

互花米草入侵对滩涂湿地甲烷排放的影响

潘小翠 管 铭 张崇邦*

(台州学院生命科学学院, 浙江台州 318000)

摘 要 在浙江省台州市附近滩涂湿地设置 3 个不同互花米草入侵密度梯度, 即仅有本土植物样地、互花米草与本土植物混生样地和互花米草单优群落样地, 研究互花米草入侵对滩涂湿地 CH₄ 排放的影响。结果表明: 3 个样地 CH₄ 排放通量为 0.68 ~ 5.88 mg · m⁻² · h⁻¹, CH₄ 排放通量随着互花米草入侵梯度的增加而显著升高, 互花米草单优群落样地 CH₄ 排放通量分别为本土植物样地和混生样地的 8.7 和 2.3 倍。互花米草入侵显著提高了产甲烷菌数量、产甲烷潜力、甲烷氧化菌数量、甲烷氧化潜力、植物生物量、土壤有机碳含量和土壤 pH, 降低了土壤全氮含量。CH₄ 排放通量与土壤全氮呈显著负相关, 与产甲烷菌数量、产甲烷潜力、甲烷氧化菌数量、甲烷氧化潜力、植物生物量和土壤 pH 呈显著正相关。互花米草的入侵提高了滩涂湿地植物群落生物量和土壤 pH, 促进了产甲烷菌数量和产甲烷潜力, 从而提高了滩涂湿地的 CH₄ 排放。

关键词 甲烷; 互花米草; 滩涂湿地; 产甲烷菌; 甲烷氧化菌

Effects of *Spartina alterniflora* invasion on methane emission in coastal salt marsh. PAN Xiaocui, GUAN Ming, ZHANG Chong-bang* (School of Life Sciences, Taizhou University, Taizhou 318000, Zhejiang, China).

Abstract: To investigate the effects of *Spartina alterniflora* invasion on methane emission from coastal salt marsh, three *S. alterniflora* invasive levels were established nearby Taizhou City of Zhejiang Province, including native community, mixed community with *S. alterniflora* and native weeds, and mono-community of *S. alterniflora*. The results showed that the CH₄ flux in the three communities ranged from 0.68 to 5.88 mg · m⁻² · h⁻¹, and CH₄ flux increased significantly with *S. alterniflora* invasion. CH₄ flux in the mono-community of *S. alterniflora* being 8.7 and 2.3 times as that in the native and mixed communities, respectively. *S. alterniflora* invasion increased significantly methanogens number, methane production potential, methanotrophs number, methane oxidation potential, plant biomass, soil organic carbon content and soil pH, but decreased significantly soil total nitrogen content. The correlation analysis showed that the CH₄ flux was positively related to methanogens number, methane production potential, methanotrophs number, methane oxidation potential, plant biomass and soil pH, but negatively related to soil total nitrogen content. Overall, our results suggested that *S. alterniflora* invasion improved plant biomass production and soil pH, resulting in the increases in methanogens number and methane production potential to further drive soil CH₄ emission.

Key words: methane; *Spartina alterniflora*; coastal salt marsh; methanogen; methanotroph.

甲烷(CH₄)作为一种仅次于二氧化碳(CO₂)的

重要温室气体日益受到人们的关注,这不仅因为CH₄分子具有很强的吸收红外线能力,单分子的增温潜势是CO₂的25倍^[1],而且还因为其能与大气污染物(如氟利昂)发生反应产生其他温室气体(O₃、CO、CO₂)。天然湿地作为全球大气CH₄的主要排放源而备受关注,其CH₄年排放量为187~

本文由国家自然科学基金项目(51279121)和台州学院培育基金项目(2015PY014 2015PY015)资助 This paper was supported by the National Natural Science Foundation of China (51279121) and the Cultivation Fund of Taizhou University (2015PY014 2015PY015).

2015-09-08 Received, 2016-01-24 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: llhzc@163.com

224 Tg, 占全球 CH₄ 总排放量的 15% ~ 40%^[2]. 美国海洋和大气管理 (NOAA) 的监测数据显示, 从 2007 年开始大气 CH₄ 浓度呈现逐年增加的趋势^[3], 而自然湿地 CH₄ 年排放量的增加是导致近年来大气 CH₄ 浓度升高的主要原因^[4].

近年来, 湿地外来入侵物种受到广泛关注. 研究表明, 与土著植物相比, 大多数入侵植物常具有较高的生物量和凋落物输入量, 较大的生物量和凋落物输入量会导致土壤碳库的增加^[5-6], 进而为产甲烷菌群落提供了更多底物, 最终导致更多 CH₄ 排放^[7]. 研究表明, 一些外来入侵种能够提高湿地 CH₄ 的排放^[8-9]. 互花米草 (*Spartina alterniflora*) 作为一个重要的外来入侵物种, 由于其适应范围广、繁殖能力强, 对中国引种地的生态系统构成严重威胁, 现已成为我国滩涂湿地最严重的外来入侵植物^[10]. 国外有关互花米草湿地 CH₄ 排放的研究早在 20 世纪 70 年代已经开展, 但作为入侵种, 国内关于互花米草的研究多集中于互花米草的入侵特征^[11]、时空动态^[12], 其对海岸生态系统结构与功能的影响, 以及与之相关的防除技术^[13-15]. 全川等^[16] 研究发现, 互花米草入侵斑块土壤 CH₄ 排放具有明显的季节变化规律. 项剑等^[7] 研究发现, 长时间的互花米草入侵显著增加了土壤有机碳含量, 提高了产甲烷菌数量, 从而促进了 CH₄ 排放. Cheng 等^[17] 通过盆栽试验研究发现, 互花米草具有很强的 CH₄ 排放能力.

产甲烷菌是甲烷形成的驱动者, 而甲烷氧化菌是一类在好氧条件下将 CH₄ 氧化成 CO₂ 和 H₂O 的微生物, 通常生活在氧含量较高的土壤氧化层中^[18]. 因此, 产甲烷菌和甲烷氧化菌是介导自然湿地 CH₄ 排放的重要功能菌群. 另外, 互花米草生长

快、生物量大, 且具有发达的通气组织和很强的 CH₄ 传输能力^[19], 因此推测其入侵可能与 CH₄ 排放有关. 然而, 目前在研究互花米草入侵与 CH₄ 排放关系时, 将植物特性、土壤产甲烷菌和甲烷氧化菌以及土壤理化特性综合起来, 进一步探讨两类菌与 CH₄ 排放关系的研究尚少. 为此, 本文在互花米草入侵重灾区浙江省台州市境内测定了互花米草 3 个入侵梯度下 CH₄ 的排放通量, 分析各入侵梯度样地中产甲烷菌数量、产甲烷潜力、甲烷氧化菌数量、甲烷氧化潜力、植物生物量以及土壤理化性质, 为进一步认识入侵植物与温室气体排放的关系及其相关机理提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

在浙江省台州市郊区附近的沿海滩涂湿地选择了 3 个互花米草入侵区, 分别位于三门县小雄镇、临海市上盘镇和椒江区三甲镇. 根据互花米草的入侵密度, 在 3 个入侵区域内, 分别设置 3 个不同入侵梯度, 即: 仅有本土植物样地 (Nat)、互花米草与本土植物混生样地 (Ecot)、以及互花米草单优群落样地 (Mono), 每个梯度设 3 个重复. 该区属于亚热带季风性气候, 年均气温 16 ~ 19 °C, 平均年降水量 1200 ~ 1900 mm. 样地详细信息见表 1.

1.2 试验设计

于 2013 年 7 月中旬对各样地进行样品采集, 此时各样地地表无积水. 在每个入侵梯度的样地中用“向后抛石法”确定 3 个小样方 (1 m × 1 m), 在每个小样方中, 采用静态箱法收集 CH₄ 气体, 即在小样方上倒扣一个特制的不锈钢采样箱 (高 120 cm、

表 1 研究样地基本情况

Table 1 Basic status of sampling sites

地点 Site	经纬度 Longitude and latitude	入侵梯度 Invasive gradient	距海边距离 Distance from the sea (m)	植株高度 Plant height (m)	主要植物种类 Major plant species
小雄 Xiaoxiong	28°54' N, 121°33' E	Nat	1600 ~ 1800	0.10 ~ 0.45	灯芯草 <i>Juncus effusus</i> 、异型莎草 <i>Cyperus difformis</i> 、喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i> 、狗芽根 <i>Cynodon dactylon</i>
		Ecot	1000 ~ 1500	0.40 ~ 0.85	互花米草 <i>Spartina alterniflora</i> 、碱蓬 <i>Suaeda salsa</i>
		Mono	600 ~ 800	1.00 ~ 1.40	互花米草
上盘 Shangpan	28°45' N, 121°38' E	Nat	1600 ~ 1800	0.40 ~ 1.80	小飞蓬 <i>Conyza canadensis</i> 、田菁 <i>Sesbania cannabina</i> 、芦苇 <i>Phragmites australis</i>
		Ecot	1000 ~ 1500	0.30 ~ 1.00	钻形紫菀 <i>Aster subulatus</i> 、小飞蓬、互花米草、碱蓬
		Mono	600 ~ 800	1.20 ~ 1.60	互花米草
椒江	28°38' N,	Nat	1600 ~ 1800	0.25 ~ 2.00	狗尾草 <i>Setaria viridis</i> 、芦苇、田菁、钻形紫菀、一年蓬 <i>Erigeron annuus</i> 、碱蓬
Jiaojiang	121°31' E	Ecot	800 ~ 1200	0.40 ~ 1.80	芦苇、钻形紫菀、互花米草、一年蓬
		Mono	500 ~ 600	1.20 ~ 1.60	互花米草

Nat: 仅有本土植物样地 Site covered only by native weeds; Ecot: 互花米草与本土植物混生样地 Site mixed with *S. alterniflora* and native weeds; Mono: 互花米草单优群落样地 Site mono-cultured with *S. alterniflora*.

长 45 cm、宽 45 cm) 采样箱顶端装有风扇以混合气体, 并留有温度计插口和采样口。在盖箱 30 min 后采集气样, 用 50 mL 注射器采集气体样品, 注入真空袋中(100 mL, 大连德霖气体包装有限公司), 每次抽 3 个重复气样, 同时记录箱内温度。气样每隔 30 min 采集一次, 总共采集 5 次。为了保证数据的质量, 规定 5 次 CH₄ 排放量数据与时间之间的线性相关系数 $R^2 > 0.90$ 时, 数据有效^[7]。

在每个样地中, 采用收割法收集小样方中的地上植物, 去除上一年枯死部分, 剪成小段, 放在牛皮纸袋中。由于土壤含水量大, 呈泥状, 采用环刀法收集土芯样品。在每个小样方内用环刀(直径 64 mm、长度 100 mm) 随机收集 3 个土芯(0~10 cm) 混合成一个样品, 放于封口袋中, 做好标记后带回实验室。每个入侵梯度采集的混合样品为 9 个(3 样地×3 小样方)。在实验室内, 取部分土壤, 采用烘干法测定土壤含水量, 另一部分土壤于室温下风干, 过 2 mm 筛, 用于土壤理化性质指标的测定, 最后一部分土样储存于 4 °C 的保鲜柜内, 用于微生物数量及潜力分析。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 甲烷排放量的测定 样品中 CH₄ 的浓度测定采用岛津气相色谱(Shimadzu GC-42A, Kyoto, Japan), 氢火焰离子(FID) 检测器检测。色谱柱为 80/100 目 Porapak Q 填充柱, 在以氮气为载气, 流速为 40 mL·min⁻¹, 氢气为燃气, 流速为 35 mL·min⁻¹, 助燃气为空气, 流速为 350 mL·min⁻¹, 柱温 80 °C, 检测器温度 200 °C 下测定 CH₄ 浓度。最后, 参照 Cheng 等^[17] 的方法计算 CH₄ 排放量。

1.3.2 土壤产甲烷菌数量及产甲烷潜力的测定 产甲烷菌数量分析采用 Mayer 等^[20] 的方法, 每 1 L 培养基(pH 7.1~7.3) 含: 3.0 g Na₂SO₄、0.2 g KH₂PO₄、0.3 g NH₄Cl、0.5 g KCl、0.15 g CaCl₂·2H₂O、1.0 g NaCl、0.4 g MgCl₂·6H₂O、2.52 g NaHCO₃、0.36 g Na₂S、2.8 g CH₃COONa、30 mg Na₂SO₃、0.1 g 酵母膏、125 μg 偶氮间苯四酚(指示剂)、1 mL 微量元素溶液^[21]。将上述培养基分装于 25 mL 试管中, 每管 10 mL。同时, 每管中放入一个倒置的杜氏小管, 加塞、包扎后, 高压蒸汽灭菌、备用。称取 5 g 鲜土于 45 mL 无菌水的三角瓶中(浓度为 10⁻¹) 摇床(150 r·min⁻¹) 混合 15 min, 再用无菌水稀释成浓度为 10⁻²~10⁻⁷, 分别接种 1 mL 于上述装有培养基的试管中, 在温度为 30 °C 的恒温培养箱中进行培养, 并在箱中放入装有碱性焦性没食子酸溶液(30 mL) 的培养皿, 以吸收剩余的 O₂。关好箱门, 抽真

空, 灌入氮气培养, 培养时间为 3 周。然后, 观察试管中杜氏小管里有无气泡, 有气泡者计为阳性管, 根据不同稀释度下的阳性管数量, 利用 MPN 法计算产甲烷菌数量^[22]。

产甲烷潜力测定参照 Chidthaisong 等^[23] 的方法: 称取 10 g 鲜土于 100 mL 医用玻璃瓶中, 加 10 mL 灭菌的乙酸钠溶液做碳源, 混匀后, 加塞, 抽真空并注入氮气, 密封, 在 25 °C 恒温培养箱中培养。对照土样经高压灭菌 30 min, 用同样的方法培养。培养 2 周后, 摇动玻璃瓶使溶液中的 CH₄ 完全释放, 用注射器吸取玻璃瓶顶空中的气样, 保存在储气袋中, 做好标记, 用气相色谱测定气样中的 CH₄ 含量。产甲烷潜力为样品中的 CH₄ 含量减去对照瓶中的 CH₄ 含量。

1.3.3 土壤甲烷氧化菌数量及甲烷氧化潜力的测定

甲烷氧化菌数量分析采用 MPN 法^[24]。培养基采用 NSM 培养基, 每 1 L 培养基(pH 6.8) 含: 1.0 g MgSO₄·7H₂O、1.0 g KNO₃、0.717 g Na₂HPO₄·12H₂O、0.272 g KH₂PO₄、0.2 g CaCl₂·2H₂O、0.005 g EDTA 和 1 mL 微量元素溶液^[21]。测定方法为: 称取 5 g 鲜土于 45 mL 灭菌的 NSM 培养基中, 30 °C 下, 于摇床中(150 r·min⁻¹) 避光摇匀 12 h, 作为接种种子液(浓度为 10⁻¹)。再用无菌生理盐水稀释成 10⁻²~10⁻⁸, 接种于含有 30 mL NSM 培养基的医用玻璃瓶中(250 mL), 并在每个培养瓶中加入 20% 顶空体积(即除了样品以外剩余的瓶子体积, 该体积事先通过测定注水体积获得)的 CH₄ 气体, 加塞、密封。以不接种的只含培养基的培养瓶为空白对照。将所有培养瓶在 30 °C 摇床中避光培养 3 周后, 检查瓶中培养液是否混浊, 用 MPN 法计算甲烷氧化菌数量。

甲烷氧化潜力测定参照 Chidthaisong 等^[23] 的方法。测定方法为: 称取 10 g 鲜土于 100 mL 医用玻璃瓶中, 加 30 mL 无菌水、密封, 摇床(150 r·min⁻¹) 混匀 24 h。再向瓶中注入超纯 CH₄ 气体, 在 30 °C 的培养箱中培养。对照土样高压灭菌 30 min, 用同样的方法培养。培养 3 d 后, 用注射器吸取气样 50 mL, 保存在储气袋中, 做好标记, 用气相色谱测定气样中的 CH₄ 含量。甲烷氧化潜力为对照瓶中的 CH₄ 含量减去样品中的 CH₄ 含量。

1.3.4 土壤理化性质及植物生物量的测定 参照鲍士旦^[25] 的方法, 土壤有机碳含量采用重铬酸钾容量法-稀释热法进行测定, 土壤全氮含量采用半微量凯氏法测定, 土壤全磷采用浓 H₂SO₄-HClO₄ 消煮-钼锑抗比色法测定。土壤 pH 采用电位法测定。植物生物

量采用烘干法测定,将采集到的植物样品于 105 °C 干燥箱中杀青 30 min,70 °C 烘干至恒量,称干质量,最后换算成 $g \cdot m^{-2}$ 。

1.4 数据处理

采用 SPSS 16.0 软件对数据进行统计分析,入侵梯度之间的数据比较采用单因素方差分析(one-way ANOVA),并采用最小显著差异法(LSD)进行显著性检验($\alpha=0.05$)。应用 SPSS 16.0 中的 Correlate 进行 CH_4 排放通量与其影响因素的相关性分析,并用 Pearson 相关系数评价 CH_4 排放通量与各影响因素间的相关关系。采用 Origin 8.0 进行线性回归分析和作图。

2 结果与分析

2.1 互花米草入侵对 CH_4 排放通量的影响

由图 1 可以看出, CH_4 排放通量随着互花米草入侵梯度的增加而显著提高,且不同入侵梯度样地间均存在显著差异。在互花米草未入侵的本土植物样地中 CH_4 排放通量较低,9 个样地平均排放通量为 $0.68 mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$;在互花米草与本土植物混生样地中 CH_4 排放通量上升到 $2.60 mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$;而在互花米草单优群落样地中, CH_4 排放通量为 $5.88 mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$,与本土植物样地相比显著提高了 7.7 倍。

2.2 互花米草入侵对土壤产甲烷菌数量及产甲烷潜力的影响

由图 2 可以看出,随着互花米草入侵梯度的增加,土壤产甲烷菌数量及产甲烷潜力显著增加。其中,产甲烷菌数量在互花米草单优群落样地中达 $36.70 \times 10^5 cell \cdot g^{-1}$,分别是混生样地($16.04 \times 10^5 cell \cdot g^{-1}$)和本土植物样地($14.39 \times 10^5 cell \cdot g^{-1}$)

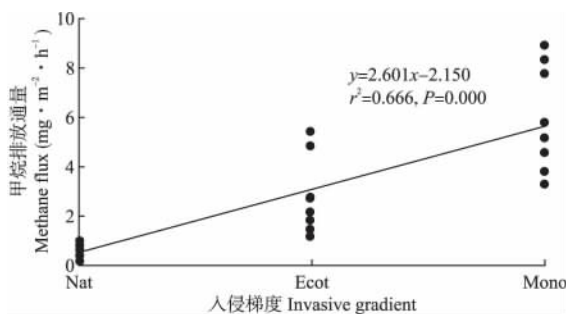


图 1 互花米草入侵对 CH_4 排放通量的影响

Fig. 1 Effects of *Spartina alterniflora* invasion on CH_4 flux.

Nat: 仅有本土植物样地 Site covered only by native weeds; Ecot: 互花米草与本土植物混生样地 Site mixed with *S. alterniflora* and native weeds; Mono: 互花米草单优群落样地 Site mono-cultured with *S. alterniflora*. 下同 The same below.

的 2.3 和 2.6 倍;产甲烷潜力在互花米草单优群落样地中为 $0.39 \mu g CH_4 \cdot g^{-1} \cdot d^{-1}$,是混生样地($0.14 \mu g CH_4 \cdot g^{-1} \cdot d^{-1}$)和本土植物样地($0.04 \mu g CH_4 \cdot g^{-1} \cdot d^{-1}$)的 2.8 和 9.8 倍。

2.3 互花米草入侵对土壤甲烷氧化菌数量及甲烷氧化潜力的影响

由图 3 可以看出,随着互花米草入侵梯度的增

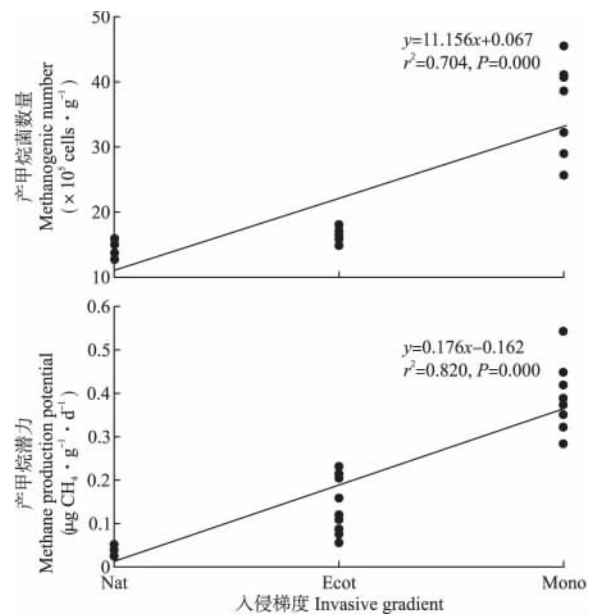


图 2 互花米草入侵对土壤产甲烷菌数量及产甲烷潜力的影响

Fig. 2 Effects of *Spartina alterniflora* invasion on methanogenic number and methane production potential.

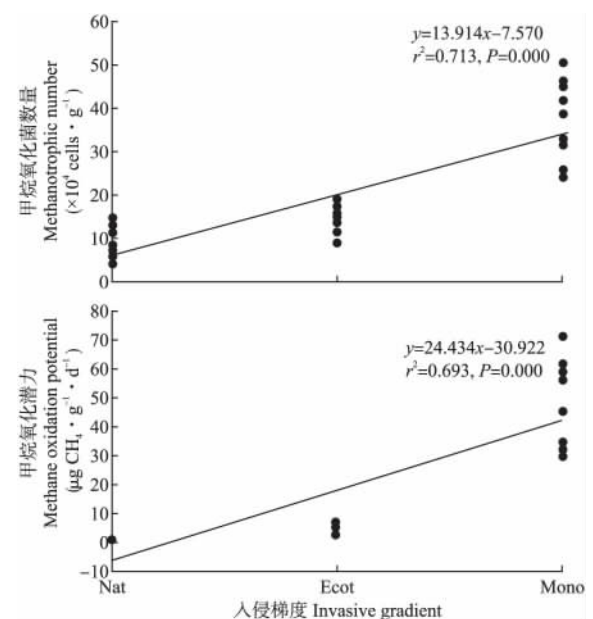


图 3 互花米草入侵对土壤甲烷氧化菌数量及甲烷氧化潜力的影响

Fig. 3 Effects of *Spartina alterniflora* invasion on methanotrophic number and methane oxidation potential.

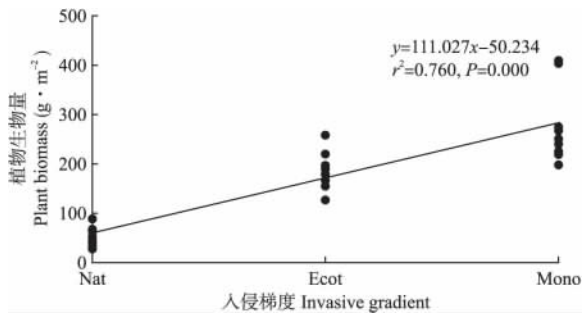


图4 互花米草入侵对植物生物量的影响

Fig. 4 Effects of *Spartina alterniflora* invasion on plant biomass.

加,土壤甲烷氧化菌数量和甲烷氧化潜力显著上升。其中,甲烷氧化菌数量在互花米草单优群落样地中达 $37.18 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{g}^{-1}$,分别是混生样地 ($14.23 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{g}^{-1}$) 和本土植物样地 ($9.36 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{g}^{-1}$) 的 2.6 和 4.0 倍;甲烷氧化潜力在互花米草单优群落样地中为 $49.38 \mu\text{g CH}_4 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,是混生样地 ($3.94 \mu\text{g CH}_4 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) 和本土植物样地 ($0.52 \mu\text{g CH}_4 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) 的 12.5 和 95.8 倍。

2.4 植物生物量、土壤理化特性及其与 CH_4 排放通量的关系

由图 4 可知,随着互花米草入侵梯度的增加,地上植物生物量呈现显著上升趋势,且不同入侵梯度

样地间存在显著差异。植物生物量在互花米草单优群落样地中最高,分别为混生样地和本土植物样地的 1.5 和 5.3 倍。

如图 5 所示,土壤有机碳含量随着互花米草入侵梯度的增加呈现显著上升趋势,土壤有机碳含量在本土植物样地中为 $4.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,而在互花米草单优群落样地中上升到 $6.19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,与本土植物样地相比差异显著。土壤全氮含量随着互花米草入侵梯度的增加呈现显著的下降趋势,在本土植物样地中为 $1.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,在互花米草单优群落样地中下降到 $0.46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,且二者差异显著。土壤 pH 值随着互花米草入侵梯度的增加呈现显著上升趋势,在本土植物样地中偏弱酸性,pH 值为 4.61 ~ 6.63,而当互花米草完全入侵后,土壤呈弱碱性,pH 值为 7.81 ~ 8.01,二者差异显著。土壤全磷含量随着互花米草入侵程度的增加有所上升,但变化不显著。

互花米草不同入侵梯度样地 CH_4 排放通量与土壤 pH、植物生物量、产甲烷菌数量、产甲烷潜力、甲烷氧化菌数量和甲烷氧化潜力均呈显著正相关,相关系数 r 分别为 0.686、0.669、0.794、0.857、0.807、0.834,与土壤全氮呈显著负相关 ($r = -0.504$)。其中, CH_4 排放通量与产甲烷潜力的相关性最为密切。

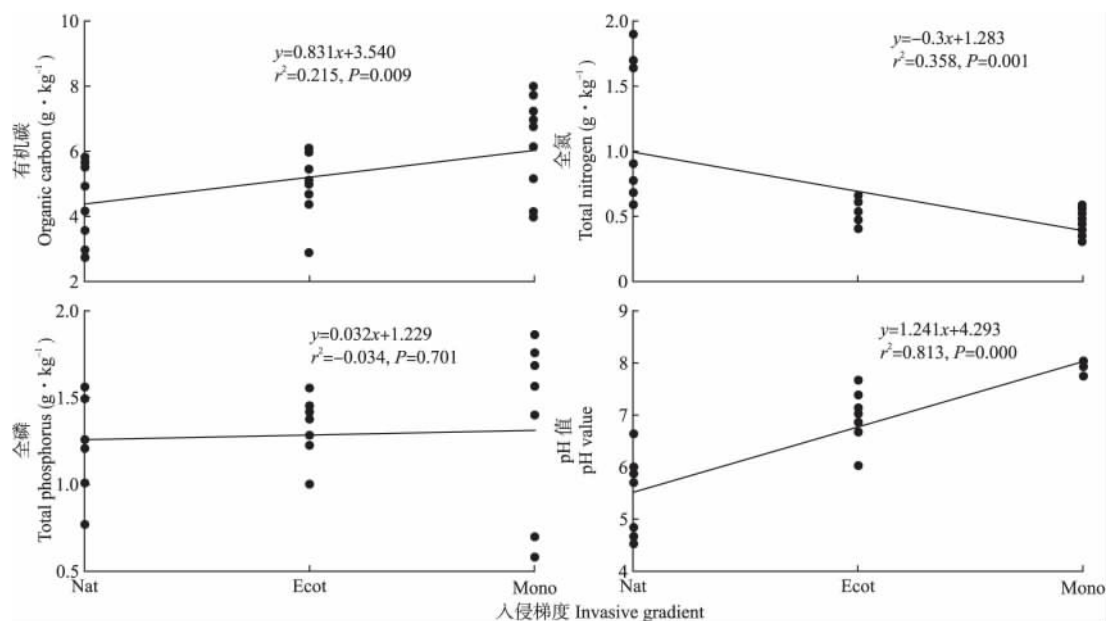


图5 互花米草入侵对土壤理化性质的影响

Fig. 5 Effects of *Spartina alterniflora* invasion on soil physico-chemical properties.

3 讨 论

3.1 高密度互花米草入侵促进了 CH_4 排放

Zhang 等^[26] 研究发现,互花米草定居土壤的

CH_4 排放通量要显著高于本地植物碱蓬定居土壤。Yuan 等^[27] 研究表明,土壤 CH_4 排放潜力随着互花米草入侵年限的增加而增加。在本研究中,随着互花米草入侵密度的增加, CH_4 排放通量显著提高,且高

密度互花米草入侵地的 CH_4 排放通量是未入侵样地的 8.7 倍,表明入侵密度也是一个影响滩涂湿地 CH_4 排放的重要因素。其原因可能是:首先,互花米草具有高度发达的通气组织,且茎的外围常围绕约 40 个空腔^[28],从而保证对 CH_4 的传输。因为植物的通气组织可以传输 CH_4 气体,避免 CH_4 经过氧化层,减少 CH_4 的氧化,从而提高 CH_4 排放。Inubushi 等^[29] 研究表明,通过植物茎和根中通气组织传输到大气中的 CH_4 可占总产 CH_4 量的 70% 左右。其次,互花米草具有大的生物量。大的地上生物量可能极大地提高了土壤中植物凋落物和根系分泌物的输入,导致其单优群落样地土壤有机碳含量升高,为 CH_4 生产提供更多的底物,进而促进了 CH_4 排放^[30]。另外,近年来一些报道指出,在好氧或厌氧条件下植物组织本身也能产生 CH_4 ^[31-32]。尽管互花米草组织本身能否产生 CH_4 还未见报道,但为进一步探讨互花米草入侵促进 CH_4 排放开辟了一条新途径。

3.2 产甲烷细菌是促进 CH_4 排放的直接因素

由于 CH_4 是微生物代谢的副产物,因此微生物行为是影响 CH_4 排放的重要因素^[33]。产甲烷菌在厌氧条件下产生 CH_4 ,而甲烷氧化菌则在好氧条件下将 CH_4 氧化成 CO_2 和 H_2O ^[18]。因此,自然湿地 CH_4 排放是产甲烷菌和甲烷氧化菌综合作用的结果^[34]。本研究中,产甲烷菌数量、产甲烷潜力与甲烷氧化菌数量、甲烷氧化潜力均随互花米草的入侵显著提高,这可能是因为:首先,由于常年处于水饱和状态,滩涂湿地土壤本身属于厌氧环境,加之微生物对大量互花米草凋落物的好氧分解,会进一步加剧厌氧程度,从而为产甲烷菌的增殖创造有利条件^[33,35]。其次,互花米草占优势生长的土壤中可能同时存在好氧与厌氧环境,从而使产甲烷菌与甲烷氧化菌均能够获得良好的生长。一般来讲,根际主要指的是根表面 0~5 mm 的微环境,而根围则指距根表面 5 mm 以外的周围环境^[36]。互花米草具有发达的通气组织,因此其根际可以通过茎的通气组织获得充足的氧气,形成微好氧环境;而根围由于离根表面较远,氧气供应相对较少,加之根围微生物呼吸对氧的消耗,所以根围出现厌氧条件是完全可能的。

CH_4 排放与产甲烷菌数量和产甲烷潜力具有一致的变化趋势,因为产甲烷菌负责 CH_4 的形成;但 CH_4 排放与甲烷氧化菌数量和甲烷氧化潜力应该呈负相关,因为甲烷氧化菌主要消耗 CH_4 。然而,相关

分析却表明, CH_4 排放与甲烷氧化菌数量和甲烷氧化潜力呈正相关,我们推测这可能归因于产甲烷菌数量的提高为甲烷氧化菌提供了充足的 CH_4 ,从而使甲烷氧化菌和甲烷氧化潜力与 CH_4 排放呈相同的变化趋势,所以在统计学上,甲烷氧化菌和甲烷氧化潜力与 CH_4 排放呈正相关。

此外,产甲烷菌数量提高的同时,甲烷氧化菌数量也显著上升,但在互花米草单优群落中甲烷氧化菌的数量远低于产甲烷菌数量,这可能是导致沿海滩涂湿地 CH_4 排放显著上升的原因之一。

3.3 土壤 pH 正向影响了 CH_4 排放

本研究中,土壤 pH 随着互花米草的入侵显著提高,甚至在互花米草单优群落土壤中呈碱性(pH 8.01)。这一结果与日本小檗(*Berberis thunbergii*)^[37]、薇甘菊(*Mikania micrantha*)^[38]和加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)^[39]入侵与土壤理化特性的关系一致。其提高 pH 主要是因为这些植物偏好利用土壤硝酸盐,使氮离子在土壤中出现剩余所致。而本结果可能与互花米草对土壤硝酸盐的过度利用有关,因为土壤总氮含量随着互花米草的入侵下降。有研究表明,土壤 pH 对产甲烷菌和甲烷氧化菌的影响很大,产甲烷菌在中性或微碱性条件下活性最高^[40-41],而甲烷氧化菌对偏酸性条件较适应(pH 5.5~6.5)^[40,42-43]。因此,本研究中,互花米草单优群落土壤中高 pH 更有利于产甲烷菌的生长,进而促进了 CH_4 排放。

总之,互花米草入侵显著地提高了滩涂湿地的 CH_4 排放通量,其主要机理是互花米草入侵首先提高了植物群落的生物量和土壤 pH,进而促进了土壤产甲烷菌数量和产甲烷潜力。而甲烷氧化菌的数量和甲烷氧化潜力与 CH_4 排放速率的变化趋势一致,这是由于提高的产甲烷菌数量和产甲烷潜力为其提供了充足的氧化底物(CH_4),而不是驱动 CH_4 排放的决定因素。

参考文献

- [1] Tian HQ, Lu CQ, Chen GS, et al. Contemporary and projected biogenic fluxes of methane and nitrous oxide in North American terrestrial ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2012, **10**: 528-536
- [2] Stocker TF, Qin D, Plattner GK, eds. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
- [3] NOAA. Carbon Dioxide, Methane Rise Sharply in 2007 [EB/OL]. (2011-10-23) [2013-10-23]. <http://>

- www.noaa.gov/stories2008/20080423_methane.html
- [4] Bloom AA, Palmer PI, Fraser A, *et al.* Large-scale controls of methanogenesis inferred from methane and gravity space borne data. *Science*, 2010, **327**: 322–325
- [5] Valéry L, Bouchard V, Lefeuvre JC. Impact of the invasive native species *Elymus athericus* on carbon pools in a salt marsh. *Wetlands*, 2004, **24**: 268–276
- [6] Angeloni NL, Jankowski KJ, Tuchman NC, *et al.* Effects of an invasive cattail species (*Typha × glauca*) on sediment nitrogen and microbial community composition in a freshwater wetland. *FEMS Microbiology Letters*, 2006, **263**: 86–92
- [7] Xiang J (项剑), Liu D-Y (刘德燕), Yuan J-J (袁俊吉), *et al.* Effects of *Spartina alterniflora* invasion on methane emission from coastal brackish marsh. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2012, **31**(6): 1361–1366 (in Chinese)
- [8] Kao-Kniffin J, Freyre DS, Balsler TC. Increased methane emissions from an invasive wetland plant under elevated carbon dioxide levels. *Applied Soil Ecology*, 2011, **48**: 309–312
- [9] Mozdzer TJ, Magonigal JP. Increased methane emissions by an introduced *Phragmites australis* lineage under global change. *Wetlands*, 2013, **33**: 609–615
- [10] Li J-L (李加林), Yang X-P (杨晓平), Tong Y-Q (童亿勤), *et al.* Influences of *Spartina alterniflora* invasion on ecosystem services of coastal wetland and its countermeasures. *Marine Science Bulletin* (海洋通报), 2005, **24**(5): 33–38 (in Chinese)
- [11] Xiao D-R (肖德荣), Zhu Z-C (祝振昌), Yuan L (袁琳), *et al.* Reinvasion of exotic plant species *Spartina alterniflora* in Chongming Dongtan Nature Reserve of Shanghai. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(11): 2997–3002 (in Chinese)
- [12] Liu C-Y (刘春悦), Zhang S-Q (张树清), Jiang H-X (江红星), *et al.* Spatiotemporal dynamics and landscape pattern of alien species *Spartina alterniflora* in Yancheng coastal wetlands of Jiangsu Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(4): 901–908 (in Chinese)
- [13] Deng ZF, Deng ZW, An SQ, *et al.* Habitat choice and seed-seedling conflict of *Spartina alterniflora* on the coast of China. *Hydrobiologia*, 2009, **630**: 287–297
- [14] Li HP, Zhang LQ. An experimental study on physical controls of an exotic plant *Spartina alterniflora* in Shanghai, China. *Ecological Engineering*, 2008, **32**: 11–21
- [15] Zhuo J (周军), Xiao W (肖炜), Qin P (钦佩). Effect of an alien species (*Spartina alterniflora*) on soil microbial biomass and functional groups in salt marshes. *Journal of Nanjing University* (Natural Sciences) (南京大学学报: 自然科学版), 2007, **43**(5): 494–500 (in Chinese)
- [16] Tong C (仝川), Yan Z-P (闫宗平), Wang W-Q (王维奇), *et al.* Methane flux from invasive species (*Spartina alterniflora*) and influencing factors in the Mi-II River Estuary. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), 2008, **28**(6): 829–830 (in Chinese)
- [17] Cheng XL, Peng RH, Chen JQ, *et al.* CH₄ and N₂O emissions from *Spartina alterniflora* and *Phragmites australis* in experimental mesocosms. *Chemosphere*, 2007, **68**: 420–427
- [18] Mer JL, Roger P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *European Journal of Soil Biology*, 2001, **37**: 25–50
- [19] Huang J-F (黄佳芳), Tong C (仝川), Liu Z-X (刘泽雄), *et al.* Plant-mediated methane transport and emission from a *Spartina alterniflora* marsh. *Chinese Bulletin of Botany* (植物学报), 2011, **46**(5): 534–543 (in Chinese)
- [20] Mayer HP, Conrad R. Factors influencing the population of methanogenic bacteria and the initiation of methane production upon flooding of paddy soil. *FEMS Microbiology Ecology*, 1990, **73**: 103–112
- [21] Widdel F, Pfennig N. Studies on dissimilatory sulfate-reducing bacteria that decompose fatty acids. I. Isolation of new sulfate-reducing bacteria enriched with acetate from saline environments. Description of *Desulfobacter postgatei* gen. nov., sp. nov. *Archives of Microbiology*, 1981, **129**: 395–400
- [22] Siebert ML, Hattings WHJ. Estimation of methane producing bacterial numbers by the most probable number (MPN) technique. *Water Research*, 1967, **1**: 13–19
- [23] Chidthaisong A, Inubushi K, Watanabe I. Methanogenic characteristics of flooded rice soils in response to glucose amendment. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1996, **42**: 645–649
- [24] Vishwakarma P, Dubey SK. The effect of soil type and plant age on the population size of rhizospheric methanotrophs and their activities in tropical soils. *Journal of Basic Microbiology*, 2007, **47**: 351–357
- [25] Bao S-D (鲍士旦). Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 1999 (in Chinese)
- [26] Zhang Y, Ding W, Cai Z, *et al.* Response of methane emission to invasion of *Spartina alterniflora* and exogenous N deposition in the coastal salt marsh. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**: 4588–4594
- [27] Yuan JJ, Ding WX, Liu DY, *et al.* Methane production potential and methanogenic archaea community dynamics along the *Spartina alterniflora* invasion chronosequence in a coastal salt marsh. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2014, **98**: 1817–1829
- [28] Huang J-F (黄佳芳). Methane Transport of *Spartina alterniflora* and *Cyperus malaccensis* Lam. var. *brevifolius* Bockl. Master Thesis. Fuzhou: Fujian Normal University, 2010: 64 (in Chinese)
- [29] Inubushi K, Cheng WG, Aonuma S, *et al.* Effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on CH₄ emission from a rice paddy field. *Global Change Biology*, 2003, **9**: 1458–1464
- [30] Ding W-X (丁维新), Cai Z-C (蔡祖聪). Effects of soil organic matter and exogenous organic materials on methane production and emission from wetlands. *Acta*

- Ecologica Sinica* (生态学报), 2002, **22**(10): 1672–1679 (in Chinese)
- [31] Keppler F, Hamilton JTG, Braß M, *et al.* Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. *Nature*, 2006, **439**: 187–191
- [32] Rice AL, Butenhoff CL, Shearer MJ, *et al.* Emissions of anaerobically produced methane by trees. *Geophysical Research Letters*, 2010, **37**: 1–5
- [33] Chen Z-Y (陈中云), Min H (闵航), Chen M-C (陈美慈), *et al.* Studies on relationships among methane emission and methane-oxidizing and methanogenic bacteria in three types of rice-field soil. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2001, **21**(9): 1498–1505 (in Chinese)
- [34] Zhou Y-F (周叶锋), Liao X-L (廖晓兰). Emission of methane from environment affected by methanogens and methanotrophs. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2007, **26**(suppl.): 340–346 (in Chinese)
- [35] Wu Z-B (吴振斌), Liang W (梁威), Cheng S-P (成水平), *et al.* Studies on correlation between the enzymatic activities in the rhizosphere and purification of wastewater in the constructed wetland. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2001, **21**(5): 622–624 (in Chinese)
- [36] Baudoin E, Benizri E, Guckert A. Impact of growth stage on the bacterial community structure along maize roots, as determined by metabolic and genetic fingerprinting. *Applied Soil Ecology*, 2002, **19**: 135–145
- [37] Kourtev PS, Ehrenfeld JG, Huang WZ. Effects of exotic plant species on soil properties in hardwood forests of New Jersey. *Water, Air & Soil Pollution*, 1998, **105**: 493–501
- [38] Li WH, Zhang CB, Jiang HB, *et al.* Changes in soil microbial community associated with invasion of the exotic weed, *Mikania micrantha* H. B. K. *Plant and Soil*, 2006, **281**: 309–324
- [39] Zhang CB, Wang J, Qian BY, *et al.* Effects of the invader *Solidago canadensis* on the soil properties. *Applied Soil Ecology*, 2009, **43**: 163–169
- [40] Crozier CR, Devai I, DeLaune RD. Methane and reduced sulfur gas production by fresh and dried wetland soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, **59**: 277–284
- [41] Garcia JL, Patel BKC, Ollivier B. Taxonomic, phylogenetic, and ecological diversity of methanogenic archaea. *Anaerobe*, 2000, **6**: 205–226
- [42] Dunfield P, Knowles R, Dumont R, *et al.* Methane production and consumption in temperate and subarctic peat soils: Response to temperature and pH. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, **25**: 321–326
- [43] Ding W-X (丁维新), Cai Z-C (蔡祖聪). Effect of nitrogen fertilization on methane production in wetland soils. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2003, **22**(3): 380–383 (in Chinese)

作者简介 潘小翠,女,1986年生,硕士研究生.主要从事入侵植物土壤微生物学研究. E-mail: panxiaocui061003@163.com

责任编辑 孙菊

潘小翠,管铭,张崇邦. 互花米草入侵对滩涂湿地甲烷排放的影响. 应用生态学报, 2016, **27**(4): 1145–1152

Pan X-C, Guan M, Zhang C-B. Effects of *Spartina alterniflora* invasion on methane emission in coastal salt marsh. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(4): 1145–1152 (in Chinese)