去了植被的蒸腾作用, 然而植被茎的空隙提供了绕过氧化 CH_4 的区域, 提供了直接排放到大气的通道^[41-42]. 通过封口处理试验发现, 与只剪芦苇地上部分试验相比, 封口处理完全隔断了植被对气体运输的影响, 导致封口后 CH_4 和 CO_2 的排放通量相应减小. 总之, 植被的通气组织影响了温室气体的传输过程. 分子扩散作用也是这3种气体通过芦苇植株的方式之一. 对比试验结果表明, 在潮滩沉积物中, 由于硝酸盐氮素的缺乏, 沉积物表现出对大气 N_2O 的吸收, 而芦苇成为大气 N_2O 向下

传输的通道, 促进了 N_2O 扩散进入到沉积物中^[43].

3.3 与其他湿地类型 CH_4 、 N_2O 及 CO_2 排放通量的比较

将该研究结果与其他地区湿地进行比较, 如表2所示. 由表2可知, 美国内布拉斯加州芦苇湿地 CH_4 排放通量明显大于我国辽河三角洲芦苇湿地, 说明不同地区芦苇湿地 CH_4 排放通量差别较大, 存在明显的空间差异性. 该研究中崇明东滩芦苇湿地 N_2O 排放通量大于美国阿巴拉契亚南部的滨河湿地和欧洲河口湿地, 但低于潮汐咸水湿地; 而 CH_4 和 N_2O 排放通量与三江平原沼泽湿地相近, 但与若尔盖高原泥炭湿地不同, 其对 CO_2 表现为明显的吸收作用.

表2 不同地区 CH_4 、 N_2O 及 CO_2 排放通量的对比

Table 2 CH_4 , N_2O and CO_2 emissions at the different regions of the world

湿地类型	研究区域	排放通量 / (mg/(m ² ·h))			数据来源
		CH_4	N_2O ¹⁾	CO_2	
泥炭湿地	若尔盖高原	2.43	20	203.22	文献[44]
小叶章草甸沼泽湿地	三江平原	-0.16 ²⁾ , 1.71 ³⁾	4.65 ²⁾ , -1.24 ³⁾		文献[45]
人工湿地	爱沙尼亚南部	0 ~ 0.265	-0.4 ~ 58		文献[46]
芦苇湿地	美国内布拉斯加州	9.13			文献[47]
	辽河三角洲	0.52			文献[48]
	崇明	0.074	2.22	-101.93	该研究
河口湿地	九龙江	0.022			文献[49]
	欧洲河口		1.79		文献[51]
潮汐咸水湿地	温带红树林和盐沼		15.7		文献[52]
滨河湿地	美国阿巴拉契亚南部		0.28		文献[50]

1) 单位为 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; 2) 地表常年无积水; 3) 有季节性积水.

3.4 芦苇群落温室气体通量及其全球增温潜势意义

湿地具有很高的初级生产力, 湿地植物可通过光合作用固定大气中的 CO_2 , 在全球碳循环中占有极其重要的地位^[53]. 研究^[14]表明, 湿地植物净同化的碳只有15%再释放到大气中, 因此湿地生态系统是一个重要的碳汇. 全球增温潜势提供了衡量一种温室

气体相对另一种温室气体增温效应的方法, 按照惯例, 全球增温潜能以 CO_2 单量来衡量^[54-55]. 百年时间尺度上, 1分子 CH_4 排放到大气中相当于23分子 CO_2 的辐射影响, 而1分子 N_2O 的辐射影响是 CO_2 的296倍^[56]. 该研究测定 CH_4 的年均排放通量为 $74.46 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 相当于 $1.71 \text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的 CO_2 排

放通量; N_2O 的年均排放通量为 $2.22 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 相当于 $0.66 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的 CO_2 排放通量; CO_2 的年均排放通量为 $-101.93 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。综上, 可得芦苇群落的平均“净” CO_2 排放通量为 $-99.56 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 其“净”固碳能力为 $2378.6 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

4 结论

a) 对芦苇群落 CH_4 和 N_2O 全年表现为排放过程, CO_2 全年表现为吸收过程。 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 的年平均排放通量分别为 74.46 、 $2.22 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $-101.93 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

b) CH_4 的排放通量受温度影响较大, 夏季排放通量明显高于其他季节, 但是由于同时还受到芦苇光合作用的影响, 使得芦苇湿地 CH_4 和 N_2O 的排放通量和温度没有显著的相关关系; 冬季是 N_2O 排放通量最大的季节; CO_2 的吸收通量季节变化明显, 芦苇的光合作用以及土壤呼吸作用随温度和季节的变化是控制芦苇湿地 CO_2 净吸收或排放的决定因素。

c) 芦苇植被体是影响温室气体排放的重要因素。芦苇植株发达的通气组织是 CH_4 和 N_2O 在大气和沉积物之间交换的通道。崇明东滩芦苇群落的年平均“净”固碳能力为 $2378.6 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

参考文献 (References):

- [1] BRADLEY R S. Many citations support global warming trend [J]. Science 2001 292(5524): 2011.
- [2] KATYAL A K. Climate change: social, economic, and environmental sustainability [J]. Environmental Forensics, 2009, 10(3): 177-182.
- [3] HANSEN J, ROEDY R, SATO M, et al. Global warming continues [J]. Science 2002 295(5553): 275.
- [4] YUAN Zhuojian, QIAN Yukun, QI Jindian, et al. The potential impacts of warmer-continent-related lower-layer equatorial westerly wind on tropical cyclone initiation [J]. Advances in Atmospheric Sciences 2012 29(2): 333-343.
- [5] DUXBURG J M, HARPER L A, MOSIER A R. Contributions of agroecosystems to global climate change [J]. Agricultural Ecosystem Effects on Trace Gases and Global Climate Change, 1993 55: 1-18.
- [6] PEI Zhiyong, OUYANG Hua, ZHOU Caiping, et al. Fluxes of CO_2 , CH_4 and N_2O from alpine grassland in the tibetan plateau [J]. Journal of Geographical Sciences 2003 13(1): 27-34.
- [7] WMO. Global atmosphere watch: greenhouse gas bulletin [R]. Geneva: WHO 2012.
- [8] BANGE H W, RAPSOMANIKIS S, ANDREA M O. Nitrous oxide in coastal waters [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10(1): 197-207.
- [9] SEITZINGER S P, KROEZE C, STYLES R V. Global distribution of N_2O emissions from aquatic systems: natural emissions and anthropogenic effects [J]. Chemosphere: Global Change Science, 2000 2(3/4): 267-279.
- [10] ABRIL G, BORGES A V. Carbon dioxide and methane emissions from estuaries [C]//Greenhouse gas emissions: fluxes and processes. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag 2005: 187-207.
- [11] CLEVERING O A, LISSNER J. Taxonomy, chromosome numbers, clonal diversity and population dynamics of phragmites australis [J]. Aquatic Botany, 1999 64(3/4): 185-208.
- [12] STRÖM L, CHRISTENSEN T R. Below ground carbon turnover and greenhouse gas exchanges in a sub-arctic wetland [J]. Soil Biology and Biochemistry 2007 39(7): 1689-1698.
- [13] MIAO Y, SONG C, SUN L, et al. Growing season methane emission from a boreal peatland in the continuous permafrost zone of northeast China: effects of active layer depth and vegetation [J]. Biogeosciences 2012 9(11): 4455-4464.
- [14] BRIX H, SORRELL B K, LORENZEN B. Are *Phragmites*-dominated wetlands a net source or net sink of greenhouse gases? [J]. Aquatic Botany 2001 69(3/4): 313-324.
- [15] JUUTINEN S, LARMOLA T, REMUS R, et al. The contribution of *Phragmites australis* litter to methane (CH_4) emission in planted and non-planted fen microcosms [J]. Biology and Fertility of Soils, 2003 38(1): 10-14.
- [16] 王东启, 陈振楼, 王军, 等. 夏季长江口潮间带 CH_4 , CO_2 和 N_2O 通量特征 [J]. 地球化学 2007 36(1): 77-88.
- [17] 杨红霞, 王东启, 陈振楼, 等. 长江口崇明东滩潮间带温室气体排放初步研究 [J]. 海洋环境科学 2006 25(4): 20-23.
- [18] 丁维新, 蔡祖聪. 温度对甲烷产生和氧化的影响 [J]. 应用生态学报 2003 14(4): 604-608.
- [19] FAUBER A C, HOPPERT M, WALTHER P, et al. Root of the wetland plants *typha latifolia* and *phragmites australis* are inhabited by methanotrophic bacteria in biofilms [J]. Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants 2012 207(11): 775-782.
- [20] SORRELL B K, BRIX H, SCHIEMPH H H, et al. Die-back of *Phragmites australis*: influence on the distribution and rate of sediment methanogenesis [J]. Biogeochemistry, 1997 36(2): 173-188.
- [21] THOMAS K L, BENSTEAD J, DAVIES K L, et al. Role of wetland plants in the diurnal control of CH_4 and CO_2 fluxes in peat [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996 28(1): 17-23.
- [22] WAGNER D, PFEIFFER E M. Two temperature optima of methane production in a typical soil of the elbe river marshland [J]. FEMS Microbiology Ecology, 1997 22(2): 145-153.
- [23] SCHÜTZ H, SEILER W, CONRAD R. Influence of soil temperature on methane emission from rice paddy fields [J]. Biogeochemistry, 1990 11(2): 77-95.
- [24] VAN DER NAT F J, MIDDELBURG J J. Methane emission from tidal freshwater marshes [J]. Biogeochemistry, 2000 49(2): 103-121.
- [25] DOBBIE K E, SMITH K A. The effects of temperature, water-filled pore space and land use on N_2O emissions from an imperfectly

- drained gleysol [J]. *European Journal of Soil Science* ,2001 ,52 (4) : 667-673.
- [26] SMITH K A , THOMSON P E , CLAYTON H , *et al.* Effects of temperature , water content and nitrogen fertilization on emissions of nitrous oxide by soils [J]. *Atmos Environ* ,1998 ,32(9) : 3301-3309.
- [27] ARRIAGA H , SALCEDO G , CALSAMIGLIA S , *et al.* Effect of diet manipulation in dairy cow N balance and nitrogen oxides emissions from grasslands in northern Spain [J]. *Agriculture , Ecosystems and Environment* 2010 ,135(1/2) : 132-139.
- [28] HOLTAN-HARTWIG L , DÖRSCH P , BAKKEN L R. Low temperature control of soil denitrifying communities: kinetics of N₂O production and reduction [J]. *Soil Biology & Biochemistry* , 2002 ,34(11) : 1797-1806.
- [29] ALM J , SAARNIO S , NYKÄNEN H , *et al.* Winter CO₂ , CH₄ and N₂O fluxes on some natural and drained boreal peatlands [J]. *Biogeochemistry* ,1999 ,44(2) : 163-186.
- [30] 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.
- [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 [J]. *生态学报* 2005 ,25(12) : 3375-3382.
- [32] STRÖM L , EKBRG A , MASTEPANOV M , *et al.* The effect of vascular plants on carbon turnover and methane emissions from a tundra wetland [J]. *Global Change Biology* 2003 ,9(8) : 1185-1192.
- [33] CHRISTENSEN T R , PANIKOV N , MASTEPANOV M , *et al.* Biotic controls on CO₂ and CH₄ exchange in wetlands: a closed environment study [J]. *Biogeochemistry* 2003 ,64(3) : 337-354.
- [34] AVERY G B , SHANNON R D , WHITE J R , *et al.* Controls on methane production in a tidal freshwater estuary and a peatland: methane production via acetate fermentation and CO₂ reduction [J]. *Biogeochemistry* 2003 ,62(1) : 19-37.
- [35] GRÜNFELD S , BRIX H. Methanogenesis and methane emissions: effects of water table , substrate type and presence of phragmites australis [J]. *Aquatic Botany* ,1999 ,64(1) : 63-75.
- [36] 王维奇,曾从盛 仝川. 芦苇湿地甲烷排放机理及排放通量研究进展 [J]. *农业系统科学与综合研究* 2008 ,24(1) : 20-25.
- [37] JOABSSON A , CHRISTENSEN T R , WALLEN B. Vascular plant controls on methane emissions from northern peat-forming wetlands [J]. *Trends in Ecology & Evolution* ,1999 ,14(10) : 385-388.
- [38] JOABSSON A , CHRISTENSEN T R. Methane emissions from wetlands and their relationship with vascular plants: an arctic example [J]. *Global Change Biology* 2001 ,7(8) : 919-932.
- [39] YAVITT J B , LANG G E , DOWNEY D M. Potential methane production and methane oxidation rates in peatland ecosystems of the Appalachian mountains [J]. *Global Biogeochemical Cycles* , 1988 ,2(3) : 253-268.
- [40] VASANDER H , KETTUNEN A. Carbon in boreal peatlands [C]// *Boreal peatland and ecosystems*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag , 2006 ,188: 165-194.
- [41] WHITING G J , CHANTON J P. Plant-dependent CH₄ emission in a subarctic Canadian fen [J]. *Global Biogeochemical Cycles* ,1992 ,6(3) : 225-231.
- [42] CHANTON J P. The effect of gas transport on the isotope signature of methane in wetlands [J]. *Organic Geochemistry* ,2005 ,36(5) : 753-7687.
- [43] YU Zhongjie , LI Yangjie , DENG Huangang , *et al.* Effect of *Scirpus mariqueter* on nitrous oxide emissions from a subtropical monsoon estuarine wetland [J]. *J Geophys Res: Biogeosciences* 2012 ,117 (G2) . doi: 10.1029/2011JG001850.
- [44] 王德宣. 若尔盖高原泥炭沼泽二氧化碳、甲烷和氧化亚氮排放通量研究 [J]. *湿地科学* 2010 ,8(3) : 220-224.
- [45] 于家宝,刘景双 孙志高,等. 中国东北区淡水沼泽湿地 N₂O 和 CH₄ 排放通量及主导因子 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学* , 2009 ,39(2) : 177-187.
- [46] MANDER U , TEITER S , AUGUSTIN J. Emission of greenhouse gases from constructed wetlands for wastewater treatment and from riparian buffer zones [J]. *Water Sci Technol* ,2005 ,52(10/11) : 167-176.
- [47] KIM J N , VERMA S B , BILLESBACH D P. Seasonal variation in methane emission from a temperate *Phragmites*-dominated marsh: effect of growth stage and plant-mediated transport [J]. *Global Change Biology* ,1999 ,5(4) : 433-440.
- [48] 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.
- [49] ALONGI D M , PFITZNER J , TROTT L A , *et al.* Rapid sediment accumulation and microbial mineralization in forests of the mangrove *kandelia candel* in the Jiulongjiang estuary , China [J]. *Estuarine , Coastal and Shelf Science* 2005 ,63(4) : 605-618.
- [50] WALKER J T , GERON C D , VOSE J M , *et al.* Nitrogen trace gas emissions from a riparian ecosystem in southern Appalachia [J]. *Chemosphere* 2002 ,49(10) : 1389-1398.
- [51] KENNY C , YAMULKI S , BLACKWELL M , *et al.* The release of nitrous oxide from the intertidal zones of two European estuaries in response to increased ammonium and nitrate loading [J]. *Water Air Soil Pollut: Focus* 2004 ,4(6) : 61-66.
- [52] LIVESLEY S J , ANDRUSIAK S M. Temperate mangrove and salt marsh sediments are a small methane and nitrous oxide source but important carbon store [J]. *Estuarine , Coastal and Shelf Science* , 2012 ,97: 19-27.
- [53] 梅雪英 张修峰. 长江口典型湿地植被储碳、固碳功能研究: 以崇明东滩芦苇带为例 [J]. *中国生态农业学报* ,2008 ,16(2) : 269-272.
- [54] ROBERTSON G P , GRACE P R. Greenhouse gas fluxes in tropical and temperate agriculture: the need for a full-cost accounting of global warming potentials [J]. *Tropical Agriculture in Transition—Opportunities for Mitigating Greenhouse Gas Emissions* 2004: 51-63.
- [55] WHITING G J , CHANTON J P. Greenhouse carbon balance of wetlands: methane emission versus carbon sequestration [J]. *Tellus* 2001 ,53(5) : 521-528.
- [56] IPCC. *Climate change 2001: the scientific basis* [R]. Cambridge: Cambridge University Press 2001.

(责任编辑:孙彩萍)