#### DOI: 10.20103/j.stxb.202208242421

黄庄,王维奇,仝川,王纯.模拟盐度脉冲耦合潮汐过程对闽江河口湿地土壤含碳温室气体排放的影响.生态学报,2023,43(22):9294-9304. Huang Z, Wang W Q, Tong C, Wang C. Modelling the effects of salinity pulses coupled with tidal processes on carbonaceous greenhouse gas fluxes in wetlands of the Min River estuary. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22):9294-9304.

# 模拟盐度脉冲耦合潮汐过程对闽江河口湿地土壤含碳 温室气体排放的影响

黄 庄<sup>1,2</sup>,王维奇<sup>1,2</sup>, 仝 川<sup>1,2</sup>, 王 纯<sup>1,2,\*</sup>

1 福建师范大学地理研究所,福州 350117

2 福建师范大学湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室,福州 350117

**摘要:**为了探究台风风暴潮导致的盐度脉冲、潮汐涨落以及两者的耦合作用对河口湿地土壤二氧化碳(CO<sub>2</sub>)与甲烷(CH<sub>4</sub>)排放 产生的影响,选取闽江河口道庆洲短叶茳芏湿地土壤为研究对象,通过室内模拟实验,研究不同潮汐过程情景下由于盐度和潮 水涨落变化,河口湿地 CO<sub>2</sub>与 CH<sub>4</sub>排放特征并分析其主要影响因子。研究结果表明:(1)潮汐淹水显著抑制 CO<sub>2</sub>排放,但促进 CH<sub>4</sub>排放(P<0.05)。盐度增加(0—8%)促进了土壤 CO<sub>2</sub>排放(P>0.05);0—2%。盐度促进土壤 CH<sub>4</sub>排放(P>0.05),2%。—8%。盐 度抑制土壤 CH<sub>4</sub>排放(P<0.05)。(2)盐度脉冲耦合潮汐过程显著抑制了 CH<sub>4</sub>排放(P<0.05),且一定程度上抑制了 CO<sub>2</sub>排放(P> 0.05)。(3) CO<sub>2</sub>排放与孔隙水中的氨态氮(NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N)呈极显著正相关(P<0.01),与硝态氮(NO<sup>5</sup><sub>3</sub>-N)、可溶性有机碳(DOC)和土 壤 pH 呈显著负相关(P<0.05)。盐度脉冲耦合潮汐过程对 CO<sub>2</sub>与 CH<sub>4</sub>排放的影响是一个正负消长的博弈过程,在 0—8%。的盐 度内,潮汐淹水对 CO<sub>2</sub>排放的影响更大,而盐度在 CH<sub>4</sub>排放中起主导作用。相较于盐度,潮汐淹水是影响闽江河口湿地含碳温 室气体全球增温潜势的主导因素。

关键词:含碳温室气体;盐度脉冲;潮汐过程;河口湿地;闽江河口

# Modelling the effects of salinity pulses coupled with tidal processes on carbonaceous greenhouse gas fluxes in wetlands of the Min River estuary

HUANG Zhuang<sup>1,2</sup>, WANG Weiqi<sup>1,2</sup>, TONG Chuan<sup>1,2</sup>, WANG Chun<sup>1,2,\*</sup>

1 Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China

2 Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process of Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China

**Abstract**: In order to explore the effects of salinity pulses, tidal fluctuations and their coupling effects on estuarine wetland soil carbon dioxide ( $CO_2$ ) and methane ( $CH_4$ ) emissions caused by typhoon storm surge, the soils of the *Cyperus malaccensis* wetland at Daoqingzhou in the estuary of the Min River were selected as the research object, and an indoor tidal simulation device was used to study the characteristics of  $CO_2$  and  $CH_4$  emissions from estuarine wetlands due to changes in salinity and different tidal processes, as well as the main influencing factors. The results showed that: (1) tidal flooding significantly inhibited  $CO_2$  emissions but promoted  $CH_4$  emissions (P < 0.05); the increased salinity (0-8%) promoted  $CO_2$  emissions (P > 0.05); 0-2% salinity promoted soil  $CH_4$  emissions (P > 0.05), while 2%-8% salinity inhibited soil  $CH_4$  emissions (P < 0.05), and suppressed the emissions of  $CO_2$  to some extent (P > 0.05). (3)  $CO_2$  emissions were highly significantly positively correlated with ammoniacal nitrogen ( $NH_4^+$ -N) in pore water (P < 0.01), significantly negatively correlated with

基金项目:国家自然科学基金(41901111);福建省自然科学基金(2020J01188)

收稿日期:2022-08-24; 采用日期:2023-04-07

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wangchun821314@163.com

nitrate nitrogen  $(NO_3^-N)$ , dissolved organic carbon (DOC) and soil pH (P<0.05). The effect of salinity pulses coupled tidal processes on  $CO_2$  and  $CH_4$  emissions was a positive and negative game process. Under the salinity range of 0 to 8‰, tidal flooding had a greater effect on  $CO_2$  emissions, while salinity played a dominant role in  $CH_4$  emissions. Compared to salinity, tidal flooding was the dominant factor affecting the integrated warming potential of carbon-based greenhouse gases in Min River estuarine wetlands.

Key Words: carbonaceous greenhouse gas; salinity pulse; tidal processes; estuarine wetlands; Min River Estuary

湿地因其具有较高的初级生产力,固定和储存了大量的碳,成为温室气体的重要源或汇,在全球气候变化中有着特殊的地位和作用<sup>[1-2]</sup>。河口湿地是重要的湿地类型之一,虽然其面积仅占全球湿地总面积的 3.4%<sup>[3]</sup>,却具备全球重要的碳汇功能,年平均碳积累速率约为 250—500 g/m<sup>2[4]</sup>。因此,探究河口湿地土壤有 机碳动态,对于科学预测全球气候变化背景下河口湿地碳汇功能演变具有重要意义。

近年来,全球气候变化导致的海平面上升加剧了沿海地区台风风暴潮等极端天气事件发生的频率和强度,引起短期脉冲式盐水入侵,叠加周期性潮汐变化,已成为影响河口湿地土壤 CO<sub>2</sub>与 CH<sub>4</sub>排放的主要因素<sup>[5-6]</sup>。目前,国内外关于盐度或潮汐等单因素对 CO<sub>2</sub>与 CH<sub>4</sub>产生和排放的影响研究已较多。Han 等<sup>[7]</sup>研究发现当潮汐淹水时,土壤逐渐形成缺氧环境,进而通过限制植物根区 O<sub>2</sub>有效性和微生物活性来降低土壤含碳 温室气体的排放。此外,淹水还会通过改变 O<sub>2</sub>在土壤中的渗透性和溶解氧的分布影响湿地土壤好氧/厌氧边 界的深度和氧化还原状况,间接影响土壤 CO<sub>2</sub>与 CH<sub>4</sub>的排放<sup>[8]</sup>。Setia 等<sup>[9]</sup>研究通过不同盐度对土壤 CO<sub>2</sub>与 CH<sub>4</sub>排放的影响发现,盐度主要是通过改变有机碳矿化的速率和途径,进而影响土壤 CO<sub>2</sub>与 CH<sub>4</sub>排放的影响发现,盐度主要是通过改变有机碳矿化的速率和途径,进而影响土壤 CO<sub>2</sub>与 CH<sub>4</sub>排放的影响发现,盐度主要是通过改变有机碳矿化的速率和途径,进而影响土壤 CO<sub>2</sub>与 CH<sub>4</sub>排放产生零样的影响空可能存在一个阈值效应,在盐度较低的范围(0—9‰)内土壤有机碳矿化 速率与盐度呈正相关<sup>[10]</sup>,超出这个阈值则随盐度增加而下降。那么,短期盐度脉冲耦合潮汐过程会对河口湿 地土壤 CO<sub>2</sub>与 CH<sub>4</sub>排放产生怎样的影响?相关研究鲜见报道。因此,开展这一研究,能够更清晰地探明在饱 受台风风暴潮影响地区,短期盐度脉冲和潮水耦合变化与河口湿地土壤含碳温室气体排放之间的关系,为精准认识台风风暴潮对河口湿地碳循环的影响机理提供科学参考。

闽江河口湿地位于我国中亚热带和南亚热带过渡区,是典型的开放式河口湿地,极易出现台风风暴潮现 象,每年约有 5—7 个台风影响该区域<sup>[11]</sup>。台风风暴潮引起的短期盐度脉冲和潮汐变化改变湿地土壤理化性 质和水文条件,影响湿地土壤生物地球化学过程,进而影响湿地土壤含碳温室气体排放。基于此,本研究选取 闽江河口湿地土壤为研究对象,通过室内模拟实验,研究由于风暴潮引起的短期盐度脉冲叠加潮水涨落变化 下,河口湿地土壤 CO<sub>2</sub>与 CH<sub>4</sub>排放特征并分析其主要影响因子,进一步探讨短期盐度脉冲和潮水涨落变化与 河口湿地土壤含碳温室气体排放之间的关系,并辨析其原因,其研究结果对科学认知台风风暴潮对河口湿地 碳汇功能的影响具有重要价值,为实现全球变暖背景下湿地生态系统碳中和战略目标和可持续发展提供理论 参考。

#### 1 研究区与研究方法

#### 1.1 研究区与采样点

闽江河口位于福建省长乐市,是中国东南沿海典型的河口湿地之一。该区内气候暖热湿润,年平均气温 为 19.3℃,年降水日数为 153 d,年降水量约为 1346 mm,降水多发生在 3—9月。芦苇和短叶茳芏为该区主要 优势植物群落<sup>[12]</sup>。潮汐属正规半日潮,一个潮汐周期内,土壤约有 4 个小时处于淹水状态<sup>[13]</sup>,水体盐度随潮 汐变化而呈周期性变化,表现出从入海口向上游呈现盐-淡水更替的特征并有上溯的趋势<sup>[14]</sup>。台风是该区域 常见的天气现象,多集中在 6—10月,且由于闽江口的喇叭口地形作用,极易出现风暴潮现象<sup>[15]</sup>。本研究采 样地位于闽江口道庆洲短叶茳芏淡水湿地(25°57′48″N—25°57′49″N, 119°24′22″E—119°24′25″E),土壤盐度

22 期

闽

河

口

26°03'00"

25°57'30"



119°20'

晋安区

鼓楼区

台江区

 仓山区

 ★

 长乐区

 個侯区

 ↓

 长乐区

 119°20'

 119°30'

 119°40'E

 图1 采样点位置图

 81

 采样点

马尾区

Fig.1 Location map of sampling sites

# 1.2 实验设计

在选定的短叶茳芏淡水湿地内,随机布设4个2m×2m的样方。在每个样方内,根据等量、随机和多点 混合的原则采样,利用土钻(直径5 cm,长 20 cm)随机采集多个剖面深度为0—15 cm的土柱,充分混合后作 为1个土样,共4个混合土样。将混合后的土样放入自封袋密封,立刻运回实验室,4℃下冷藏,一部分用来测 定土壤的理化性质,一部分用来做模拟盐度脉冲耦合潮汐过程的培养实验。土样采集的同时,在毗邻的潮流 中采集适量表层潮水,过1微米的野外过滤袋后运回实验室备用。所有样品采集均在接近低潮时。

将每个混合土样按比例均匀分配在 4 个直径 20 cm、高 40 cm PVC 材料制作的培养箱内(培养箱嵌在顶 部带槽的不锈钢铁架上,培养箱底部有一直径 1 cm 的开口,并装有水龙头,打开水龙头阀门可使箱内的水排 干,并在培养箱底垫一层 100 目的滤网,防止排水时土样流出),共 16 个培养箱。每包含原 4 个混合土样的培 养箱分成 1 组,共分成 4 组。在培养试验开始前,每个培养箱均用野外采回的表层潮水预培养 5 d,以便使采 集回来的土壤系统处于稳定状态。模拟实验开始后,每天采用热带海水珊瑚礁盐(Cnsic Marine Biotechnology Co.,Ltd)溶解于去离子水中,根据盐度倍增的原则,配置盐度为 0.5‰ (对照组,为采样点的背景盐度)、2‰、 4‰和 8‰,每个盐度处理随机对应一组培养箱(即每个处理 4 个重复)。同时,根据采样地附近潮汐涨落规律 与淹水深度,设定模拟潮汐淹水高度为 8 cm,水淹 4 小时模拟涨潮,然后手动打开培养箱底部的阀门开始排 水模拟退潮<sup>[16]</sup>,模拟短期盐度脉冲耦合潮汐过程实验连续维持 10 d。

#### 1.3 样品采集与测定

# 1.3.1 气体和水样采集

采气时,盖上培养箱顶盖(培养箱顶部设有凹槽,采气时往凹槽注水以保证气密性,顶盖上有两个钻孔, 一个装上橡胶气垫用于取样,另一个用于测量温度),用 60 mL 三通阀注射器抽取培养箱内气体 30 mL 注入 气袋,每隔 20 min 采样 1 次,共采集 3 次,并将采集的 3 次气体浓度与时间间隔进行线性拟合,以此计算 1 个 气体通量值<sup>[17]</sup>。在模拟实验期间,每天在模拟潮汐前 1 个小时,淹水后 1 个小时,排水后 1 个小时以一定的 时间间隔各采集 3 次气体,分别用于计算不同潮汐阶段的气体通量值。每个潮汐阶段气体采集完后,均用便 携式仪器测定土壤电导率(EC)、温度、pH 指标。且每次采气当日均收集下排水样,并测定下排水样中可溶性 有机碳(DOC)、硫酸盐(SO<sup>2</sup><sub>4</sub>)、氯离子(Cl<sup>-</sup>)、氨态氮(NH<sup>\*</sup><sub>4</sub>-N)、硝态氮(NO<sup>\*</sup><sub>3</sub>-N)、亚硝态氮(NO<sup>\*</sup><sub>2</sub>-N)浓度。本 实验中,由于下排水是指水体通过垂直或水平运动流经土壤剖面的水,且整个实验期间下排水中的 DOC、

26°08'30"N

26°03'00"

25°57'30"

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 等含量均未发生明显减少,表明土壤中的诸多养分并未在短期内流失,因此,采样的下排水大致代表了土壤剖面的孔隙水<sup>[18]</sup>。

1.3.2 气体测定与计算

CH<sub>4</sub>和 CO<sub>2</sub>浓度采用气相色谱仪分析(岛津 GC-2014,日本),CO<sub>2</sub>与 CH<sub>4</sub>检测器为 FID (氢离子火焰化检测器),载气为氮气,流速为 30 mL/min。氢气为燃气,流速为 47 mL/min,空气为助燃气,流速为 400 mL/min, 检测器温度为 280℃,分离柱温度为 45℃。40 min 内采集的 3 个气体浓度与采样时间存在线性关系,所有样品的决定系数均在  $R^2$ >0.90 时才视为有效。CO,、CH<sub>4</sub>气体采用以下公式计算:

$$F = \frac{M}{V} \times \frac{\mathrm{d}c}{\mathrm{d}t} \times H\left(\frac{273}{273 + T}\right) \tag{1}$$

式中,F为气体排放通量(mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>);M为对应气体摩尔质量(g/mol),V为标准状态下气体摩尔体积(22.4 L/mol),dc/dt为培养箱内气体浓度单位时间的变化( $\mu$ L L<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>),H为箱高(m),T为采样时气温。

在百年尺度上, $CH_4$ 单位质量的全球增温潜势(GWP)为  $CO_2$ 的 25 倍<sup>[19]</sup>,100 年时间尺度上  $CO_2$ 与  $CH_4$ 的 全球增温潜势的计算见公式<sup>[20]</sup>:

$$GWP = CO_2 \times 1 + CH_4 \times 25$$
<sup>(2)</sup>

式中,GWP 为全球增温潜势值(kg CO<sub>2</sub> eq/hm<sup>2</sup>,以 CO<sub>2</sub>计),CO<sub>2</sub>为观测期的 CO<sub>2</sub>累积排放量(g/m<sup>2</sup>),CH<sub>4</sub>为观 测期的 CH<sub>4</sub>累积排放量(g/m<sup>2</sup>)。

1.3.3 理化因子的测定

培养中的土壤 pH 采用 IQ150 便携式 pH 计(IQ Scientific Instruments,美国)测定;土壤电导率(EC)用 2265FS 便携式电导盐分计(Spectrum Technologies Inc,美国)测定。潮后土壤孔隙水经 0.45 µm 玻璃纤维滤膜 (马弗炉 400℃烘 2 h)过滤后,采用 TOC-V<sub>CPH</sub>分析仪(TOC-V<sub>CPH</sub>,Shimadzu,日本)测定 DOC 浓度;经 0.22 µm 有机尼龙滤头过滤后,采用 ICS-2100 离子色谱仪(Dionex,美国)测定其 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和 Cl<sup>-</sup>浓度,采用流动分析仪 (Skalar San++,荷兰)测定其无机氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N)浓度。

1.4 数据处理与分析

对测定数据分别运用 Microsoft Excel 2016、Origin 2021b、SPSS 22.0 统计分析软件进行整理和绘图。采用 SPSS 22.0 统计软件,检验所有数据是否符合正态分布和方差齐性,当检验没通过时,将所有原始数据对数转 换直到符合条件时才进行方差分析。不同盐度处理、不同潮汐阶段的水土理化因子及 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>排放的差异 性检验均采用 one-way ANOVA,CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>排放与水土理化性质的关系采用 Origin 2021b 的 Correlation Plot 插 件中的 Pearson 相关系数进行,运用 Canoco 5 对 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>排放与水土理化因子进行冗余分析(RDA)。P < 0.05时,视为达到显著性水平。

#### 2 结果与分析

2.1 盐度脉冲耦合潮汐过程下的水土理化特征

盐度脉冲耦合潮汐过程下的水土理化特征如图 2、3 所示。土壤 EC 随盐度的增加而增加,除 2‰处理外,不同潮汐阶段各盐度处理均与对照差异显著(P<0.05)。不同盐度处理及不同潮汐阶段对土壤温度、pH 均无显著影响(P>0.05)。与对照相比,盐度增加显著提高了土壤孔隙水中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、Cl<sup>-</sup>和 SO<sub>4</sub><sup>-</sup>浓度(P<0.05),但对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 和 DOC 无显著影响(P>0.05)。

2.2 盐度脉冲耦合潮汐过程对含碳温室气体排放的影响

盐度、潮汐过程及其耦合作用对土壤 CO<sub>2</sub>与 CH<sub>4</sub>排放都具有一定影响(图 4)。不同潮汐阶段,盐度增加 促进了 CO<sub>2</sub>排放,而 CH<sub>4</sub>排放在不同盐度处理下变化不同,在盐度小于 2‰时,盐度增加促进 CH<sub>4</sub>排放,盐度大 于 2‰时,盐度增加开始抑制 CH<sub>4</sub>排放(*P*<0.05)。潮汐淹水显著抑制 CO<sub>2</sub>排放(*P*<0.05),但是促进了 CH<sub>4</sub>排 放(*P*<0.05),且潮后略高于潮中(*P*>0.05)。盐度脉冲耦合潮汐过程对 CO<sub>2</sub>排放影响不显著(*P*>0.05),对 CH<sub>4</sub>



图 2 模拟盐度脉冲耦合潮汐过程下的土壤理化特征

**Fig.2** Soil physicochemical characteristics under simulated salinity pulses coupled with tidal processes (*n*=120) 不同小写字母表示同一潮汐阶段不同盐度之间的差异水平;不同大写字母表示同一盐度处理下,不同潮汐阶段之间的差异水平







排放影响显著(P<0.05)。

盐度脉冲耦合潮汐过程对含碳温室气体全球增温潜势的影响如表1所示。在潮前和潮后两个阶段,4‰ 和8‰盐度处理下全球增温潜势均显著高于对照(P<0.05);潮中阶段,各盐度处理下的全球增温潜势无显著



差异(P>0.05),且潮中阶段的全球增温潜势显著低于潮前与潮后阶段(P<0.05)。



**Fig.4** Cumulative emission fluxes of carbonaceous greenhouse gases under different treatments during the experiment (*n*=120) 不同小写字母表示同一潮汐阶段不同盐度之间的差异水平;不同大写字母表示同一盐度处理下,不同潮汐阶段之间的差异水平

Table 1         Global warming potential of carbonaceous greenhouse gases under different salinity and tidal treatments (100-year scale)				
潮汐阶段	盐度  _ Salinity/‰	全球增温潜势 Global warming potential/(kgCO2-eq hm <sup>-2</sup> )		
Tidal stages		$GWP (CO_2)$	$GWP(CH_4)$	$GWP(CO_2+CH_4)$
潮前 Before flooding	0.5	15.548(98.64)Ab	0.215(1.36) Aa	15.763Ab
	2	$15.817(100.17)\mathrm{Ab}$	-0.027(-0.17) Aa	15.790Ab
	4	17.808(101.67) Aa	-0.293(-1.67)Ba	17.515ABa
	8	19.938(101.21) ABa	-0.239(-1.21) Aa	19.699ABa
潮中 Flooding	0.5	3.074(102.13)Ba	-0.064(-2.13)Ba	3.010Ba
	2	3.612(92.12)Ba	0.309(7.88) Aa	3.921Ba
	4	5.360(96.75)Ba	0.180(3.25)Ba	5.540Ba
	8	2.618(82.66)Ba	0.549(17.34) Aa	3.167Ba
潮后 After ebbing	0.5	14.722(95.12)Ac	$0.756(4.88){ m Ab}$	15.478Ab
	2	$16.738(94.50){ m Abc}$	0.974(5.50) Aa	17.712Aab
	4	23.393(96.25) Aab	0.911(3.75) Aa	24.304Aa
	8	24.232(99.89) Aa	$0.027(0.11){ m Ab}$	24.259Aa

表1 盐度与潮汐处理下含碳温室气体的全球增温潜势(100年尺度)

GWP:全球增温潜势 Global warming potential;CO<sub>2</sub>:二氧化碳 Carbon dioxide;CH<sub>4</sub>:甲烷 Methane;不同小写字母表示同一潮汐阶段不同盐度 之间的差异水平;不同大写字母表示同一盐度处理下,不同潮汐阶段之间的差异水平;括号中的数字代表同一处理中,CO<sub>2</sub>或 CH<sub>4</sub>对全球增温潜 势的贡献率(%)

#### 2.3 盐度脉冲耦合潮汐过程下水土理化与含碳温室气体排放的关系

通过对含碳温室气体排放通量与水土理化因子进行 Pearson 相关分析发现(图 5), CO<sub>2</sub>排放与土壤 pH 呈显著负相关(P<0.05),与孔隙水中的 NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N 呈极显著正相关(P<0.01),与 NO<sup>5</sup><sub>3</sub>-N、DOC 呈显著负相关(P<0.05),而 CH<sub>4</sub>排放与水土理化均无显著关系。为进一步探讨水土理化因子对含碳温室气体排放的影响,将含碳温室气体排放与水土理化因子进行 RDA 分析(图 5),根据含碳温室气体排放通量到水土理化因子的投影距离越小,影响越显著,夹角角度决定正负关系,锐角为正相关,钝角为负相关可得,对含碳温室气体排放解释 度最高的是 NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N 和 pH, NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N 与 CO<sub>2</sub>呈正向作用,与 CH<sub>4</sub>呈负向作用;pH 与 CO<sub>2</sub>呈负向作用,与 CH<sub>4</sub>呈正 向作用。



图 5 含碳温室气体排放通量与水土理化因子相关性分析及 RDA 分析

Fig.5 Correlation analysis and RDA analysis of carbonaceous greenhouse gas emission fluxes with the physicochemical factors of soils and water

EC: 土壤电导率; DOC: 可溶性有机碳; 图中深红表示正相关关系, 浅红表示负相关关系; \*表示因子间显著相关(P<0.05), \*\*表示因子间极显著相关(P<0.01)

# 3 讨论

#### 3.1 盐度脉冲与潮汐过程对含碳温室气体排放的影响

在模拟实验期间,CO<sub>2</sub>排放在潮中最低(P<0.05),潮后与潮前差异不显著(P>0.05),这表明涨潮对 CO<sub>2</sub>排 放具有抑制作用。主要原因是潮汐可以通过干湿交替改变土壤中的 O<sub>2</sub>分布,进而影响土壤的氧化还原状

http://www.ecologica.cn

况<sup>[21-22]</sup>。涨潮时,随着水位增加,土壤厌氧环境增强,土壤微生物活性降低,土壤呼吸随之降低。在潮前与潮后,空气中的氧进入沉积物,促进有氧呼吸,产生大量 CO<sub>2</sub>。CH<sub>4</sub>排放在潮前最低(*P*<0.05),潮后略高于潮中(*P*>0.05)。这说明水分状况对土壤中 CH<sub>4</sub>的产生起着决定性作用<sup>[23]</sup>。涨潮前土壤较为干旱,以好氧过程为主,土壤产生的 CH<sub>4</sub>极易被土壤微生物氧化而导致其排放量减少<sup>[24-25]</sup>。涨落潮过程中,潮汐淹水创造的厌氧环境有利于产甲烷菌活性,增加 CH<sub>4</sub>的产生<sup>[26]</sup>,但淹水环境使土壤厌氧代谢释放的 CH<sub>4</sub>有部分溶于水体,溶解在水中的 CH<sub>4</sub>一方面部分被盐水中的硫酸盐氧化<sup>[27]</sup>,另一方面 CH<sub>4</sub>从水体扩散到大气中具有时滞效应,阻碍了 CH<sub>4</sub>向大气的排放。落潮后的湿润阶段,土壤仍处于厌氧环境,同时失去水流屏障,土壤中产生的 CH<sub>4</sub>得以大量释放<sup>[28]</sup>。

目前有众多研究证明了盐度是影响湿地土壤含碳温室气体排放的重要因素,在不同盐度梯度下,土壤含碳温室气体排放状况具有较大差异,但均表现出盐度对土壤含碳温室气体排放具有一个阈值效应,盐度较低时会促进含碳温室气体排放,超出这个阈值则随盐度增加而下降(表 2)。在本研究中,盐度(0.5%e—8%e)增加促进了 CO<sub>2</sub>排放(P>0.05);盐度低于 2%e时促进了土壤 CH<sub>4</sub>的排放(P>0.05),但是盐度升高后抑制了土壤 CH<sub>4</sub>的排放。这一结果表明,不同梯度的盐度在土壤含碳温室气体排放中充当了不同的角色。通常而言,盐度增加主要通过大量 SO<sup>2-</sup><sub>4</sub>引起的硫酸盐效应和离子强度增加引起的离子效应对土壤含碳温室气体排放产生影响<sup>[16]</sup>。同时,我们发现孔隙水中的 DOC、NH<sup>4</sup><sub>4</sub>-N、NO<sup>3</sup><sub>3</sub>-N 与 CO<sub>2</sub>排放显著相关(P>0.05),这表明盐度与潮汐 淹水的双重作用主要是通过激发了 NO<sup>5</sup><sub>3</sub>等电子受体的活性,使微生物的活性增强,进而提高有机物的数量和质量<sup>[34-35]</sup>,促进了 CO<sub>2</sub>与 CH<sub>4</sub>的产生。此外,我们发现当盐度超过 2‰后,CI<sup>-</sup>含量显著增加(P>0.05),其对产甲烷菌活性的离子胁迫作用随之加强,最终导致 CH<sub>4</sub>排放降低。

Table 2 Effects of salinity and tidal processes on soil carbonaceous greenhouse gas emissions in different regions						
研究区	方法	CO2与 CH4的排放特征	文献			
Study area	Method	Emission characteristics of $\mathrm{CO}_2$ and $\mathrm{CH}_4$	References			
辽河口湿地 Liaohe estuary wetland	野外静态箱法	相比于涨潮前,潮汐淹水后 CO <sub>2</sub> 排放量下降了 50%—65%。	[21]			
东北小叶樟淡水沼泽湿地 <i>D. angustifolia</i> freshwater marsh wetlands in northeastern China	野外静态箱法	土壤处于淹水状态时,CO <sub>2</sub> 排放通量最小,而CH <sub>4</sub> 排放 通量最大。	[29]			
美国石溪盐沼湿地 Salt marsh wetlands of Stony Brook, USA	室内培养	干燥土壤 CO <sub>2</sub> 排放要比淹水土壤高 10 倍, CH <sub>4</sub> 差异不显著。	[10]			
杭州湾湿地 Hangzhou Bay Wetland	室内培养	CO2的产生潜力在盐度 0.5‰时最高。	[30]			
辽河口湿地 Liaohe estuary wetland	室内培养	与低盐度处理(0 —3%)相比,高盐度处理(5%~ 10%)土壤呼吸速率降低。	[31]			
美国南佐治亚州河口潮汐湿地 Estuarine tidal wetland, South Georgia, USA	室内培养	盐度升高显著减小了 CH <sub>4</sub> 产生速率(盐度为 2‰时, 减小 77%;盐度为 5‰时,减小 89‰);然而,CO <sub>2</sub> 产生 速率却随着盐度(2‰—5‰)增加而增大。	[32]			
美国佛罗里达州亚热带河口湿地 Subtropical estuarine wetland, Florida, USA	室内培养	与对照处理相比,只是增加淹水,CO <sub>2</sub> 排放通量显著 降低了 50 倍,但同时增加淹水和盐度,CO <sub>2</sub> 排放通量 降幅了 27 倍。	[16]			
美国佛罗里达州鲨鱼河口湿地 Shark River estuary, Florida, USA	室内培养	淹水增加 5—13 cm 情境下, CO <sub>2</sub> 排放通量显著降低 35%—37%, 而在盐度为 15%e—20%e或 30%e—35%e盐 水处理下, CO <sub>2</sub> 排放通量增加了 17%—21%, 在盐度和 淹水交互作用下, CO <sub>2</sub> 排放通量下降了 19%—26%。	[33]			
闽江河口短叶茳芏湿地 <i>Cyperus malaccensis</i> wetlands of the Min river estuary	室内培养	潮汐淹水显著抑制 CO <sub>2</sub> 排放,而有利于 CH <sub>4</sub> 排放。盐 度(0.5%—8%)增加促进了土壤 CO <sub>2</sub> 产生; CH <sub>4</sub> 排放 在 0.5%—2% 盐度内随着盐度增加而增加,而 2%— 8% 盐度抑制了 CH <sub>4</sub> 排放。盐度脉冲耦合潮汐过程对 CO <sub>2</sub> 排放影响不显著,但显著降低了 CH <sub>4</sub> 排放。	本研究			

表 2	不同地区盐度与潮汐过程对土壤含碳温室气体排放的影响

3.2 盐度脉冲耦合潮汐过程对含碳温室气体排放的影响

通过盐度脉冲耦合潮汐过程对含碳温室气体排放的影响分析发现,盐度脉冲耦合潮汐过程对 CO<sub>2</sub>排放影 响不显著(P>0.05)。Chambers 等<sup>[33]</sup>通过控制盐度和水位变化发现,CO<sub>2</sub>排放通量在 15%—20% 或 30%—35% 盐水处理下增加 17%—21%,在淹水 5—13 cm 时降低 35%—37%,在盐度处理和淹水组合下降低 19%—26%。在本研究中,同样发现盐度对 CO<sub>2</sub>排放具有促进作用,而潮汐淹水对 CO<sub>2</sub>排放存在抑制作用,这表明盐 度和潮汐过程之间对 CO<sub>2</sub>排放存在一个互相抵消的关系。从两者的影响程度上来看,潮汐淹水对 CO<sub>2</sub>排放的 影响相对于盐度更加大,Liu 等<sup>[36]</sup>也发现水位或淹水周期是控制土壤 CO<sub>2</sub>排放的关键因子,其对土壤 CO<sub>2</sub>排放的影响远超于盐度。通常来说,潮汐淹水将会促进 CH<sub>4</sub>的排放,但是当盐度上升到较高后,盐度对 CH<sub>4</sub>排放 具有显著的抑制效应<sup>[37]</sup>。在本研究中,盐度脉冲耦合潮汐过程显著降低了 CH<sub>4</sub>排放(P<0.05),这表明在盐度 脉冲耦合潮汐过程中,盐度在 CH<sub>4</sub>排放中起主导作用。原因在于随着盐度的增加,大量的盐分在土壤中累积 产生的离子胁迫作用有效抑制了产甲烷菌活性,使 CH<sub>4</sub>的产量降低。同时,SO<sup>2</sup><sub>4</sub> 与 CH<sub>4</sub>氧化菌的相互作用进 一步氧化了因淹水增加而产生的 CH<sub>4</sub>,进而减少 CH<sub>4</sub>排放<sup>[38]</sup>。我们与以往盐度和潮汐单因素研究对比发现,本实验中控制土壤含碳温室气体排放的盐度阈值相对较高,主要是因为在盐度与潮汐的耦合效应下,硫酸盐 还原所产生的有毒副产物(H,S) 被潮汐冲洗带走,减弱了高盐度对微生物的胁迫。

同时,我们也发现在100年尺度下,0.5%—4%。的盐度显著提高了盐度脉冲耦合潮汐过程中含碳温室气体全球增温潜势,当盐度超过4%。时,盐度对含碳温室气体全球增温潜势的促进作用减缓;而不论盐度高低,潮汐淹水均显著降低了各盐度处理下含碳温室气体全球增温潜势,但 CH<sub>4</sub>在全球增温潜势的贡献均增加。这一结果表明相对于盐度增加,潮汐淹水过程在含碳温室气体全球增温潜势中起主导作用。在全球气候变化变暖、海平面上升背景下,沿海地区由于台风风暴潮所引起的盐度脉冲耦合潮汐淹水可能进一步加剧,在盐度与淹水的双重作用下,湿地土壤含碳温室气体的全球增温潜势可能会大幅度下降,但 CH<sub>4</sub>对全球增温潜势的贡献会增加。

3.3 盐度脉冲耦合潮汐过程下水土壤理化特征的改变及其对含碳温室气体排放的影响

盐度脉冲耦合潮汐过程会对湿地土壤及其孔隙水的理化特征产生影响,进而改变含碳温室气体排放状况。在模拟盐水入侵后,孔隙水 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和 C1<sup>-</sup>含量都随盐度升高而显著增加(P<0.05),这主要是因为本研究采用的热带海水珊瑚礁盐中含有大量的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和 C1<sup>-</sup>,含量分别是 63.5 g/kg 和 498.6 g/kg。盐度对孔隙水 DOC 含量的影响并不显著(P>0.05),原因在于盐度增加虽然可以促使易分解的 DOC 从土壤中解析出来,但以硫酸盐还原占主导的有机质矿化途径可以充分消耗从土壤中解析的 DOC<sup>[39]</sup>,因而盐度增加并没有对 DOC 含量产生明显影响,同时我们发现 DOC 与 CO<sub>2</sub>呈显著负相关(P<0.05),这也验证了 DOC 从土壤中解析出来后,被 矿化消耗。CO<sub>2</sub>排放与 NH<sub>4</sub><sup>+-</sup>N 含量极显著正相关,主要原因是土壤 NH<sub>4</sub><sup>+-</sup>N 含量的增加会促进湿地生态系统 生产力,同时增强土壤酶活性,促进土壤有机质分解转化,从而影响 CO<sub>2</sub>的排放<sup>[40]</sup>。在实验期间,土壤 pH 均 在 6 至 7 之间,属于弱酸性,CO<sub>2</sub>排放与 pH 呈极显著负相关(P<0.01)。这与惠若男等<sup>[41]</sup>的研究相似,当土壤 pH 值超过 6 时,CO<sub>2</sub>排放与土壤 pH 值间呈负相关关系;土壤 pH 值在 4—6 之间时,CO<sub>2</sub>排放与土壤 pH 值间 呈正相关关系。土壤 pH 对 CO<sub>2</sub>排放的影响是一个复杂的过程,一定范围内的土壤 pH 适宜土壤微生物的存 活,促进土壤有机质的分解,有利于 CO<sub>2</sub>气体的排放,反之将抑制。

#### 4 结论

本研究从双因素耦合的视角,通过室内模拟实验探究了由台风风暴潮引起的盐度脉冲叠加潮汐过程对河口湿地含碳温室气体的影响,为科学预测河口湿地碳排放如何响应全球气候变化提供新认识:

(1)盐度对湿地土壤 CO<sub>2</sub>和 CH<sub>4</sub>排放的影响各不相同,盐度(0-8‰)增加促进了土壤 CO<sub>2</sub>排放(P>0.05);0-2‰盐度促进土壤 CH<sub>4</sub>排放(P>0.05),2‰-8‰盐度抑制土壤 CH<sub>4</sub>排放(P<0.05)。潮汐淹水过程显著抑制 CO<sub>2</sub>的排放,但促进了 CH<sub>4</sub>的排放(P<0.05)。</li>

(2)盐度脉冲耦合潮汐过程对 CO<sub>2</sub>和 CH<sub>4</sub>排放均存在一个正负消长的博弈过程,在 0—8‰的盐度内,潮 汐淹水对 CO<sub>2</sub>排放的影响更大,而盐度在 CH<sub>4</sub>排放中起主导作用。相较于盐度,潮汐淹水是影响河口湿地含 碳温室气体全球增温潜势的主导因素。

(3)盐度脉冲耦合潮汐过程通过影响水土理化性质间接影响土壤含碳温室气体排放,CO<sub>2</sub>排放与孔隙水中的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N呈极显著正相关(P<0.01),与NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、DOC呈显著负相关(P<0.05);当土壤pH值超过6时,CO<sub>2</sub>排放与土壤pH呈显著负相关(P<0.05)。</p>

#### 参考文献(References):

- [1] Shu Y X, Chen J W, Huang Y F, Fu W Q. Sustainable approaches to realize carbon neutrality in China: a case study of Zhejiang Province. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(10): 1351.
- [2] Jun M, Altor A E, Craft C B. Effects of increased salinity and inundation on inorganic nitrogen exchange and phosphorus sorption by tidal freshwater floodplain forest soils, *Georgia* (USA). Estuaries and Coasts, 2013, 36(3): 508-518.
- [3] Howe A J, Rodriguez J F, Saco P M. Surface evolution and carbon sequestration in disturbed and undisturbed wetland soils of the Hunter Estuary, southeast Australia. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2009, 84(1): 75-83.
- [4] Meng W, He M, Hu B, Mo X, Li H, Liu B, Wang Z. Status of wetlands in China: a review of extent, degradation, issues and recommendations for improvement. Ocean & Coastal Management, 2017, 146: 50-59.
- [5] Tobias C, Neubauer S C. Salt marsh biogeochemistry- An overview. Coastal wetlands: An integrated ecological approach, 2009, 445-492.
- [6] He L, She C, Huang J, Yang P, Yu H, Tong C. Effects of constant and fluctuating saltwater addition on CH<sub>4</sub> fluxes and methanogens of a tidal freshwater wetland; a mesocosm study. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2022, 277: 108076.
- [7] Han G X, Sun B Y, Chu X J, Xing Q H, Song W M, Xia J Y. Precipitation events reduce soil respiration in a coastal wetland based on four-year continuous field measurements. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 256/257: 292-303.
- [8] Elberling B, Askaer L, Jørgensen C J, Joensen H P, Kühl M, Glud R N, Lauritsen F R. Linking soil O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, and CH<sub>4</sub> concentrations in a Wetland soil: implications for CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes. Environmental Science & Technology, 2011, 45(8): 3393-3399.
- [9] Setia R, Gottschalk P, Smith P, Marschner P, Baldock J, Setia D, Smith J. Soil salinity decreases global soil organic carbon stocks. Science of the Total Environment, 2013, 465: 267-272.
- [10] Wang F M, Kroeger K D, Gonneea M E, Pohlman J W, Tang J W. Water salinity and inundation control soil carbon decomposition during salt marsh restoration: an incubation experiment. Ecology and Evolution, 2019, 9(4): 1911-1921.
- [11] 福建省气象局. 2021 年福建省气候公报. (2022-01-10) [2022-11-01]. http://fj.weather.com.cn/zxfw/qhgb/03/3527254\_14.shtmL.
- [12] 王纯,刘兴土, 仝川, 陈晓旋, 陈优阳, 牟晓杰, 万斯昂. 水盐梯度对闽江河口湿地土壤有机碳组分的影响. 中国环境科学, 2017, 37 (10): 3919-3928.
- [13] 王维奇,王纯,曾从盛,仝川. 闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征. 生态学报, 2012, 32(13): 4087-4093.
- [14] 谢蓉蓉, 李家兵, 张党玉, 黄倩倩, 丁晓燕, 吴春山. 闽江河口湿地沉积物氮矿化对盐度响应研究. 中国环境科学, 2017, 37(6): 2248-2254.
- [15] 夏丽花,邬惠明,刘铭,冷典颂,李婷婷.热带气旋影响福建沿海风暴潮特征分析.热带海洋学报,2014,33(3):40-45.
- [16] Chambers LG, Osborme TZ, Reddy K R. Effect of salinity-altering pulsing events on soil organic carbon loss along an intertidal wetland gradient: a laboratory experiment. Biogeochemistry, 2013, 115(1): 363-383.
- [17] 仝川,姚顺,王维奇,黄佳芳,张林海,章文龙,曾从盛.中国东南沿海短叶茳芏潮汐沼泽湿地甲烷动态.中国科学:地球科学,2012,42 (5);723-735.
- [18] Wang C, Sardans J, Tong C, Peñuelas J, Wang W. Typhoon-induced increases in porewater nutrient concentrations and CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions associated with salinity and carbon intrusion in a subtropical tidal wetland in China: a mesocosm study. Geoderma, 2021, 384: 114800.
- [19] Li Q, Cui K, Lv J, Zhang J, Peng C, Li Y, Song X. Biochar amendments increase soil organic carbon storage and decrease global warming potentials of soil CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O under N addition in a subtropical Moso bamboo plantation. Forest Ecosystems, 2022, 9: 100054.
- [20] Wang C, Lai D Y F, Tong C, Wang W Q, Huang J F, Zeng C S. Variations in temperature sensitivity (Q10) of CH<sub>4</sub> emission from a subtropical estuarine marsh in southeast China. PloS One, 2015, 10(5): e0125227.
- [21] 刘凯,杨继松,袁晓敏,郑冬梅,宋常站. 辽河口盐沼和光滩 CO<sub>2</sub>排放通量及其影响因素. 湿地科学, 2017, 15(6): 855-861.
- [22] 罗佳宸,李思悦. 三峡库区典型河流水-气界面 CO2通量日变化观测及其影响因素分析. 环境科学, 2018, 39(11): 5217-5226.
- [23] 韩广轩,王法明,马俊,肖雷雷,初小静,赵明亮. 滨海盐沼湿地蓝色碳汇功能、形成机制及其增汇潜力. 植物生态学报, 2022, 46(4):

#### http://www.ecologica.cn

373-382.

- [24] 韩广轩. 潮汐作用和干湿交替对盐沼湿地碳交换的影响机制研究进展. 生态学报, 2017, 37(24): 8170-8178.
- [25] 贺文君,韩广轩,许延宁,张希涛,王安东,车纯广,孙宝玉,张孝帅. 潮汐作用下干湿交替对黄河三角洲盐沼湿地净生态系统 CO<sub>2</sub>交换的影响. 应用生态学报, 2018, 29(1): 269-277.
- [26] 栾军伟, 崔丽娟, 宋洪涛, 王义飞. 国外湿地生态系统碳循环研究进展. 湿地科学, 2012, 10(2): 235-242.
- [27] Wang C, Lai D Y F, Sardans J, Wang W Q, Zeng C S, Peñuelas J. Factors related with CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from a paddy field: clues for management implications. PloS One, 2017, 12(1): e0169254.
- [28] 贺文君,韩广轩,宋维民,李培广,张树岩,张希涛.潮汐作用对黄河三角洲盐沼湿地甲烷排放的影响. 生态学报, 2019, 39(17): 6238-6246.
- [29] Yang J, Liu J, Hu X, Li X, Wang Y, Li H. Effect of water table level on CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions in a freshwater marsh of Northeast China. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 61: 52-60.
- [30] Shao X X, Zhao L L, Sheng X C, Wu M. Effects of influent salinity on water purification and greenhouse gas emissions in lab-scale constructed wetlands. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(17): 21487-21496.
- [31] Yang J, Zhan C, Li Y, Zhou D, Yu Y, Yu J.. Effect of salinity on soil respiration in relation to dissolved organic carbon and microbial characteristics of a wetland in the Liaohe River Estuary, Northeast China. Science of the Total Environment, 2018, 642: 946-953.
- [32] Marton J M, Herbert E R, Craft C B. Effects of salinity on denitrification and greenhouse gas production from laboratory-incubated tidal forest soils. Wetlands, 2012, 32(2): 347-357.
- [33] Chambers L G, Davis S E, Troxler T, Boyer J N, Downey-Wall A, Scinto L J. Biogeochemical effects of simulated sea level rise on carbon loss in an Everglades mangrove peat soil. Hydrobiologia, 2014, 726(1): 195-211.
- [34] Helton A M, Ardón M, Bernhardt E S. Thermodynamic constraints on the utility of ecological stoichiometry for explaining global biogeochemical patterns. Ecology Letters, 2015, 18(10): 1049-1056.
- [35] Neubauer S C, Franklin R B, Berrier D J. Saltwater intrusion into tidal freshwater marshes alters the biogeochemical processing of organic carbon. Biogeosciences, 2013, 10(12): 8171-8183.
- [36] Liu X, Ruecker A, Song B, Xing J, Conner W H, Chow A T. Effects of salinity and wet-dry treatments on C and N dynamics in coastal-forested wetland soils: implications of sea level rise. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 112: 56-67.
- [37] Neubauer S C. Ecosystem responses of a tidal freshwater marsh experiencing saltwater intrusion and altered hydrology. Estuaries and Coasts, 2013, 36(3): 491-507.
- [38] Zhao M, Han G, Li J, Song W, Qu W, Eller F, Jiang C. Responses of soil CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions to changing water table level in a coastal wetland. Journal of Cleaner Production, 2020, 269: 122316.
- [39] Weston N B, Dixon R E, Joye S B. Ramifications of increased salinity in tidal freshwater sediments: Geochemistry and microbial pathways of organic matter mineralization. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2006, 111(G1): 1-14.
- [40] Song Y Y, Song C C, Li Y C, Hou C C, Yang G S, Zhu X Y. Short-term effect of nitrogen addition on litter and soil properties in *Calamagrostis angustifolia* freshwater marshes of northeast China. Wetlands, 2013, 33(3): 505-513.
- [41] 惠若男. 河岸湿地土壤二氧化碳排放规律及其影响因素研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.