

Dynamics of CH₄, CO₂ and N₂O Fluxes in Saline-Alkaline Soils of the Yellow River Delta, China*

Yuanyuan Nie^{1,2}, Yue Pei^{1,2}, Lihua Zhang^{2#}, Hongbo Shao^{1,2,3#}, Liwen Zhang²

¹College of Science and Technology, China Agricultural University (Yantai), Yantai

²Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai

³Institute of Life Sciences, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao

Email: #lh Zhang@yic.ac.cn, #hbshao@yic.ac.cn

Received: Mar. 26th, 2012; revised: May 9th, 2012; accepted: Jun. 10th, 2012

Abstract: As an important constituent of terrestrial land, salt-affected soils play important roles in greenhouse gas emission. However, our knowledge about greenhouse gas (GHG) turnover between the atmosphere and the saline soils is very limited. In order to evaluate the potential of GHG consumption in saline soils, by Blackbox-HPLC method we measured gas fluxes of carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), and nitrous oxide (N₂O) from the soil surface to the atmosphere under saline-alkaline mudflat and various community types in the Yellow River Delta in China. The CO₂ emission followed the order: *T. chinensis* > *P. australis* > *S. salsa* > Saline-alkaline mudflat. On the whole, saline-alkaline mudflat and different vegetations acted as CH₄ sink before 12:00 and CH₄ source after 12:00. However, the four ecosystems acted as N₂O source in the whole day. Although measurements of the CO₂, CH₄, and N₂O fluxes were taken simultaneously, CH₄ and N₂O fluxes were strongly correlated with soil temperature at different depths in *T. chinensis* community. The significantly negative correlations were also found between air and soil temperature and CO₂ or CH₄ fluxes in *S. salsa*, N₂O fluxes in *P. australis*. While no significant correlation was found between greenhouse gases with soil moisture and electrical conductivity. These results probably suggest that factors other than soil temperature, moisture and salinity exerted a larger impact on CO₂, CH₄ and N₂O flux because of its higher spatial and temporal variability with complexity.

Keywords: Greenhouse Gas; Carbon Dioxide; Methane; Nitrous Oxide; Saline-Alkaline Soils; Yellow River Delta

黄河三角洲不同类型盐碱地 CO₂, CH₄ 和 N₂O 通量特征*

聂园园^{1,2}, 裴悦^{1,2}, 张立华^{2#}, 邵宏波^{1,2,3#}, 张俐文²

¹ 中国农业大学(烟台)理工学院, 烟台

² 中国科学院烟台海岸带研究所中国科学院海岸带环境过程重点实验室, 烟台

³ 青岛科技大学生命科学研究所, 青岛

Email: #lh Zhang@yic.ac.cn, #hbshao@yic.ac.cn

收稿日期: 2012年3月26日; 修回日期: 2012年5月9日; 录用日期: 2012年6月10日

摘要: 盐碱地作为陆地的重要组成部分, 在温室气体排放中的作用不可忽视。为探究滨海盐碱地温室气体排放通量, 本研究于2011年10月运用静态暗箱-气相色谱法对黄河三角洲不同类型盐碱地 CO₂、CH₄ 和 N₂O 日通量进行了原位观测。结果表明, 不同植被覆盖与大气界面的 CO₂、CH₄ 和 N₂O 通量存在明显差异。CO₂ 日排放通量: 柽柳群落 > 芦苇群落 > 翅碱蓬群落, 分别为 108.2999, 84.5160, 41.0333 mg·m⁻²·h⁻¹, 而光滩则表现为 CO₂ 吸收汇。整体来看, 不同植被覆盖 CH₄ 日排放通量小, 分别是 0.0080, -0.0299, 0.0212, -0.0068 mg·m⁻²·h⁻¹, 但不同类型盐碱地仍存在差异, 光滩和翅碱蓬群落为排放源, 柽柳和芦苇群落是吸收汇。不同群落 N₂O 日排放通量的差异性较弱。本试验同时研究了环境因子对不同类型盐碱地上三种温室气体排放通量的影响, 相关分析

*基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项子课题“中国近海海岸带碳排放研究”(XDA05030404); 国家自然科学基金(41171216); 中国科学院烟台海岸带研究所 135 发展规划。

#通讯作者。

表明,环境因子对光滩温室气体通量没有显著影响,其余三种植被覆盖的温室气体排放通量与不同深度土层温度呈现相关性,说明环境因素对盐碱地温室气体排放作用机制的复杂性。

关键词: 温室气体; CO₂; CH₄; N₂O; 盐碱地; 黄河三角洲

1. 引言

全球气候变化一直是国际社会极其关注的环境问题,具体表现在大气成分变化、生物多样性变化、气候变暖、海平面上升、干旱、洪涝、极端天气事件等多个方面^[1],对自然和人类社会构成了广泛地威胁^[2],CO₂、CH₄、N₂O 是三种对全球气候变化影响最大的温室气体^[3],它们对气候变化的贡献已明显超过了气候的自然变化率^[4]。

目前国内外对于温室气体排放通量和排放机制的研究主要集中于湿地、森林和草地等生态系统^[5-9],关于盐碱地温室气体排放研究鲜见报道。但是盐碱地在温室气体排放中的作用不可忽视。盐碱地是地球上广泛分布的土壤类型之一,全球有超过 800 万公顷的土地有不同程度的盐碱化,约占陆地总面积的 6%,且逐年增加^[10]。据联合国教科文组织(UNESCO)和粮农组织(FAO)不完全统计,全世界盐碱地面积为 9.54 亿 hm²^[11]。中国盐碱地面广量大,西北、华北、东北西部和滨海地区都有分布,且类型多样^[11]。黄河三角洲滨海盐碱地是中国滨海盐碱地的重要组成部分,并且与黄河三角洲湿地生态系统相接,两者之间存在密切关联。王玲玲等^[5]对黄河三角洲滨海湿地生态系统 CO₂、CH₄、N₂O 排放通量和排放机制进行了研究,本实验是继黄河三角洲滨海湿地生态系统温室气体排放通量与排放机制研究之后,首个在黄河三角洲滨海盐碱地开展国内盐碱地温室气体排放机制的研究,研究结果对填补当前该区及国内盐碱地温室气体排放研究的空白以及深入开展盐碱地碳、氮循环过程研究具有重要意义。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

试验于 2011 年 10 月 29~30 日在山东省黄河三角洲国家级自然保护区一千二管理站进行。黄河三角洲是黄河尾闾不断摆动形成的陆地区域,地处渤海湾

畔,属暖温带半湿润气候。年平均气温 12.1℃,全年无霜期 196 d,有效积温 4300℃,年平均蒸发量和降雨量分别为 1962 mm 和 551.6 mm,其中 70%的降雨出现在 6 月到 8 月。土壤以滨海盐土和滨海潮土为主,土壤盐渍化严重,自三角洲顶点向海,依次分布着滩涂湿地、盐碱荒地和农耕地三个主要生态系统^[12]。该区域分布的主要植被有芦苇(*Phragmites australis*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)、翅碱蓬(*Suaeda salsa*)、补血草(*Limonium sinense*)等^[5]。

2.2. 样地设置

本研究的采样地设在东营市海港南部,选取同时分布着光滩、怪柳群落、翅碱蓬群落和芦苇群落,面积为 200 m × 200 m 的盐碱区域,并分别在相应的立地条件下布设样点。在光滩和三种植物群落中各布设 1 个观测点位,每个点位设置 3 个重复,共计 4 个点位,12 个重复。由于人力的限制,10 月 29 日监测光滩和怪柳群落,10 月 30 日监测碱蓬和芦苇群落。

2.3. 样品采集与分析

CO₂、CH₄ 和 N₂O 气体采集与分析采用静态暗箱-气相色谱法。采样箱由 0.4 mm 厚的铁皮制成,分为箱体和底座两部分,箱体规格为 50 cm × 50 cm × 70 cm,底座为 50 cm × 50 cm × 20 cm。为减小外界环境温度对箱温的影响,箱体四周及顶部用隔热性较好的白色泡沫包裹。采集样品时,为了防止采样时箱内的气体外泄,用水将两部分密封。采样箱内装有搅气小风扇、温度传感器、采气三通阀及气压平衡管。试验于当日 8:00 开始,以 2 h 为间隔,在 0、20、40、60 min 分别采集 1 次样品,样品采集使用 60 mL 注射器,将箱内气体置于 0.5 L 的铝塑复合气袋(化工部大连光明化工研究所生产)中。样品采集后 36 h 内,在实验室用 Agilent7890 气相色谱仪同时分析 CO₂、CH₄ 和 N₂O 气体浓度。60 min 内采集的 4 个气体样品浓度与采样时间间隔存在相关关系,所有样品的相关系数均在 R²

> 0.95 时才视为有效^[5]。样品采集的同时，同步观测的环境因子有地表和不同土层(5、10 和 15 cm)土壤含水量和土壤电导率(EC)、气温、箱温，以及地表和不同土层(5、10、15 和 20 cm)地温等。

2.4. 数据处理

CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放通量采用下式计算^[13]:

$$F = \frac{dc}{dt} \times \frac{M}{V_0} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \times H$$

式中， F 为气体通量(mg/(m²·h))， dc/dt 为采样时气体体积分数随时间变化的回归曲线斜率， M 为被测体摩尔质量(g/mol)， P 为采样点气压(Pa)， T 为采样时绝对温度(K)， V_0 ， P_0 ， T_0 分别为标准状态下的气体摩尔体积(mL/mol)、大气气压(Pa)和绝对温度(K)， H 为地面(或水面)以上采样箱高(m)。

2.5. 统计分析

运用 SIGMAPLOT、EXCEL 和 SPSS 软件对数据进行作图、计算和相关分析。

3. 结果与分析

3.1. 温度变化

光滩、柽柳群落、翅碱蓬群落和芦苇群落在观测过程中的温度变化极为明显且基本相似(图 1)。总体而言，光滩和三种群落气温、地表温度和 5 cm 土温在 12:00 达到最大值，继而逐渐下降，而 10 cm 和 15 cm 地温的最大值则出现在 14:00，20 cm 土温则在 16:00 最高。因而，随着土层的加深，土温最大值出现的时间相应延后。

3.2. CO₂ 通量特征

如图 2 所示，光滩 CO₂ 通量的日变化范围-30.2937~-13.2842 mg·m⁻²·h⁻¹，均值-5.6933 mg·m⁻²·h⁻¹；柽柳群落 CO₂ 日通量变化 61.6291~162.7331 mg·m⁻²·h⁻¹，均值 108.2999 mg·m⁻²·h⁻¹；翅碱蓬群落 CO₂ 日通量变化 -46.5810~-129.8922 mg·m⁻²·h⁻¹，均值 41.0333 mg·m⁻²·h⁻¹；芦苇群落 CO₂ 日通量变化 33.8254~108.5552 mg·m⁻²·h⁻¹，均值 84.5160 mg·m⁻²·h⁻¹。从图 2 光滩和不同群落 CO₂ 通量的日变化可得出，各个时间点光滩的 CO₂ 通量明显低于其他三个植被群落，日

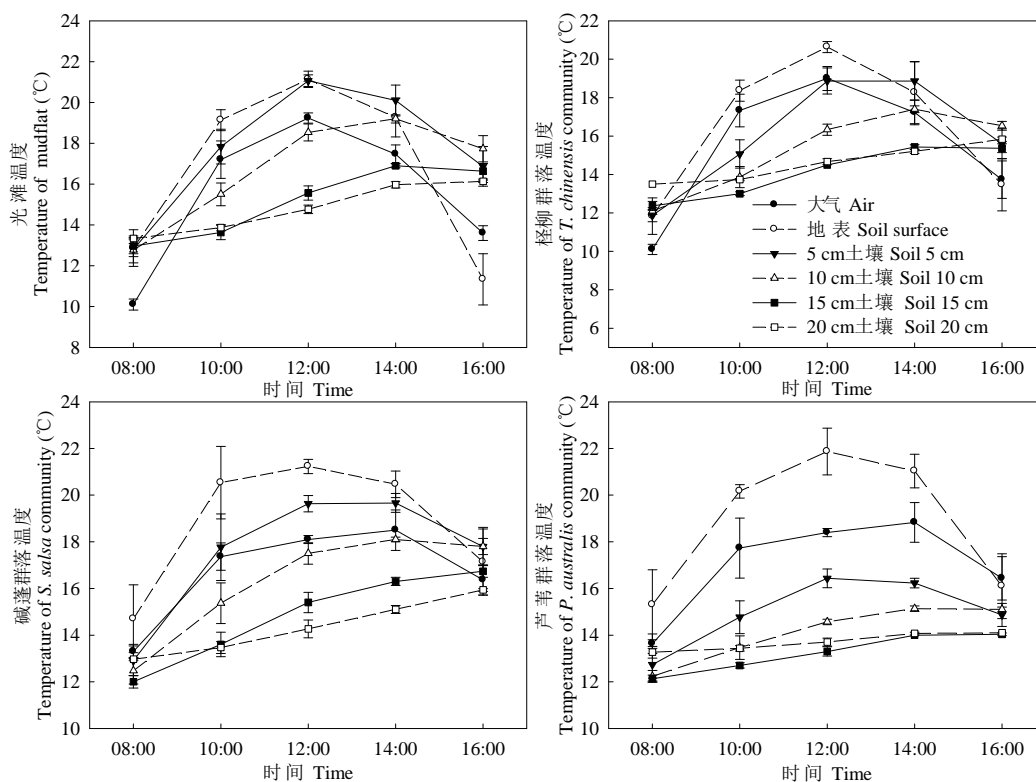


Figure 1. Changes of environmental temperatures in different tidal flats
图 1. 不同类型盐碱地环境温度的变化

变化较小，且更多表现为吸收汇。

3.3. CH₄ 通量特征

从图 3 总体而言，不同类型盐碱地 CH₄ 通量表现为上午变化幅度较大，下午较小。8:00 至 12:00，除翅碱蓬群落和光滩分别在 8:00 和 10:00 表现为排放源外，其余全是 CH₄ 汇；而光滩和不同群落类型在 14:00 至 16:00 均表现为 CH₄ 排放源。光滩、柽柳群落、翅碱蓬群落、芦苇群落四种不同类型盐碱地 CH₄ 日通量普遍较低，日变化分别是：-0.1059~-0.1510 mg·m⁻²·h⁻¹，-0.1080~-0.0242 mg·m⁻²·h⁻¹，-0.0502~0.5850 mg·m⁻²·h⁻¹，-0.0516~0.0324 mg·m⁻²·h⁻¹，均值分别是 0.0080，-0.0299，0.0212，-0.0068 mg·m⁻²·h⁻¹。

3.4. N₂O 通量特征

由图 4 可见，光滩和不同群落类型均表现为 N₂O 的排放源，总体而言，柽柳群落(0.0022~0.0100 mg·m⁻²·h⁻¹)和光滩(0.0006~0.0085 mg·m⁻²·h⁻¹)N₂O 变化幅度较大，且显著高于翅碱蓬群落(0.0008~0.0020 mg·m⁻²·h⁻¹)和芦苇群落(0.0032~0.0002 mg·m⁻²·h⁻¹)，柽柳群落、光滩、翅碱蓬群落和芦苇群落的 N₂O 通量均值分别为 0.0058 mg·m⁻²·h⁻¹、0.0043 mg·m⁻²·h⁻¹、0.0014 mg·m⁻²·h⁻¹ 和 0.0012 mg·m⁻²·h⁻¹。

4. 讨论

4.1. 不同生境温室气体排放特征

CO₂ 通量主要来源于土壤呼吸，包括自养呼吸(植物根的呼吸)和异养呼吸(微生物活动)^[14]，其中植物活根的生物量决定自养呼吸，而死根生物量和土壤有机质决定异养呼吸^[15]。在本研究中，光滩表现为 CO₂ 的吸收汇，其他三种有植被覆盖的盐碱地表现为排放源，这是由于植物(包括地上和地下部分)的呼吸作用对 CO₂ 排放通量发挥重要作用，光滩 CO₂ 通量仅与土壤微生物活动有关^[16]。不同群落之间 CO₂ 通量也存在显著差别，柽柳群落和芦苇群落全天均表现为排放源，且排放通量较高，而翅碱蓬群落 CO₂ 通量日变化呈现“排放-吸收”。主要因为实验时柽柳和芦苇群落已经部分凋落，光合作用非常弱，呼吸作用对 CO₂ 排放通量起主导作用，而翅碱蓬仍处于生长期，光合作用随着一天中光照强度增加而增强，先是呼吸作

用影响 CO₂ 排放通量，之后光合作用的影响更加明显。

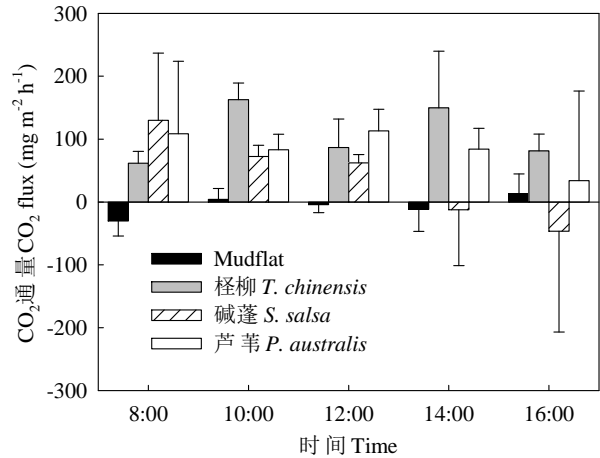


Figure 2. Diurnal CO₂ flux for mudflat and different communities
图 2. 光滩和不同群落 CO₂ 通量日变化动态

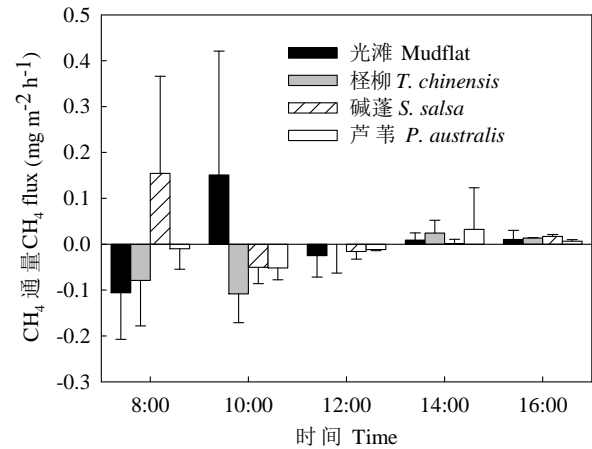


Figure 3. Diurnal CH₄ flux for mudflat and different communities
图 3. 光滩和不同群落 CH₄ 通量日变化动态

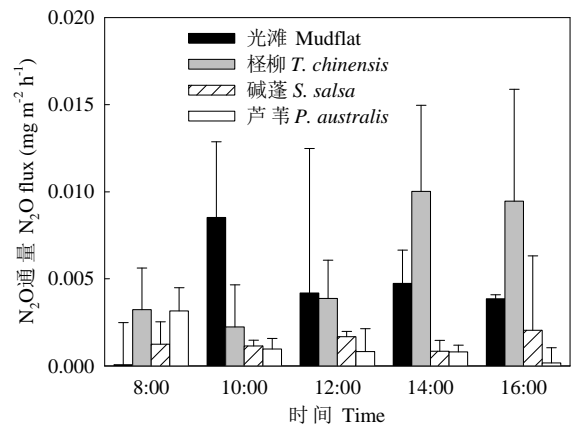


Figure 4. Diurnal N₂O flux for mudflat and different communities
图 4. 光滩和不同群落 N₂O 通量日变化动态

虽然不同生境 CH₄ 排放通量较小,但仍存在差异。从排放通量日均值可见,光滩与翅碱蓬群落排放 CH₄, 柽柳和芦苇群落吸收。研究结果与李红丽等^[17]的相差较大。导致此结果的原因是不同生境下的土壤有机质和土壤理化性质不同,进而对产甲烷菌的活动造成不同程度影响。CH₄ 是产甲烷菌生命活动的产物,产甲烷菌生长需要极严格的厌氧条件,微量氧气的存在足以杀死产甲烷菌^[18]。另外,有机物是产甲烷菌的主要底物^[19],其数量和性质都影响微生物活性,而且土壤有机质对土壤的产 CH₄ 作用有促进作用^[20]。

土壤中的 N₂O 主要是通过微生物硝化和反硝化作用产生,不同生境土壤理化性质存在差异,导致 N₂O 排放通量存在差异。总体而言,光滩和柽柳群落 N₂O 通量高于翅碱蓬和芦苇群落, Maljanen 等^[21]的研究也表明,与植物群落相比,没有植被覆盖的土壤会排放更多的 N₂O。

4.2. 温度与 CO₂、CH₄ 和 N₂O 通量的相关分析

研究时段内,温度(包括气温、地表温度和不同土层地温)作为环境因子变化较为明显。相关分析表明(表 1),气温和地表温度仅与翅碱蓬 CH₄ 通量和芦苇 N₂O 通量呈负相关性。土层温度与柽柳群落和翅碱蓬群落 CH₄ 的排放通量呈显著相关性,这是因为 CH₄

的排放与微生物活性密切相关^[22],土壤温度影响微生物活动。同时,土层温度对于两者的影响作用差异较大,与柽柳群落 CH₄ 的排放通量呈正相关关系,与翅碱蓬群落呈负相关关系,这与植物类型有密切关系,相关研究^[23]表明,陆地植物是不可忽视的 CH₄ 排放源。研究还发现,土层温度与柽柳群落和芦苇群落 N₂O 的排放通量呈显著相关性,这与陈先江等^[23]的研究结果相同,土壤温度对 N₂O 产生的化学过程有重要影响。因为 N₂O 的排放通量与硝化、反硝化作用密切相关,凡是对硝化、反硝化作用产生影响的环境因素都会影响 N₂O 的排放。温度对土壤 N₂O 的作用随土层深度增加而逐渐减弱^[24],土壤温度较低时,土壤还可能表现为 N₂O 吸收汇^[25]。土层温度与柽柳群落 N₂O 排放通量呈显著正相关关系,与芦苇群落呈显著负相关关系,这表明土层温度对 N₂O 排放通量的影响与其他环境因素(土壤有机质、土壤 pH 等)和植被类型有关,影响机制较复杂,还待进一步研究。

4.3. 土壤含水率对 CO₂、CH₄ 和 N₂O 通量的影响

在温室气体排放机制的相关^[26-28]研究中表明,土壤水分是控制 CO₂、CH₄、N₂O 的排放通量的关键因素。有研究^[29]表明,CO₂ 排放量与水分呈极显著相关

Table 1. Relationships between air temperature and soil temperature at different depths and changes in CO₂, CH₄ and N₂O fluxes of mudflat and different communities

表 1. 气温和不同土层地温与光滩和不同群落 CO₂、CH₄ 和 N₂O 通量的关系

温室气体		大气	地表	5 cm 土层	10 cm 土层	15 cm 土层	20 cm 土层
光滩	CO ₂	0.218	0.023	0.221	0.264	0.234	0.290
	CH ₄	0.345	0.243	0.261	0.162	0.056	0.082
	N ₂ O	0.402	0.325	0.339	0.192	0.032	0.037
柽柳	CO ₂	0.455	0.476	0.303	0.188	0.075	-0.002
	CH ₄	0.252	0.159	0.533*	0.705**	0.675**	0.673**
	N ₂ O	-0.014	-0.169	0.221	0.532*	0.619*	0.655**
碱蓬	CO ₂	-0.397	-0.257	-0.431	-0.561*	-0.598*	-0.622*
	CH ₄	-0.620*	-0.674**	-0.647**	-0.519*	-0.398	-0.247
	N ₂ O	-0.168	-0.236	-0.127	-0.007	0.018	0.078
芦苇	CO ₂	0.107	0.355	0.165	-0.114	-0.180	-0.260
	CH ₄	-0.025	-0.146	0.037	0.277	0.358	0.443
	N ₂ O	-0.552*	-0.343	-0.558*	-0.688**	-0.676**	-0.648**

注: *P < 0.05; **P < 0.01。

关系；CH₄ 的氧化对土壤水分的反应呈极显著负相关性，进而影响 CH₄ 的排放；土壤水分通过影响硝化与反硝化而影响 N₂O 的生成速率，通过影响 N₂O 在土壤中的扩散与还原速率而影响 N₂O 的排放。但本实验结果(表 2)显示，土壤含水率与 CO₂、CH₄、N₂O 的排放通量无显著相关性。这可能是因为在降雨后不久完成的，土壤水分的变化范围均未超过影响温室

气体排放通量显著变化的上下限^[30]。同时，此研究结果也显示了环境因素对气体排放通量影响的复杂性。

4.4. 土壤电导率对 CO₂、CH₄ 和 N₂O 通量的影响

在温室气体排放机制的诸多研究中，对土壤电导率影响机制研究相对较少。土壤电导率反映着土壤盐

Table 2. Relationships between soil water content at different depths and changes in CO₂, CH₄ and N₂O fluxes of mudflat and different communities

表 2. 不同土层含水率与光滩和不同群落 CO₂、CH₄ 和 N₂O 通量的关系

	温室气体	地表	5 cm 土深	10 cm 土深	15 cm 土深
光滩	CO ₂	0.303	0.080	-0.454	-0.004
	CH ₄	0.697*	0.438	-0.070	-0.440
	N ₂ O	0.430	0.060	0.285	-0.425
怪柳	CO ₂	0.140	0.227	0.032	-0.279
	CH ₄	-0.190	-0.225	-0.359	-0.373
	N ₂ O	0.142	0.090	-0.422	-0.242
碱蓬	CO ₂	0.189	-0.546	0.369	0.651
	CH ₄	-0.185	-0.327	-0.024	0.222
	N ₂ O	0.224	-0.263	0.345	0.522
芦苇	CO ₂	-0.291	-0.085	0.229	-0.182
	CH ₄	0.001	-0.011	-0.039	0.431
	N ₂ O	0.486	0.113	0.003	-0.097

注：**P* < 0.05；***P* < 0.01。

Table 3. Relationships between soil electrical conductivity at different depths and changes in CO₂, CH₄ and N₂O fluxes of mudflat and different communities

表 3. 不同土层电导率与光滩和不同群落 CO₂、CH₄ 和 N₂O 通量的关系

	温室气体	地表	5 cm 土深	10 cm 土深	15 cm 土深
光滩	CO ₂	-	-	-	-
	CH ₄	-	-	-	-
	N ₂ O	-	-	-	-
怪柳	CO ₂	-	0.037	-0.293	-0.173
	CH ₄	-	-0.270	-0.244	0.003
	N ₂ O	-	0.495	0.465	0.413
碱蓬	CO ₂	0.169	-0.129	0.368	-0.160
	CH ₄	0.264	-0.639	0.024	-0.570
	N ₂ O	0.213	-0.600	-0.333	-0.090
芦苇	CO ₂	0.264	0.038	-0.011	0.233
	CH ₄	0.187	0.054	-0.056	-0.089
	N ₂ O	0.066	-0.003	-0.090	0.141

注：-表示因超过电导率仪的检测范围而未测定到电导率；**P* < 0.05；***P* < 0.01。

度的大小, 土壤盐度越大电导率越大, 反之越小。刘泽雄等^[31]的研究中发现 CH₄ 和 CO₂ 的排放通量与盐度呈显著负相关性, 当盐度在涨落潮中表现为峰值时, 两者的排放通量明显减小, 甚至达到最小值。本研究中, 土壤电导率与排放通量无显著相关性, 可能是土壤含盐量普遍较高, 土壤电导率没有显著变化, 对 CO₂、CH₄、N₂O 的排放通量的影响不显著(表 3)。

5. 结论

不同群落类型间大气界面的 CO₂、CH₄ 和 N₂O 通量存在明显差异。CO₂ 日排放通量: 柽柳群落 > 芦苇群落 > 翅碱蓬群落 > 光滩。总体而言, 不同植被覆盖下的群落 CH₄ 日排放通量小, 但不同类型盐碱地仍存在差异, 光滩和翅碱蓬群落为排放源, 柽柳和芦苇群落是吸收汇。不同群落 N₂O 日排放通量均为正值, 且光滩和柽柳群落的 N₂O 通量较高, 因此, 加强对黄河三角洲盐碱地的植被恢复有利于减少温室气体, 尤其是 N₂O 的释放。土壤温度、水分和电导率与三种温室气体排放通量的相关分析表明, 除大气和不同土层温度与温室气体通量间存在显著正相关和负相关外, 土壤水分和电导率与三者之间均没有显著相关性, 表明环境因素对盐碱地温室气体排放作用机制的复杂性。本研究探讨了秋季(10月)光滩和不同植物群落温室气体的排放特征, 以及气体通量与主要关键因素之间的关系, 关于不同类型盐碱地在不同季节温室气体的变化特征有待于在更大的时间尺度上进行连续监测。

参考文献 (References)

[1] 方精云. 全球生态学: 气候变化与生态响应[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.

[2] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: Biodiversity synthesis. Washington DC: Island Press, 2005.

[3] IPCC. Climate change 2001: The scientific basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

[4] R. Monastersky. A burden beyond bearing. Nature, 2009, 458(7242): 1091-1094.

[5] 王玲玲, 孙志高, 牟晓杰等. 黄河口滨岸潮滩湿地 CO₂、CH₄ 和 N₂O 通量特征初步研究[J]. 草业学报, 2011, 20(3): 51-61.

[6] 李东, 曹广民, 黄耀等. 青藏高原高寒灌丛草甸生态系统碳平衡研究[J]. 草业科学, 2010, 27(1): 37-41.

[7] 吴彩霞, 傅华. 根系分泌物的作用及影响因素[J]. 草业科学, 2009, 26(9): 24-29.

[8] 周萍, 刘国彬, 薛蕙. 草地生态系统土壤呼吸及其影响因素

研究进展[J]. 草业学报, 2009, 18(2): 184-193.

[9] 韩方虎, 沈禹颖, 王希等. 苜蓿草地土壤氮矿化的研究[J]. 草业学报, 2009, 18(2): 11-17.

[10] R. Munns, M. Tester. Mechanisms of salinity tolerance. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59(1): 651-681.

[11] 李彬, 王志春, 孙志高等. 中国盐碱地资源与可持续利用研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 154-158.

[12] 郝金标, 宋玉民, 邢尚军等. 黄河三角洲生态系统特征与演替规律[J]. 东北林业大学学报, 2002, 30(6): 111-114.

[13] C. C. Song, J. B. Zhang, Y. Y. Wang, et al. Emission of CO₂, CH₄ and N₂O from freshwater marsh in northeast of China. Journal of Environmental Management, 2008, 88(3): 428-436.

[14] I. A. Janssens, H. Lankreijer, G. Matteucci, et al. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. Global Change Biology, 2001, 7(3): 269-278.

[15] L. E. Rustad, T. G. Huntington and R. D. Boone. Controls on soil respiration: Implications for climate change. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 1-6.

[16] 孟春, 王俭, 狄海廷. 白桦和落叶松人工林生长季节土壤 CO₂ 排放通量及主要影响因素[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(4): 56-61.

[17] 李红丽, 杨萌, 张明祥等. 玉渡山水库生长季温室气体排放特征及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2012, 31(2): 406-412.

[18] 李世朋, 汪景宽. 温室气体排放与土壤理化性质的关系研究进展[J]. 沈阳农业大学学报, 2003, 34(2): 155-159.

[19] A. Van den Pol-van Dasselaar, O. Oenema. Methane production and carbon mineralisation of size and density fractions of peat soils. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31(6): 877-886.

[20] R. T. Williams, R. L. Crawford. Methane production in Minnesota peatlands. Applied and Environmental Microbiology, 1984, 47(6): 1266-1271.

[21] M. Maljanen, J. Hytoenen, P. Maekiranta, et al. Greenhouse gas emissions from cultivated and abandoned organic croplands in Finland. Boreal Environment Research, 2007, 12(2): 133-140.

[22] 李玉娥, 林而达. 土壤甲烷吸收汇研究进展[J]. 地球科学进展, 1999, 14(6): 613-618.

[23] 陈先江, 王彦荣, 侯扶江. 草地生态系统温室气体排放机理及影响因素[J]. 草业科学, 2011, 28(5): 722-728.

[24] 杜睿, 王庚辰, 吕达仁等. 内蒙古温带半干旱羊草原温室气体 N₂O 和 CH₄ 通量变化特征[J]. 自然科学进展, 2001, 11(6): 595-601.

[25] 刘晔, 牟玉静, 钟晋贤等. 氧化亚氮在森林和草原中的地-气交换[J]. 环境科学, 1997, 18(5): 14-18.

[26] J. F. Magenheimer, T. R. Moore, G. L. Chmura, et al. Methane and carbon dioxide flux from a macrotidal salt marsh, Bay of Fundy, New Brunswick. Estuaries and Coasts, 1996, 19(1): 139-145.

[27] 全川, 曾从盛, 王维奇等. 闽江河口芦苇潮汐湿地甲烷通量及主要影响因子[J]. 环境科学学报, 2009, 29(1): 207-216.

[28] 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.

[29] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝等. 农田土壤主要温室气体(CO₂, CH₄, N₂O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 966-975.

[30] M. J. M. Oomes, P. J. Kuikman and F. H. H. Jacobs. Nitrogen availability and uptake by grassland in mesocosms at two water levels and two water qualities. Plant and Soil, 1997, 192(2): 249-259.

[31] 刘泽雄, 朱瑞琴, 姚顺等. 闽江河口咸草湿地冬季甲烷和二氧化碳通量及影响因子分析[J]. 湿地科学与管理, 2010, 6(3): 46-49.