

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0920

胡伟芳, 曾从盛, 高君颖, 等. 2015. 闽江口鳝鱼滩芦苇湿地沉积物甲烷产生与氧化潜力对外源物质输入响应[J]. 环境科学学报, 35(4): 1116-1124
Hu W F, Zeng C S, Gao J Y, et al. 2015. Response of methane production and oxidation potential to exogenous substances in the *Phragmites australis* marsh sediments of Shanyutan wetland in the Min River estuary[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 35(4): 1116-1124

闽江口鳝鱼滩芦苇湿地沉积物甲烷产生与氧化潜力对外源物质输入响应

胡伟芳^{1,2}, 曾从盛^{1,2,3,*}, 高君颖^{1,2}, 章文龙^{1,2}, 张林海^{1,2,3}, 王维奇^{1,2,3}, 黄佳芳^{1,2,3}, 颜燕燕¹

1. 福建师范大学地理研究所, 福州 350007
2. 福建师范大学亚热带湿地研究中心, 福州 350007
3. 湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室, 福州 350007

收稿日期: 2014-06-18 修回日期: 2014-09-18 录用日期: 2014-09-19

摘要: 研究河口湿地沉积物甲烷(CH₄)产生和氧化对外源物质输入响应, 对环境保护及温室气体减排具有重要意义. 本研究基于室内培养-气相色谱法, 探讨了闽江河口半咸水芦苇(*Phragmites australis*)沼泽湿地沉积物 CH₄产生与氧化对不同外源物质(底物、电子受体和营养物质)输入响应. 结果表明: CH₃OH(500 mg·kg⁻¹)、C₃H₉N(500 mg·kg⁻¹)和 Fe²⁺(0~500 mg·kg⁻¹)对 CH₄产生潜力起促进作用($p < 0.05$); NO₃⁻(0~500 mg·kg⁻¹)、NO₂⁻(0~500 mg·kg⁻¹)、Fe³⁺(50 mg·kg⁻¹)和 NH₄⁺(50~500 mg·kg⁻¹)表现为抑制 CH₄产生潜力($p < 0.05$); 而 0~50 mg·kg⁻¹的 CH₃OH 和 C₃H₉N、0~500 mg·kg⁻¹的 CH₃COOH、SO₄²⁻、Mn⁴⁺、PO₄³⁻和低剂量的 NH₄⁺(0~5 mg·kg⁻¹)对 CH₄产生的影响不显著($p > 0.05$). 实验剂量内(0~500 mg·kg⁻¹), Fe³⁺和 Mn⁴⁺的添加可促进 CH₄氧化($p < 0.05$); CH₃COOH、CH₃OH、C₃H₉N、NO₃⁻、NO₂⁻、SO₄²⁻、NH₄⁺和低剂量的 PO₄³⁻(0~50 mg·kg⁻¹)对沉积物 CH₄氧化潜力均有显著的抑制作用($p < 0.05$); 而 Fe²⁺对 CH₄氧化没有显著影响($p > 0.05$). 综合分析表明, CH₃COOH、CH₃OH、C₃H₉N、NO₃⁻、NO₂⁻、SO₄²⁻、PO₄³⁻、NH₄⁺和 Fe²⁺的输入对沉积物 CH₄产生和氧化的综合作用为增加 CH₄排放通量, 而 Fe³⁺和 Mn⁴⁺输入的综合作用则与之相反.

关键词: 甲烷产生潜力; 甲烷氧化潜力; 外源物质; 闽江河口湿地

文章编号: 0253-2468(2015)04-1116-09 中图分类号: X171 文献标识码: A

Response of methane production and oxidation potential to exogenous substances in the *Phragmites australis* marsh sediments of Shanyutan wetland in the Min River estuary

HU Weifang^{1,2}, ZENG Congsheng^{1,2,3,*}, GAO Junying^{1,2}, ZHANG Wenlong^{1,2}, ZHANG Linhai^{1,2,3}, WANG Weiqi^{1,2,3}, HUANG Jiafang^{1,2,3}, YAN Yanyan¹

1. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007
2. Research Center of Wetlands in Subtropical Region, Fujian Normal University, Fuzhou 350007
3. Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process of Ministry of Education, Fuzhou 350007

Received 18 June 2014; received in revised form 18 September 2014; accepted 19 September 2014

Abstract: Methane, a powerful greenhouse gas, is both produced and consumed in estuary sediments. Studying the response of methane production and oxidation potential to exogenous substances in estuarine marsh sediments is important to environment protection and greenhouse gas emission reductions. The rates of methane production and oxidation of sediments under the *Phragmites australis* marsh in the Shanyutan wetland in the Min River estuary were determined using incubation experiment. Different exogenous substances, including substrates, electron acceptors and nutrients, were added to explore the

基金项目: 福建师范大学校级创新团队项目(No. IRTL1205); 福建省自然科学基金(No. 2014J01119)

Supported by the Program for Innovative Research Team in Fujian Normal University, China(No. IRTL1205) and the Natural Science Foundation of Fujian Province (No. 2014J01119)

作者简介: 胡伟芳(1990—), 女, E-mail: weifanghyx@163.com; * 通讯作者(责任作者), E-mail: czeng@fjnu.edu.cn

Biography: HU Weifang (1990—), female, E-mail: weifanghyx@163.com; * **Corresponding author**, E-mail: czeng@fjnu.edu.cn

affecting factors of methane production and oxidation potential. High concentration ($500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) of methyl alcohol and trimethylamine and $0 \sim 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ of ferrous ion promoted methane production potential, nitrate ($0 \sim 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), nitrite ($0 \sim 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), ferric iron ($50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) and ammonium ($50 \sim 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) inhibited methane production potential, while there was no significant influence for methyl alcohol ($0 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), trimethylamine ($0 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), low concentration of ammonium ($0 \sim 5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) and acetic acid, sulfate, manganese ion and phosphate radical at the concentration of $0 \sim 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Furthermore, $0 \sim 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ of ferric iron and manganese ion promoted methane oxidation potential, while methyl alcohol, trimethylamine, nitrate, nitrite, sulfate, ammonium and low concentration of phosphate radical ($0 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) inhibited methane oxidation potential. However, various concentrations of ferrous ion didn't make significant difference on methane oxidation potential. Methane emissions will increase as a response of methane production and oxidation potential to acetic acid, methyl alcohol, trimethylamine, phosphate radical, ammonium and ferrous ion, but will mitigate in response to ferric iron and manganese ion.

Keywords: methane production potential; methane oxidation potential; exogenous substances; Min River estuarine wetland

1 引言 (Introduction)

甲烷 (CH_4)、二氧化碳 (CO_2) 和氧化亚氮 (NO_2) 是主要的温室气体, 当今全球大气中的 CH_4 浓度是工业革命前的 2.5 倍 (IPCC, 2013). CH_4 的单分子增温潜势是 CO_2 的 25 倍, 全球大气中 CH_4 浓度的微量变化将引起气候的深刻变化 (Bridgham *et al.*, 2013), 因而受到国际社会的高度关注. 厌氧生境是 CH_4 产生与排放的主要源地, 其中, 天然湿地对全球 CH_4 排放通量的贡献率约为 15% ~ 40% (Bridgham *et al.*, 2006). 湿地土壤是大气中甲烷的“源”或“汇”, 取决于产甲烷菌 (Methanogenus) 的 CH_4 产生潜力和甲烷氧化菌 (Methanotrophs) 的 CH_4 氧化潜力二者之间的平衡, 并受外源物质输入的影响 (Eriksson *et al.*, 2010). 目前, 关于外源物质输入对湿地 CH_4 产生的影响研究已较多, 一些学者研究发现, 醋酸 ($\text{CH}_3 \text{COOH}$)、甲醇 ($\text{CH}_3 \text{OH}$)、甲胺 ($\text{CH}_3 \text{NH}_2$) 和三甲胺 ($\text{C}_3 \text{H}_9 \text{N}$) 等底物均能促进甲烷产生 (Lyimo *et al.*, 2002; Kaku *et al.*, 2005; 仝川等, 2011); 硝酸根 (NO_3^-)、亚硝酸根 (NO_2^-)、硫酸根 (SO_4^{2-})、三价铁离子 (Fe^{3+}) 和四价锰离子 (Mn^{4+}) 等电子受体主要表现为抑制甲烷的产生 (Chidthaisong *et al.*, 2000; Raghoebarsing *et al.*, 2006; 曾从盛等, 2008; Beal *et al.*, 2009; Lipson *et al.*, 2013); 铵根 (NH_4^+) 的输入主要抑制 CH_4 产生潜力, 但原位观测表明其会促进 CH_4 排放通量 (姜欢欢等, 2012; 葛瑞娟等, 2010; 牟晓杰等, 2012; Andrews *et al.*, 2013). CH_4 氧化是影响 CH_4 排放的一个重要环节, 但关于 CH_4 氧化对外源物质输入的响应机制目前尚不清楚. 系统性的研究 CH_4 产生与氧化对外源物质输入的响应具有重要意义.

河口湿地处于海洋和陆地相互作用地带, 承载着来自陆地人类活动带来的外源物质, 是响应全球变化和人类活动较为敏感的生态系统之一 (孙志高

等, 2009). 除地质作用和生物作用之外, 外源物质还通过水文作用 (河流、海水和地下水) 和大气物质沉降 (氮沉降和酸沉降) 沉积到河口湿地 (Sutula *et al.*, 2001). 近些年, 随着流域内工农业的发展、城市化的推进及近岸水域水产养殖的增加, 大量外源物质沉积到河口湿地. 在此背景下, 外源物质的输入对河口 CH_4 产生和氧化有何影响? CH_4 产生和氧化的综合效应如何? 这些都值得探讨. 闽江河口湿地是中国东南沿海典型的开放式潮汐河口湿地. 闽江流经 38 个县市, 其流域占福建全省一半以上的陆域. 2013 年中国海洋环境状况公报 (国家海洋局, 2013) 统计公布数据表明, 闽江携带入海的污染物 (COD $117 \times 10^4 \text{ t}$, 氨氮 10337 t, 硝酸盐 26685 t, 亚硝酸盐 1288 t, 总磷 6423 t, 石油类 571 t) 仅次于长江和珠江, 这给闽江河口湿地的生态环境带来了巨大压力. 因此, 本研究选取闽江河口鱮鱼滩芦苇 (*Phragmites australis*) 湿地, 通过多种外源物质 (包括底物、电子受体和营养物质) 的添加实验, 探讨其对河口湿地沉积物 CH_4 产生和氧化潜力的影响, 以为河口湿地的环境保护及温室气体减排提供基础参考依据.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 研究区概况

鱮鱼滩湿地 ($119^\circ 34' 12'' \sim 119^\circ 40' 40'' \text{E}$, $26^\circ 00' 36'' \sim 26^\circ 03' 42'' \text{N}$) 位于闽江入海口, 地处南亚热带与中亚热带的过渡地带, 是闽江河口面积最大 (约 3120 hm^2) 的天然潮滩湿地. 区内气候暖热湿润, 降水丰沛, 年均降水日数为 153 d, 年均降水量为 1346 mm (仝川等, 2012). 芦苇是闽江河口湿地优势大型挺水植物之一, 芦苇植株在夏季达到最高 ($1.6 \sim 1.8 \text{ m}$), 地上生物量也达到峰值 ($(1524.8 \pm 78.9) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) (曾从盛等, 2012). 本研究样地中的芦苇湿地属于河口半咸水沼泽湿地 (Brackish-water

marshes)(全川等, 2012)。

2.2 样品采集及测定方法

2.2.1 样品采集 2011年8月,在芦苇长势良好的样地选取 160 cm×160 cm 的样方,其中设置 5 个小样方,分别为 4 个角和中心点,每个样点间距 5 cm,设 3 个重复。用直径 5 cm 的土壤采样器采集 0~15 cm 的沉积物样品,样品采集后装入自封袋带回实验室。所有样品自然风干后研磨,过 20 目筛备用。

2.2.2 沉积物性质测定 pH 值和电导率分别使用酸度计(奥利龙 818 型)和电导仪(DDS-307 型)测定,水土比为 5:1。沉积物样品用去离子水浸提后,用 TOC-V_{CPII} 仪器测定 DOC。在 SKALAR 连续流动分析仪测定沉积物中的 NH₄⁺、NO₃⁻、NO₂⁻、SO₄²⁻ 和 PO₄³⁻。采用离子色谱仪(美国戴安 DIONEX ICS3000)测定 CH₃COOH 浓度。研究区沉积物的理化性质如表 1 所示。

表 1 闽江口滩芦苇湿地沼泽沉积物理化性质

Table 1 Soil properties of *Phragmites australis* marsh in the Min River estuary

DOC/ (mg·kg ⁻¹)	CH ₃ COOH/ (mg·kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ / (mg·kg ⁻¹)	NO ₂ ⁻ / (mg·kg ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ / (mg·kg ⁻¹)	NH ₄ ⁺ / (mg·kg ⁻¹)	PO ₄ ³⁻ / (mg·kg ⁻¹)	电导率/ (mS·cm ⁻¹)	pH
70.02	52.81	6.34	0.20	456.56	182.28	2.41	1.07	5.59

2.3 实验方法

2.3.1 供试土样的处理 实验使用的外源物质添加物为 A、R 级化合物,包括 FeCl₃、FeCl₂、MnCl₂、NH₄Cl、Na₂SO₄、NaNO₃、NaNO₂、Na₃PO₄、CH₃COOH、CH₃OH 和 C₃H₉N。实验剂量参照闽江口滩芦苇湿地沼泽沉积物理化性质(表 1)中部分待添加物(CH₃COOH、NO₃⁻、NO₂⁻、SO₄²⁻、NH₄⁺ 和 PO₄³⁻)指标,最大添加量约为各项指标平均值的 5 倍,梯度为 5、50 和 500 mg·kg⁻¹(以干土质量计算)的剂量处理供试土样。每个处理做 3 个重复。

2.3.2 CH₄产生潜力的培养实验 CH₄产生潜力的培养实验采用厌氧培养法(高君颖, 2012),具体操作如下:①称取 10 g 风干土壤样品,装入 150 mL 的培养瓶中,加入蒸馏水,调节培养瓶中土壤的含水量,得到含水量为 150% 的土壤,加入 1 mL 不同浓度的化合物溶液,然后在漩涡混合器上混合 15 min;②用氮气(N₂)以 300 mL·min⁻¹ 的流速冲洗(N₂用末端连接玻璃管的胶管导入培养瓶)培养瓶,持续 5 min,以形成厌氧环境;③将处理好的土壤样品放入恒温培养箱中,在 30 °C 条件下连续培养 10 d,用微型注射器抽取 2 mL 气体,用以测量培养瓶内 CH₄ 气体浓度;④每次抽取 CH₄ 气体后,用 N₂ 冲洗(方法同上),以形成厌氧环境。

2.3.3 CH₄氧化潜力的培养实验 CH₄氧化潜力的培养实验采用好氧培养法(高君颖, 2012),具体操作如下:①处理同 2.3.2 节步骤①,但培养瓶中土壤的含水量设定为 30%;②用异丁基橡胶塞密封,再用微型注射器注入 0.5 mL 纯 CH₄;③除了将恒温培养箱的温度设为 25 °C 外,其他处理如 2.3.2 节步骤③;④每次抽取 CH₄ 气体后,向培养瓶中注入 2

mL 高纯合成空气,以保持培养瓶内外压力平衡。

以上实验每批样品均设置不添加物质对照,每个培养样品做 3 个重复。

2.4 CH₄测定

气体样品采用气相色谱仪(日本岛津 GC-2010)分析。CH₄检测器为氢焰离子化检测器(FID),载气为 N₂(流速 30 mL·min⁻¹),H₂为燃气(流速 30 mL·min⁻¹),空气为助燃气(流速 400 mL·min⁻¹),检测器温度为 120 °C,分离柱温度为 60 °C。

2.5 数据处理与计算

利用 SPSS 17.0 的单因素方差分析(One-way ANOVA)比较不同处理 CH₄产生与氧化潜力的差异;采用 Origin 8.0 进行绘图。CH₄产生潜力和氧化潜力计算公式如下(Wassmann *et al.*, 1998):

$$P = \frac{dc}{dt} \cdot \frac{V}{W} \cdot \frac{MW}{MV} \cdot \frac{273}{T}$$

式中, P 为 CH₄产生(氧化)潜力($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$); dc/dt 为单位时间 CH₄浓度的变化($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$); V 为培养瓶内气体体积(L); W 为干土重(g); MW 为 CH₄的分子量(g); MV 为标准状态下 1 mol 气体的体积(L); T 为培养温度(K)。

3 结果与分析(Results and analysis)

3.1 CH₃COOH、CH₃OH 和 C₃H₉N 对沉积物 CH₄产生与氧化潜力的影响

不同底物对 CH₄产生与氧化的影响如图 1 所示。沉积物 CH₄产生潜力随 CH₃OH 和 C₃H₉N 添加量的增加呈指数上升趋势,在添加量不高于 50 mg·kg⁻¹时对 CH₄产生潜力的影响差异不显著

($p>0.05$), 而添加量达到 $500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 促进作用达到极显著水平 ($p<0.01$), 表现为: $\text{C}_3\text{H}_9\text{N}$ ($35.79 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$) $>$ CH_3OH ($10.70 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$). 不同添加量 ($5\sim 500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) CH_3COOH 对 CH_4 产生潜力影响不显著 ($p>0.05$).

3 种底物在不同含量条件下对沉积物 CH_4 氧化潜力均有显著抑制作用 ($p<0.05$). CH_4 氧化潜力随

添加量增加呈“U”字型变化趋势, 其中, CH_3OH 和 CH_3COOH 在 $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时抑制 CH_4 氧化潜力的作用最明显, 其氧化潜力分别为 2.17 和 $2.70 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, 比对照减少 50% 和 37% ; $\text{C}_3\text{H}_9\text{N}$ 在 $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时抑制作用最强, CH_4 氧化潜力为 $2.68 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, 比对照减少 41% .

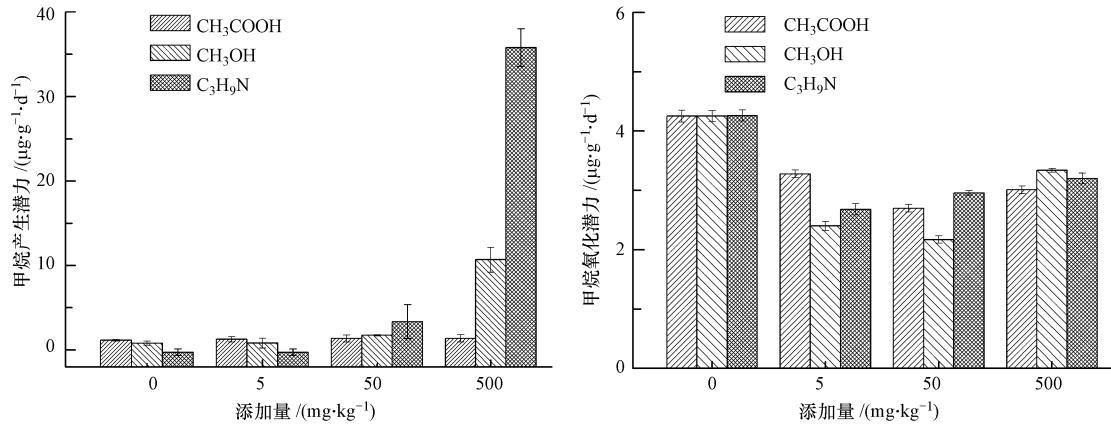


图 1 添加不同底物的沉积物 CH_4 产生与氧化潜力

Fig.1 Methane production and oxidation potential with addition of various substrates of marsh soil

3.2 NO_3^- 、 NO_2^- 、 SO_4^{2-} 、 Fe^{3+} 和 Mn^{4+} 对沉积物 CH_4 产生与氧化潜力的影响

由图 2 可知, NO_3^- 和 NO_2^- 均表现为抑制 CH_4 产生潜力, 抑制作用随添加量的增大而增强. 当添加量达到 $500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, CH_4 产生潜力分别为 0.10 和

$0.04 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, 比对照分别减少 87% 和 89% . Fe^{3+} 在 $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时抑制 CH_4 产生潜力的作用最显著, 比对照减少 40% ; 其他添加量之间没有显著差异 ($p>0.05$). 添加量为 $0\sim 500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 SO_4^{2-} 和 Mn^{4+} 对 CH_4 产生潜力的影响没有显著差异 ($p>0.05$).

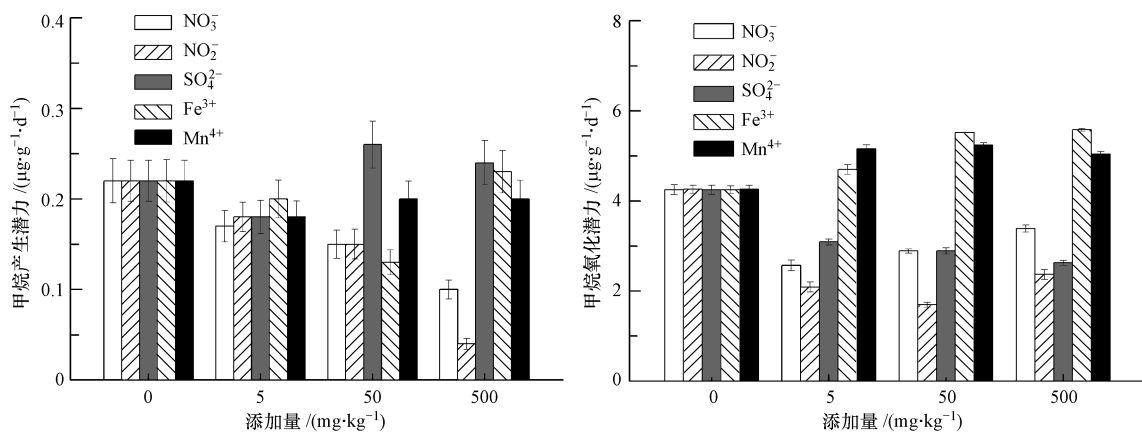


图 2 添加各种电子受体的沉积物 CH_4 产生与氧化潜力

Fig.2 Methane production and oxidation potential with addition of various electron acceptors of marsh soil

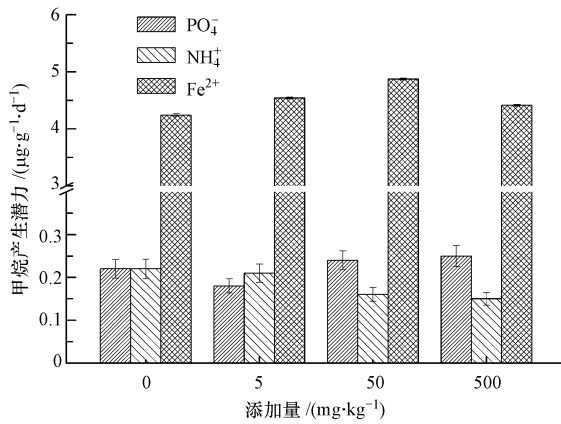
5 种电子受体各剂量处理土样的 CH_4 氧化潜力均与对照组之间差异显著 ($p<0.05$) (图 2). NO_3^- 和 NO_2^- 的添加均抑制 CH_4 氧化潜力, 分别在 $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

和 $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时抑制作用最强, CH_4 氧化潜力分别为 $2.57 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ (比对照组减少 40%) 和 $1.70 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ (比对照组减少 60%); 随添加量的增加, 其抑制作用减弱. SO_4^{2-} 随添加量增加, CH_4 氧化潜力

减小,当 SO_4^{2-} 添加量达到 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, CH_4 氧化潜力比对照组减少 38%。 Fe^{3+} 和 Mn^{4+} 的添加均促进 CH_4 氧化潜力,其中, Fe^{3+} 随添加量增大,促进 CH_4 氧化潜力的作用越强,最大促进作用较对照组增加 31%; Mn^{4+} 的添加也会促进 CH_4 氧化潜力,但各添加量 ($5 \sim 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 实验组的 CH_4 氧化潜力之间没有显著性差异 ($p > 0.05$)。

3.3 PO_4^{3-} 、 NH_4^+ 和 Fe^{2+} 对沉积物 CH_4 产生与氧化潜力的影响

整个培养期内, PO_4^{3-} 和低含量 NH_4^+ ($\leq 5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 组的 CH_4 产生潜力与对照组差异不显著 ($p > 0.05$) (图 3)。较高含量 NH_4^+ ($50 \sim 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 对 CH_4 产生潜力具有显著的抑制作用。



Fe^{2+} 在添加量范围内对 CH_4 产生潜力起促进作用,但变化较小,其 CH_4 产生潜力平均为 $4.61 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 平均比对照组增加 8%。

整个培养期内, PO_4^{3-} 和 NH_4^+ 不同含量水平处理下 CH_4 氧化潜力与对照差异显著 ($p < 0.05$), 而不同含量 Fe^{2+} 水平下 CH_4 氧化潜力没有显著差异 ($p > 0.05$)。低含量 PO_4^{3-} ($\leq 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 对 CH_4 氧化潜力起抑制作用,最多可抑制 20% 的 CH_4 氧化潜力; 当 PO_4^{3-} 含量达到 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, CH_4 氧化潜力与对照组差异不显著 ($p > 0.05$)。 NH_4^+ 的添加会抑制 CH_4 氧化潜力,随 NH_4^+ 添加量的增加, CH_4 氧化潜力呈“U”字型变化趋势,在 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时抑制作用最明显,比对照组减少 39%。

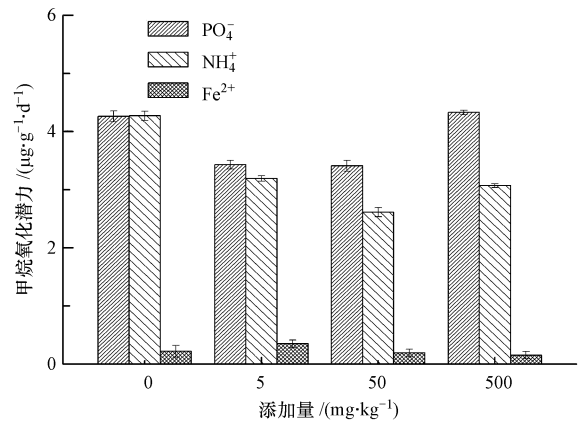


图 3 添加营养物质的沉积物 CH_4 产生与氧化潜力

Fig.3 Methane production and oxidation potential with addition of various nutrient elements of marsh soil

3.4 CH_4 产生与氧化潜力对外源物质添加的响应对比

闽江口半咸水芦苇沼泽湿地沉积物 CH_4 产生和氧化潜力对外源物质添加的响应如表 2 所示。 CH_4 产生和氧化潜力二者的综合作用对 CH_4 排放通量的可能影响有 2 种: ①产生或氧化潜力作用不显著,但促进 CH_4 产生潜力或抑制 CH_4 氧化潜力显著(如

CH_3COOH 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、 Fe^{2+} 和 PO_4^{3-})、促进 CH_4 产生潜力并抑制其氧化潜力(如 CH_3OH 和 $\text{C}_3\text{H}_9\text{N}$)、抑制 CH_4 氧化潜力的作用大于抑制其产生潜力(如 NO_3^- 和 NO_2^-),将会增加 CH_4 排放通量; ②抑制 CH_4 产生潜力或促进 CH_4 氧化潜力显著(如 Fe^{3+} 和 Mn^{4+}),将会减少 CH_4 排放通量。

表 2 不同添加物对湿地沉积物 CH_4 产生和氧化潜力的影响

Table 2 Influence of additives on CH_4 production and oxidation potential on the marsh soil

类型	添加物	产生潜力	氧化潜力	结果	对 CH_4 排放通量的可能影响
底物	CH_3COOH	/	-	抑制氧化潜力	+
	CH_3OH	+(500)	-	$500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时促进产生潜力,抑制氧化潜力	+
	$\text{C}_3\text{H}_9\text{N}$	+(500)	-	同 CH_3OH	+
电子受体	NO_3^-	-	-	抑制氧化潜力 > 抑制产生潜力	+
	NO_2^-	-	-	抑制氧化潜力 > 抑制产生潜力	+
	SO_4^{2-}	/	-	抑制氧化潜力	+

续表2

类型	添加物	产生潜力	氧化潜力	结果	对 CH ₄ 排放通量的可能影响
营养物质	Fe ³⁺	-(50)	+	50 mg·kg ⁻¹ 时抑制产生潜力添加浓度内促进氧化潜力	-
	Mn ⁴⁺	/	+	促进氧化潜力	-
	PO ₄ ³⁻	/	-(5~50)	5~50 mg·kg ⁻¹ 时抑制氧化潜力	+
	NH ₄ ⁺	-(50~500)	-	50~500 mg·kg ⁻¹ 抑制产生潜力<抑制氧化潜力, 添加量范围内抑制氧化潜力	+
	Fe ²⁺	+	/	促进产生潜力.	+

注:“+”表示促进作用,“-”表示抑制作用,“±”表示促进和抑制作用均有发生,括号中数据表示在该含量范围内有显著性差异,“/”表示在 5~500 mg·kg⁻¹ 添加量范围均没有显著性差异($p>0.05$).

4 讨论 (Discussion)

4.1 可选择底物对湿地沉积物 CH₄ 产生与氧化潜力的影响

研究表明,CH₄ 产生潜力对 CH₃COOH (0~500 mg·kg⁻¹)、CH₃OH (0~50 mg·kg⁻¹) 和 C₃H₉N (0~50 mg·kg⁻¹) 添加的响应不显著(图 1),这一现象可能与闽江口芦苇湿地沉积物中的产甲烷菌有关.余晨兴等(2012)的研究发现,闽江口芦苇湿地表层(0~30 cm)沉积物中产甲烷菌的优势类群为 *Methanolinea* 和 *Methanoregula*, 其营养类型为 H₂/CO₂ (Sakai *et al.*, 2012). 因此,闽江河口芦苇沼泽湿地 CH₄ 生成途径主要为 H₂/CO₂ 途径,而非乙酸途径和甲基途径.本研究还表明,较高剂量(500 mg·kg⁻¹)的 CH₃OH 和 C₃H₉N 对 CH₄ 产生潜力具有显著的促进作用,这与 Lyimo 等(2002)和 Kaku 等(2005)对河口湿地沉积物的研究结果相似.CH₃OH 和 C₃H₉N 属于非竞争性甲烷产生基质(non-competitive substrates),可以被产甲烷菌利用进而生成 CH₄ (全川等,2011).

研究表明,CH₃OH、C₃H₉N 和 CH₃COOH 这 3 种底物在实验剂量内(0~500 mg·kg⁻¹)对 CH₄ 氧化潜力均表现为抑制作用(图 1).其中,CH₃OH 对 CH₄ 氧化的抑制作用在黄河口潮滩湿地也有类似现象(孙万龙等,2014).一方面,CH₃OH 是 CH₄ 氧化代谢途径的中间产物,对甲烷单加氧酶产生反馈抑制,即 CH₃OH 在 CH₄ 氧化菌的代谢过程中抑制其新陈代谢;另一方面,尽管培养条件为好氧环境,但供试土壤质地较为粘重时,内部仍然存在厌氧微环境,造成 CH₄ 氧化的同时也有部分 CH₄ 产生,进而促使培养瓶内 CH₄ 的浓度上升,表现为抑制氧化(孙万龙等,2014).事实上,是否还存在另一种 CH₃OH、

C₃H₉N 和 CH₃COOH 对甲烷氧化菌的抑制机制? 好氧甲烷氧化菌属于甲基营养细菌的一个分支,可分为 Type I 型和 Type II 型,较多研究表明,Type II 型甲烷氧化菌是酸性泥炭地中的优势类群(Hanson *et al.*, 1996; 余晨兴等,2011; 俞娟莉等,2013).闽江河口湿地土壤为酸性(pH=5.59),这暗示着其甲烷氧化菌优势类群可能为 Type II 型.甲基营养细菌能利用 CH₃OH 和 C₃H₉N 这类甲基物质进行生长,而且 Jeongdae 等(2011)发现,Type II 型甲烷氧化菌能利用 CH₃COOH 进行生长.依据这一理论,CH₃OH、C₃H₉N 和 CH₃COOH 这 3 种底物应该能促进甲烷氧化菌的生长,但本研究并没有得出类似结论,这个问题还有待进一步探索.

4.2 电子受体对沉积物 CH₄ 产生与氧化潜力的影响

闽江河口湿地受到河流与海洋周期性水文波动的影响,电子受体(包括 NO₃⁻、NO₂⁻、SO₄²⁻、Fe³⁺、Mn⁴⁺ 和腐殖酸等(Lovley *et al.*, 1996)较丰富.研究表明,5 种电子受体均能抑制 CH₄ 产生潜力,即电子受体的还原能力强于 CH₄ 产生菌的竞争力.电子受体的还原过程抑制 CH₄ 产生菌的活性(Raghoebarsing *et al.*, 2006; Beal *et al.*, 2009).NO₃⁻ 和 NO₂⁻ 抑制 CH₄ 产生潜力的同时也抑制其氧化潜力,且对氧化的抑制作用较强(图 2).Chidthaisong 等(2000)认为 NO₃⁻ 除了通过产生 NO₂⁻、NO 和 N₂O 毒害 CH₄ 产生菌,还会通过减少 CH₃COOH 和葡萄糖的产生来抑制 CH₄ 产生.研究发现,SO₄²⁻ 的添加对 CH₄ 产生潜力没有显著影响,但会抑制 CH₄ 氧化潜力.曾从盛等(2008)研究表明,SO₄²⁻ 的添加是减缓而非阻止 CH₄ 产生,抑制的程度取决于 SO₄²⁻ 浓度.柳铮铮(2009)通过原位模拟酸沉降对闽江河口短叶茼蒿湿地 CH₄ 排放的影响发现,增加 SO₄²⁻ 对 CH₄

排放的影响不显著;其室内培养实验表明,闽江口鳊鱼滩湿地沉积物中的 SO_4^{2-} 浓度已经超过饱和浓度,再增加 SO_4^{2-} 并不会增加其还原的速率,与本研究结果一致.本研究中的半咸水芦苇沼泽湿地沉积物的 SO_4^{2-} 浓度 ($456.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表 1) 介于 Segarra 等(2013)研究河口盐-淡水湿地沉积物中咸水湿地 ($709.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和淡水湿地 ($38.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 沉积物 SO_4^{2-} 浓度之间,但本研究的 CH_4 氧化潜力 ($4.25 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) 比咸水湿地 ($6.5 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) 和淡水湿地 ($17.2 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) 的 CH_4 氧化潜力要低. CH_4 氧化对 SO_4^{2-} 响应的差异可能还与沉积物中的 NO_3^- 、 Fe^{3+} 和 Mn^{4+} 等耦合作用有关 (Segarra *et al.*, 2013). 研究表明, Fe^{3+} 的添加会抑制 CH_4 产生并促进 CH_4 氧化,其结果可能会减少 CH_4 排放通量(表 2),这与 Lipson 等(2013)对高纬度的沼泽湿地的研究结果相似.王维奇等(2013)通过对水稻田施加铁炉渣的实验表明,铁炉渣的施加可降低 CH_4 产生和排放通量,提高 CH_4 氧化量,其作用机制主要包括: Fe^{3+} 将底物的浓度降低到产甲烷菌不能利用的程度, Fe^{3+} 将氧化还原电位提高到了超过产甲烷菌的适应范围, Fe^{3+} 对产甲烷菌的毒害作用,以及 Fe^{3+} 的还原菌组群与产甲烷菌竞争 CH_3COOH 和电子供体.此外, Fe^{3+} 较高的环境易于形成较高的胡敏酸 (Lipson *et al.*, 2013) 和较低 E_h 环境 (Le Mer *et al.*, 2001), 进而影响微生物和土壤酶的活性.本研究还发现, Mn^{4+} 的添加与 Fe^{3+} 相似,均促进 CH_4 氧化潜力,但 Mn^{4+} 的添加对 CH_4 产生潜力没有显著影响(表 2). 当 Mn^{4+} 的添加量达到 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,已经显著促进 CH_4 氧化潜力;但随着添加量的增加, CH_4 氧化潜力并没有显著性差异. Beal 等(2009)的研究认为, CH_4 氧化过程利用 Mn^{4+} 和 Fe^{3+} 作为电子受体,即 CH_4 氧化分别耦联 Mn^{4+} 和 Fe^{3+} 的还原.此外,可能 Mn^{4+} 刺激了甲烷氧化菌的活性,但甲烷氧化菌其本身对 Mn^{4+} 并没有偏好性.

4.3 营养物质对沉积物 CH_4 产生与氧化潜力的影响

河口湿地是一个高效的营养物汇集场所 (Odum *et al.*, 2009), NH_4^+ 、 PO_4^{3-} 和 Fe^{2+} 对 CH_4 产生和氧化的影响相对于底物与电子受体更为复杂,它们对 CH_4 产生和氧化二者综合结果会促进 CH_4 排放通量(表 2). NH_4^+ 输入对闽江口湿地沉积物的 CH_4 产生潜力表现为抑制作用,这与姜欢欢等(2012)对黄河口潮滩湿地沉积物 CH_4 产生潜力的研究结果不同.

受外源营养物质过量输入的影响,本研究沉积物中固有的 NH_4^+ 含量 ($182.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 较高,会抑制产甲烷菌活性.而黄河口碱蓬 (*Suaeda salsa*) 盐沼和光滩的沉积物中固有的 NH_4^+ (碱蓬盐沼: $4.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 光滩: $3.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 不能完全满足产甲烷菌的需要, NH_4^+ 的输入为产甲烷菌提供了生长所必需的氮源,故促进了 CH_4 产生潜力.葛瑞娟等(2010)通过对三江平原小叶章 (*Deyeuxia angustifolia*) 的盆栽施 N 试验和牟晓杰等(2012)通过对闽江口湿地短叶荇荇原位施 N 试验发现,适量的 NH_4^+ 在短时间内可促进土壤 CH_4 排放.研究表明, NH_4^+ 输入对闽江河口湿地 CH_4 排放通量的影响主要通过抑制 CH_4 氧化的途径,最终达到促进 CH_4 排放.酸性土壤的甲烷氧化效率远低于 pH 为 6.5 ~ 8.5 的土壤环境 (Sylväsalo *et al.*, 2006; Weslien *et al.*, 2009), NH_4^+ 的输入会抑制 Type II 型甲烷氧化菌 (Yang *et al.*, 2011), 因此, NH_4^+ 输入会抑制以 Type II 型甲烷氧化菌为主的闽江口的 CH_4 氧化潜力.此外, NH_4^+ 抑制 CH_4 氧化的机制还包括:通过增加硝化细菌的数量而抑制甲烷氧化菌的生长及活性; NH_4^+ 氧化过程中代谢产物 (NO_2^-) 对 CH_4 营养菌产生毒害作用;盐效应引起甲烷氧化菌生理缺水;土壤 NH_4^+ -N 周转作用 (丁维新等, 2001; 牟晓杰等, 2012). 此外,闽江口湿地沉积物的 CH_4 产生潜力对 PO_4^{3-} 输入的不敏感,可能是因为产甲烷菌对 PO_4^{3-} ($5 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 不敏感.低含量的 PO_4^{3-} 对 CH_4 氧化潜力起抑制作用,可能源于其盐效应抑制甲烷氧化菌的机制. Fe^{2+} 的输入对 CH_4 产生潜力起微弱的促进作用,促进作用随添加量的变化不大,而对 CH_4 氧化潜力没有显著影响.可能是因为 Fe^{2+} 的添加能刺激产甲烷菌的活性,促进 CH_4 产生,但产甲烷菌及甲烷氧化菌对 Fe^{2+} 并没有偏好性.此外,在野外环境中, NH_4^+ 、 PO_4^{3-} 和 Fe^{2+} 的输入将会促进植物的生长,对植物生物量、根系物质的泌氧和增加底物等,以及对 CH_4 的产生、氧化、传输和排放起重要影响.

为了探究某一种外源物质对 CH_4 产生和氧化的影响,本研究只做了单一物质添加的实验,并没有进行多种物质交互添加的实验.事实上,野外中各种外源物质都同时存在,共同影响着河口湿地 CH_4 的产生和氧化.如 Segarra 等(2013)的研究表明, SO_4^{2-} 能耦合 NO_3^- 、 Fe^{3+} 和 Mn^{4+} 进行硫酸盐还原,其耦合还原能力大于其他电子受体和可选择底物之间的耦合还原作用.在今后的研究中应重点开展多种物质

交互添加对河口湿地 CH_4 产生和氧化潜力的影响。

5 结论 (Conclusions)

闽江口半咸水芦苇沼泽湿地沉积物 CH_4 产生和氧化潜力对多种外源物质添加的响应实验结果表明:大部分外源物质(除 Fe^{3+} 、 Mn^{4+} 和 Fe^{2+} 外)的输入均会抑制河口湿地沉积物的 CH_4 氧化。 CH_3OH 、 $\text{C}_3\text{H}_9\text{N}$ 和 Fe^{2+} 的添加对 CH_4 产生起促进作用, NO_3^- 、 NO_2^- 、 Fe^{3+} 和 NH_4^+ 的添加作用与之相反, CH_3COOH 、 SO_4^{2-} 、 Mn^{4+} 和 PO_4^{3-} 对 CH_4 产生的影响不显著。 CH_4 产生和氧化对 CH_3COOH 、 CH_3OH 、 $\text{C}_3\text{H}_9\text{N}$ 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、 PO_4^{3-} 和 Fe^{2+} 输入的综合响应结果是增加 CH_4 排放通量, Fe^{3+} 和 Mn^{4+} 输入的综合作用会减少 CH_4 排放通量。

致谢 (Acknowledgement): 本研究在野外采样过程中得到了福建师范大学亚热带湿地研究中心杨平、贾宜、林德华和赵娜等的帮助,在室内空气样分析过程得到湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室杨柳明的帮助,在文章写作过程中得到了福建师范大学地理研究所全川教授的帮助,在此一并表示感谢。

责任作者简介: 曾从盛 (1954—), 男, 博士生导师, 研究员, 主要研究方向为湿地生物地球化学循环、生态-地理过程与功能。

参考文献 (References):

Andrews S, Schultz R, Frey S, *et al.* 2013. Plant community structure mediates potential methane production and potential iron reduction in wetland mesocosms [J]. *Ecosphere*, 4 (4), doi: 10.1890/ES12-00314.1

Beal E J, House C H, Orphan V J. 2009. Manganese- and iron-dependent marine methane oxidation [J]. *Science*, 325 (5937): 184-187

Bridgman S D, Megonigal J P, Keller J K, *et al.* 2006. The carbon balance of North American wetlands [J]. *Wetlands*, 26 (4): 889-916

Bridgman S D, Cadillo-Quiroz H, Keller J K, *et al.* 2013. Methane emissions from wetlands: biogeochemical, microbial, and modeling perspectives from local to global scales [J]. *Global Change Biology*, 19 (5): 1325-1346

Chidthaisong A, Conrad R. 2000. Turnover of glucose and acetate coupled to reduction of nitrate, ferric iron and sulfate and to methanogenesis in anoxic rice field soil [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 31 (1): 73-86

丁维新, 蔡祖聪. 2001. 氮肥对土壤氧化大气甲烷影响的机制 [J]. *农村生态环境*, 17 (3): 30-34

Eriksson T, Öquist M G, Nilsson M B. 2010. Production and oxidation of methane in a boreal mire after a decade of increased temperature and

nitrogen and sulfur deposition [J]. *Global Change Biology*, 16 (7): 2130-2144

高君颖. 2012. 闽江河口芦苇湿地土壤甲烷产生与氧化潜力研究 [D]. 福州: 福建师范大学. 13-14

葛瑞娟, 宋长春, 杨桂生, 等. 2010. 氮输入对三江湿地小叶章不同生长阶段土壤产生 CH_4 能力的影响 [J]. *环境科学学报*, 30 (10): 2070-2077

国家海洋局. 2013. 2013 年中国海洋环境状况公报 [R/OL]. http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygh/zghyhjzlg/201403/t20140324_31065.html

Hanson R S, Hanson T E. 1996. Methanotrophic bacteria [J]. *Microbiological Reviews*, 60 (2): 439-471

Im J, Lee S W, Yoon S, *et al.* 2011. Characterization of a novel facultative *Methylocystis* species capable of growth on methane, acetate and ethanol [J]. *Environmental Microbiology Reports*, 3 (2): 174-181

IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [R]. TS17. Cambridge, United Kingdom + New York, NY, USA: Cambridge University Press

姜欢欢, 孙志高, 王玲玲, 等. 2012. 黄河口潮滩湿地土壤甲烷产生潜力及其对有机物和氮输入响应的初步研究 [J]. *湿地科学*, 10 (4): 451-458

Kaku N, Ueki A, Ueki K, *et al.* 2005. Methanogenesis as an important terminal electron accepting process in estuarine sediment at the mouth of Orikasa River [J]. *Microbes and Environments*, 20 (1): 41-52

Le Mer J, Roger P. 2001. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review [J]. *European Journal of Soil Biology*, 37 (1): 25-50

Lipson D, Miller K, Lai C. 2013. Methane Suppression: The Impacts of Fe (III) and Humic Acids on Net Methane Flux from Arctic Tundra Wetlands in Alaska and Finland [R]. B32C-02. San Diego, CA, USA: American Geophysical Union

柳铮铮. 2009. 酸沉降对闽江河口湿地 CH_4 产生排放和碳输出的影响 [D]. 福州: 福建师范大学. 31-36

Lovley D R, Coates J D, Blunt-Harris E L, *et al.* 1996. Humic substances as electron acceptors for microbial respiration [J]. *Nature*, 382 (6590): 445-448

Lyimo T J, Pol A, Op Den Camp H J M. 2002. Sulfate reduction and methanogenesis in sediments of Mtoni mangrove forest, Tanzania [J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 31 (7): 614-616

牟晓杰, 刘兴土, 全川, 等. 2012. 闽江河口短叶茳芩湿地 CH_4 和 N_2O 排放对氮输入的短期响应 [J]. *环境科学*, 33 (7): 2482-2489

Odum E P, Barrett G W. 2009. *生态学基础 (第 5 版)* [M]. 陆健健, 王伟, 王天慧, 等译. 北京: 高等教育出版社. 377

Raghoebarsing A A, Pol A, Van De Pas-Schoonen K T, *et al.* 2006. A microbial consortium couples anaerobic methane oxidation to denitrification [J]. *Nature*, 440 (7086): 918-921

Sakai S, Ehara M, Tseng I C, *et al.* 2012. *Methanolinea mesophila* sp. nov., a hydrogenotrophic methanogen isolated from rice field soil, and proposal of the archaeal family *Methanoregulaceae* fam. nov. within the

- order Methanomicrobiales [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 62(Pt 6): 1389-1395
- Segarra K E, Comerford C, Slaughter J, *et al.* 2013. Impact of electron acceptor availability on the anaerobic oxidation of methane in coastal freshwater and brackish wetland sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 115: 15-30
- 孙万龙, 孙志高, 孙文广, 等. 2014. 黄河口潮滩湿地土壤 CH₄ 氧化潜力及其对有机物输入响应[J]. *草业学报*, 23(1): 104-112
- 孙志高, 牟晓杰, 王玲玲. 2009. 滨海湿地生态系统 N₂O 排放研究进展[J]. *海洋环境科学*, 29(1): 159-164
- 余晨兴, 仝川. 2011. 自然湿地土壤产甲烷菌和甲烷氧化菌多样性的分子检测[J]. *生态学报*, 31(14): 4126-4135
- 余晨兴, 仝川. 2012. 闽江口芦苇沼泽湿地土壤产甲烷菌群落结构的垂直分布[J]. *生态学报*, 32(17): 5299-5308
- Sutula M, Day J, Cable J, *et al.* 2001. Hydrological and nutrient budgets of freshwater and estuarine wetlands of Taylor Slough in Southern Everglades, Florida (U.S.A) [J]. *Biogeochemistry*, 56(3): 287-310
- Syväsalo E, Regina K, Turtola E, *et al.* 2006. Fluxes of nitrous oxide and methane, and nitrogen leaching from organically and conventionally cultivated sandy soil in western Finland [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 113(1/4): 342-348
- 仝川, 陈重安, 黄佳芳. 2011. 河口沼泽土壤醋酸发酵途径产生的甲烷及基质添加对甲烷产生的刺激作用[J]. *湿地科学*, 9(4): 305-313
- 仝川, 黄佳芳, 王维奇, 等. 2012. 闽江口半咸水芦苇潮汐沼泽湿地甲烷动态[J]. *地理学报*, 67(9): 1165-1180
- 王维奇, 李鹏飞, 曾从盛, 等. 2013. 铁炉渣施加对稻田甲烷产生、氧化与排放的影响[J]. *生态学报*, 33(5): 1578-1583
- Wassmann R, Neue H U, Bueno C, *et al.* 1998. Methane production capacities of different rice soils derived from inherent and exogenous substrates [J]. *Plant and Soil*, 203(2): 227-237
- Weslien P, Kasimir Klemetsson, Börjesson G, *et al.* 2009. Strong pH influence on N₂O and CH₄ fluxes from forested organic soils [J]. *European Journal of Soil Science*, 60(3): 311-320
- Yang N, Lü F, He P J, *et al.* 2011. Response of methanotrophs and methane oxidation on ammonium application in landfill soils [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 92(5): 1073-1082
- 贡娟莉, 王艳芬, 张洪勋. 2013. 好氧甲烷氧化菌生态学研究进展[J]. *生态学报*, 33(21): 6774-6785
- 曾从盛, 王维奇, 仝川. 2008. 不同电子受体及盐分输入对河口湿地土壤甲烷产生潜力的影响[J]. *地理研究*, 27(6): 1321-1330
- 曾从盛, 张林海, 王天鹅, 等. 2012. 闽江河口湿地植物枯落物立枯和倒伏分解主要元素动态[J]. *生态学报*, 32(20): 6289-6299
- 曾从盛, 王维奇, 仝川. 2008. 不同电子受体及盐分输入对河口湿地土壤甲烷产生潜力的影响[J]. *地理研究*, 27(6): 1321-1330