

DOI: 10.5846/stxb201406201275

张子川, 杨平, 仝川. 盐分对河口淡水、微咸水沼泽湿地土壤甲烷产生潜力的影响. 生态学报, 2015, 35(24): - .

Zhang Z C, Yang P, Tong C. Effects of seawater and NaCl solution pulses on methane production potential from laboratory-incubated tidal freshwater and brackish marsh soil. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(24): - .

盐分对河口淡水、微咸水沼泽湿地土壤甲烷产生潜力的影响

张子川^{1,2}, 杨平^{1,2}, 仝川^{1,3,4,*}

1 湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室, 福州 350007

2 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

3 福建师范大学地理研究所, 福州 350007

4 福建师范大学亚热带湿地研究中心, 福州 350007

摘要:海平面上升导致河口区盐水入侵现象日益明显, 深刻影响着河口潮汐淡水、微咸水湿地生物地球化学循环。采集闽江河口区淡水、微咸水短叶荇草潮汐沼泽湿地表层土样, 室内添加盐度为 5, 10, 15, 21 ppt 的人造海水、NaCl 溶液及盐度为 0 的去离子水, 通过室内泥浆厌氧培养试验, 对比研究海水和 NaCl 溶液对淡水、微咸水沼泽湿地土壤甲烷产生潜力的影响。与对照相比, 1—12 d 培养期内 4 个盐度的海水处理均显著抑制河口淡水、微咸水沼泽湿地甲烷产生潜力, 抑制率在 93% 以上, 盐度 10—21 ppt 的 3 个海水处理对于河口淡水、微咸水沼泽湿地甲烷产生潜力的抑制效应无显著差异。NaCl 溶液只有在盐度达到 15 和 21 ppt 才显著抑制淡水、微咸水沼泽湿地甲烷产生潜力, 且抑制率最多为 80.9%, 盐度为 5、10 ppt 的 NaCl 溶液对淡水、微咸水沼泽湿地甲烷产生潜力的抑制作用不显著, 抑制率多小于 30%。伴随着盐水入侵而发生的硫酸盐还原作用及离子胁迫作用对河口淡水、微咸水沼泽湿地甲烷产生具有显著的抑制效应。

关键词:潮汐淡水沼泽; 潮汐微咸水沼泽; 盐水入侵; NaCl 溶液; 甲烷产生潜力; 闽江河口

Effects of seawater and NaCl solution pulses on methane production potential from laboratory-incubated tidal freshwater and brackish marsh soil

ZHANG Zichuan^{1,2}, YANG Ping^{1,2}, TONG Chuan^{1,3,4,*}

1 Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process of Ministry of Education, Fuzhou 350007, China

2 School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

3 Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

4 Research Centre of Wetlands in Subtropical Region, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: Sea level rise increases the frequency and intensity of saltwater intrusion events, and it affects the soil biogeochemical cycle in estuarine freshwater and brackish wetlands. A laboratory study measured the methane production potentials during from the topsoil of two freshwater *Cyperus malaccensis* marshes and two brackish *C. malaccensis* marshes during 12 days of incubation when exposed to varying salinities (0, 5, 10, 15, and 21 ppt of seawater or salt [NaCl] solutions). Seawater addition with a salinity range from 5 to 21 ppt induced a progressive suppression of methane production potentials. For all levels of salinity, except the freshwater control, more than 93% of methane production potential was inhibited, whereas there was no significant difference of suppression effects on methane production potentials upon the

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41371127); 福建师范大学校级创新团队项目(IRT1205); 福建师范大学地理科学学院研究生创新基金

收稿日期: 2014-06-20; 网络出版日期: 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tongch@fjnu.edu.cn

addition of seawater with a salinity range from 10 to 21 ppt. Ionic stress (represented by NaCl) reduced methane production potentials in both 15 and 21 ppt NaCl addition treatments; 5 and 10 ppt NaCl treatments did not significantly reduce methane production potentials (percentage of inhibition was less than 30%). Our results indicate that SO_4^{2-} reduction, not osmotic stress by chloride ions, is the main process suppressing methane production in estuarine freshwater and brackish marshes following seawater intrusion.

Key Words: Tidal freshwater marsh; tidal brackish marsh; saltwater intrusion; NaCl solution; methane production potential; Min River estuary

全球变暖引起的海平面上升已成为全球变化研究的一个重要领域。政府间气候变化专业委员会(IPCC)第四次评估报告指出,20世纪全球海平面上升约0.17 m,全球沿海地区盐水入侵(saltwater intrusion)加剧^[1]。海平面上升和河流淡水径流减少的综合效应导致一些河口的咸水-淡水混合区上溯,形成明显的盐水入侵,对河口潮汐淡水湿地和微咸水湿地生态系统产生潜在的、巨大的影响^[2]。

潮汐湿地位于河流与海洋交汇处,受河流径流和海洋潮汐作用共同影响。潮汐湿地按照盐度可分为潮汐淡水湿地(盐度<0.5‰)、潮汐寡盐淡水湿地(0.5‰<盐度<5.0‰, oligohaline)、潮汐中盐淡水湿地(5.0‰<盐度<18.0‰, mesohaline)和潮汐咸水湿地(18.0‰<盐度<35.0‰)^[3, 4]。寡盐和中盐淡水潮汐湿地也被统称为微咸水(或半咸水)(brackish)湿地^[5]。河口区盐度梯度下的潮汐沼泽湿地甲烷排放已有报道^[6, 7]。在海平面上升、盐水入侵加剧的背景下,研究河口潮汐湿地碳、氮生物地球化学循环、温室气体产生和排放等过程显得尤为重要。近年来,盐水入侵对于河口潮汐淡水沼泽湿地碳、氮生物地球化学循环的影响,日益引起科学家的关注^[8-11],伴随着盐水入侵带来大量的硫酸根(SO_4^{2-})。作为一个重要的电子受体,硫酸根可使河口区潮汐淡水沼泽湿地土壤产甲烷过程向硫酸盐还原过程转变,湿地土壤甲烷产生量和排放量短期内明显减少,这一现象已被一些研究证明^[8, 10]。盐水入侵同时也伴随着大量氯离子(Cl^-)输入,进而存在氯离子胁迫作用(电导率增加而引发渗透势的变化)。氯离子引发的离子胁迫可通过改变土壤-水体系电导率而影响土壤微生物种群^[12]。Baldwin等^[13]采用小型生态系统方法,向淡水湿地添加不同盐度NaCl溶液,结果显示甲烷产生速率明显减少。然而关于盐水入侵对河口潮汐淡水、微咸水沼泽湿地甲烷气体产生的影响及机制的了解仍相对较少,伴随着盐水入侵而增强的氯离子胁迫作用是否同样也对于河口区微咸水沼泽湿地甲烷的产生造成影响,还鲜见报道。本文以闽江河口区分布的潮汐淡水、微咸水短叶茳芏沼泽湿地土壤为研究对象,室内模拟海水和纯NaCl盐水入侵,以期揭示海水和NaCl盐水对河口淡水、微咸水沼泽湿地土壤甲烷产生潜力的影响,辨识伴随着海水入侵而增强的硫酸盐还原和氯离子胁迫在抑制河口淡水、微咸水沼泽湿地甲烷产生潜力方面的作用和贡献。

1 材料与方法

1.1 研究区和样地概况

闽江河口区从河口海滨段向上游方向依次分布有鳝鱼滩湿地、蝙蝠洲湿地、下洋洲湿地和塔礁洲湿地(图1)。鳝鱼滩湿地是闽江河口区面积最大潮汐湿地,短叶茳芏(*Cyperus malaccensis* Lam. var. *brevifolius* Bockl.)和芦苇(*Phragmites australis*)是鳝鱼滩湿地主要土著优势种,其中短叶茳芏沼泽集中分布于鳝鱼滩湿地中西部,并较接近堤岸一侧,表层土壤电导率为1.68—7.65 mS/cm(2011年10月至2012年6月,下同)。蝙蝠洲湿地受潮汐影响也较大,表层土壤电导率为1.26—3.27 mS/cm,同样短叶茳芏和芦苇是其主要优势植物。下洋洲湿地位于闽江北港河道与南港交汇处,地势低平,主要分布有短叶茳芏沼泽,表层土壤电导率为0.31—0.42 mS/cm。塔礁洲湿地的地势低洼处和边缘同样分布有短叶茳芏沼泽,表层土壤电导率为0.16—0.52 mS/cm。下洋洲和塔礁洲均为典型淡水潮汐湿地,分布在鳝鱼滩湿地近堤岸侧和蝙蝠洲湿地的短叶茳芏沼泽为微咸水潮汐沼泽。闽江河口区气候暖热湿润,年均降水日数153 d,年均降水量1346 mm,降水多发生

在 3—9 月。闽江河口段潮汐特征表现为口外正规半日潮,口内非正规半日浅海潮^[14]。

1.2 土样采集

在以上 4 个湿地分布的短叶茳芏沼泽采集土样,时间均在落潮后时段,2012 年 6 月 29 日采集鳝鱼滩和蝙蝠洲,6 月 30 日采集下洋洲和塔礁洲。在 4 个湿地分布的短叶茳芏群落典型地段,分别在与海岸线或河岸线平行的方向随机布设 3 个取样点(样点间约 5 m 间距),在每个取样点用不锈钢采样器随机采集数个表层(0—10 cm)土样并混合,混合后的土样放入塑料自封袋密封立刻运回实验室,4℃冷藏,以供开展甲烷产生潜力测定的厌氧培养实验和各项土壤理化指标的测定。土壤间隙水通过对土壤样品离心获得。

1.3 土壤和间隙水理化指标的测定

原位用 IQ150 便携式 pH/温度计(IQ Scientific Instruments, USA)测定土钻旁土壤(10 cm 深度)的 pH 值,原位用 2265FS 便携式电导计(Spectrum Technologies Inc., USA)测定土壤电导率,并以此表征土壤盐度^[15]。

土壤含水量和容重用烘干法测定,土壤质地采用激光粒度仪(Mastersizer-2000, 英国)测定,土壤水溶性有机碳(DOC)采用去离子水浸提并用 TOC 分析仪(TOC Vcph, Shimadzu, 日本)测定,土壤微生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸培养法^[16],土壤有机质采用重铬酸钾外加加热法测定^[17]。

采用离心法获得土壤间隙水样,间隙水用针头式过滤器过滤,并分装保存。间隙水中 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 NO_2^- 浓度采用连续流动分析仪(SKALAR San++, 荷兰)测定, SO_4^{2-} 和 Cl^- 浓度采用离子色谱仪(ICS-2100, 美国戴安公司)测定。

1.4 不同盐度的海水和 NaCl 盐水的配置

利用热带海水礁盐(Cnsic Marine Biotechnology CO., LTD)及去离子水配置出不同盐度(5, 10, 15 和 21 ppt)的“人造海水”^[18],分别称为 H5、H10、H15 和 H21;另外,用分析纯 NaCl 和去离子水配置出盐度分别为 5, 10, 15 和 21 ppt 的纯 NaCl 盐水,分别称 Y5、Y10、Y15 和 Y21,不同盐度“人造海水”和 NaCl 纯盐水中 SO_4^{2-} 和 Cl^- 浓度见表 1。不添加任何物质的去离子水作为对照,记为 CK。

表 1 不同盐度的人造海水和纯 NaCl 溶液中 SO_4^{2-} 和 Cl^- 浓度

Table 1 Concentrations of SO_4^{2-} and Cl^- of artificial seawater and NaCl solution used in experiment

组成 Component	H5	H10	H15	H21	Y5	Y10	Y15	Y21
Cl^- (mM)	71.36	165.87	215.00	362.89	83.85	173.90	261.65	375.33
SO_4^{2-} (mM)	3.28	7.00	9.22	16.10	BD	BD	BD	BD

BD: 低于检测水平

1.5 海水和纯盐水的添加及土壤甲烷产生潜力的测定

实验室厌氧培养法是目前最为普遍的甲烷产生潜力测定方法,厌氧环境主要通过氮气置换实现,土样用干土或鲜土配置成为泥浆^[19-20],本研究采用鲜土进行厌氧培养试验。对于鲜土样挑除根等杂物,过 2 mm 土筛,充分混合均匀,并分别取鲜土样 30 g,各放入 125 ml 培养瓶,分别加入以上 4 个盐度梯度的海水和纯盐水及对照去离子水,保持水土体积为 1:1,振荡形成泥浆。硅胶密封培养瓶并放入 30℃(采样原位温度)生化培养箱 2 d 恢复活性,然后进行无光照厌氧培养。培养瓶用氮气冲洗 3—5 min^[19],使培养瓶内保持厌氧环境,30℃下连续培养 12 d,每 3 d 为 1 个甲烷产生潜力计算时间段,分别记为 1—3 d, 4—6 d, 7—9 d 和 10—12 d,各时段每天用微型注射器抽取气样 2 ml,用气相色谱仪测定甲烷浓度,计算 1 个甲烷产生潜力。为保证培养

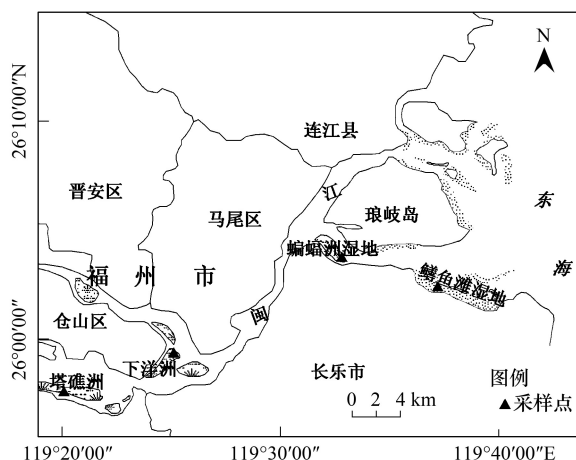


图 1 样地分布图

Fig. 1 Study area and sampling sites in the tidal marshes of the Min River estuary

瓶中气压稳定,每次抽取后补充等量氮气。为了防止培养瓶中积累甲烷过多而抑制甲烷产生,每培养 3 d 后洗气 1 次。

甲烷浓度采用气相色谱仪(岛津 GC-2010, 日本)测定,检测器为离子火焰化检测器(FID),载气为氮气,流速 20 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 130 ℃,分离柱温度为 60℃。培养瓶内土壤甲烷产生潜力计算公式^[19]:

$$P = \frac{dc}{dt} \cdot \frac{V_H}{W_s} \cdot \frac{MW}{WV} \cdot \frac{T_{st}}{T_{st} + T}$$

$P(\mu\text{g g}^{-1} \text{d}^{-1})$ 为甲烷产生潜力; $dc/dt(\mu\text{l l}^{-1} \text{d}^{-1})$ 为培养期间培养气室上部气相甲烷浓度变化率; $V_H(\text{L})$ 为培养气室上部气体体积; $W_s(\text{g})$ 为干土重; $MW(\text{g/mol})$ 为甲烷摩尔质量; MV 为标准状态下气体摩尔体积(22.4 l/mol); $T_{st}(\text{K})$ 为标准温度; $T(^\circ\text{C})$ 为培养温度。

1.6 数据处理

用 SPSS17.0 软件中多重方差分析(Least significant difference test of One-way ANOVA, LSD) 统计分析不同湿地各土壤理化指标以及不同盐度处理间甲烷产生潜力的差异显著性,显著性水平为 $P < 0.05$ 。用 Pearson 分析盐度等环境因子与甲烷产生潜力的相关性。

2 结果

2.1 土壤和间隙水的理化特征

4 个短叶荇菜湿地上层土壤容重和 DOC 浓度无显著差异,鳊鱼滩短叶荇菜湿地 SOC 含量显著低于其它 3 个湿地,然而土壤微生物量碳(MBC)含量显著高于其它 3 个湿地。粒径分布具有明显规律,沿着淡水至微咸水的盐度梯度,粉粒、粘粒逐渐增加,而砂粒含量却不断减少。pH 也是鳊鱼滩短叶荇菜湿地土壤最高(表 1)。4 个短叶荇菜湿地上层土壤间隙水 NH_4^+ 和 NO_2^- 浓度无显著性差异,鳊鱼滩和蝙蝠洲短叶荇菜湿地土壤间隙水 Cl^- 显著高于其它 2 个湿地。

表 2 各样地表层土壤的理化性质

Table 2 Top soil physicochemical characteristics of each sampling sites

采样点 Sampling site	容重 Bulk density/ (g/cm^3)	DOC/ (mg/kg)	SOC/ (g/kg)	MBC/ (mg/kg)	粘粒 Clay/%	粉粒 Silt/%	砂粒 Sand/%	电导率 Conductivity/ (mS/cm)	pH
鳊鱼滩	0.74±0.07 ^a	72.1±28.4 ^a	25.8±0.3 ^c	406.0±69.1 ^a	13.4±1.80 ^{ab}	70.2±1.86 ^a	16.4±3.06 ^c	1.97±0.54 ^a	6.68±0.03 ^a
蝙蝠洲	0.78±0.04 ^a	47.0±3.4 ^a	53.4±4.1 ^a	213.0±5.3 ^b	15.0±0.45 ^a	67.0±0.57 ^a	18.0±1.00 ^c	1.29±0.39 ^{ab}	5.58±0.06 ^b
下洋洲	0.78±0.01 ^a	69.9±20.1 ^a	37.2±1.9 ^b	209.1±10.5 ^b	12.3±0.08 ^a	63.0±0.63 ^b	24.7±0.70 ^b	0.42±0.03 ^b	4.51±0.03 ^b
塔礁洲	0.66±0.03 ^a	46.0±6.3 ^a	51.7±4.5 ^a	280.2±17.4 ^b	10.6±0.24 ^b	49.4±0.74 ^c	40.0±0.70 ^a	0.46±0.01 ^b	5.87±0.06 ^c

注:数据为平均值±标准误,同一列数据标注不同字母表示差异性显著, $P < 0.05$, $n = 3$ 。

表 3 各样地表层土壤间隙水离子的浓度

Table 3 Concentrations of ions in top soil pore water of each sampling sites

采样点 Sampling site	NH_4^+ / (mmol/L)	NO_2^- / (mmol/L)	NO_3^- / (mmol/L)	SO_4^{2-} / (mmol/L)	Cl^- / (mmol/L)
鳊鱼滩	0.18±0.07 ^a	3.36±0.60×10 ⁻⁴ ^a	4.40±0.83×10 ⁻⁴ ^b	3.28±1.42 ^a	45.87±18.13 ^a
蝙蝠洲	0.12±0.00 ^a	2.89±0.04×10 ⁻⁴ ^a	6.60±0.14×10 ⁻⁴ ^{ab}	0.42±0.10 ^a	9.83±1.06 ^b
下洋洲	0.18±0.04 ^a	3.03±0.06×10 ⁻⁴ ^a	10.74±0.82×10 ⁻⁴ ^a	0.06±0.00 ^a	1.70±0.23 ^c
塔礁洲	0.20±0.03 ^a	1.95±0.38×10 ⁻⁴ ^a	8.19±2.40×10 ⁻⁴ ^{ab}	0.04±0.02 ^a	1.64±0.19 ^c

数据为平均值±标准误,同一列数据标注不同字母表示差异性显著, $P < 0.05$, $n = 3$ 。

2.2 甲烷产生潜力随时间的变化

与对照相比,4 个盐度海水处理在 1—12 d 内均对鳊鱼滩微咸水短叶荇菜湿地土壤甲烷产生潜力产生显

著的抑制作用($P<0.05$),在第4—6 d, 7—9 d 和 10—12 d,盐度 5 ppt 海水处理的土壤甲烷产生潜力显著高于其它 3 个盐度海水处理的土壤甲烷产生潜力,但其它 3 个盐度海水处理下的土壤甲烷产生潜力无显著差异($P>0.05$)(图 2)。与对照比较,盐度 21 ppt 的 NaCl 溶液在 1—12 d 内对甲烷产生潜力造成显著的抑制作用,盐度 15 ppt 的 NaCl 溶液在第 4—6 d, 7—9 d 对甲烷产生潜力造成显著的抑制作用,盐度 5, 10 ppt 的 NaCl 溶液在 1—12 d 对甲烷产生潜力均没有显著地抑制甲烷产生潜力(图 2)。

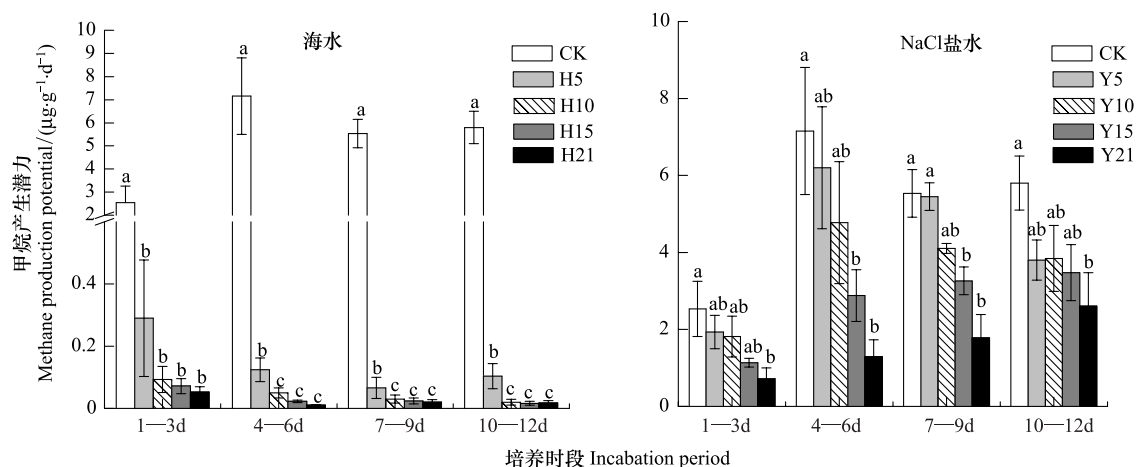


图 2 海水和 NaCl 盐水添加对鲢鱼滩短叶荇菜湿地甲烷产生潜力的影响(平均值±标准误)

Fig. 2 Effect of addition of seawater and NaCl solution on soil methane production potential of *C. malaccensis* marsh in the Shanyutan (Mean±SE)

对于蝙蝠州微咸水短叶荇菜湿地,与对照比较,4 个盐度的海水处理在 1—12 d 内均对甲烷产生潜力产生显著的抑制作用($P<0.05$),在第 4—6 d, 7—9 d 和 10—12 d,盐度 5 ppt 海水处理的土壤甲烷产生潜力显著高于其它 3 个盐度海水处理的土壤甲烷产生潜力,而其它 3 个盐度海水处理下的土壤甲烷产生潜力多无显著差异($P>0.05$)。除了在第 7—9 d,盐度 21 ppt 的 NaCl 溶液显著地抑制甲烷产生潜力,其余培养时段,各盐度 NaCl 溶液均没有显著地抑制甲烷产生潜力(图 3)。

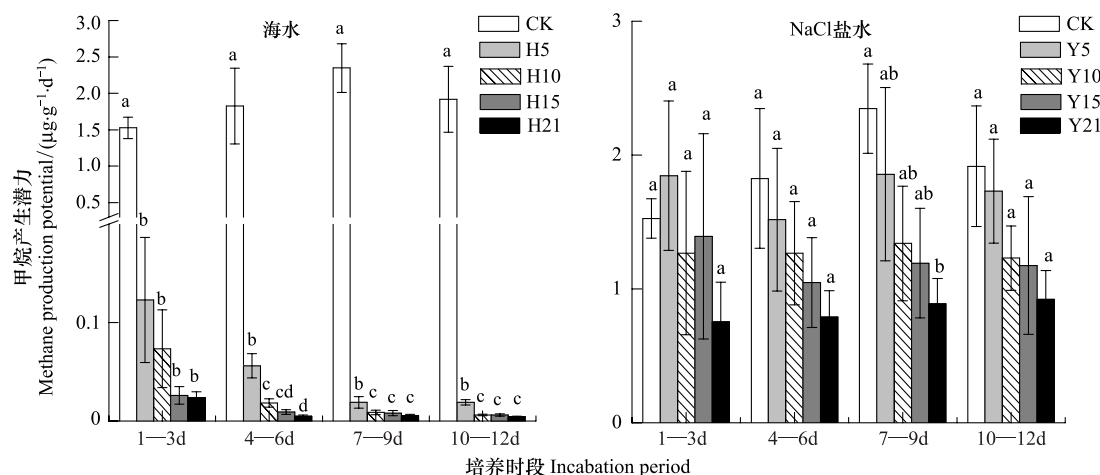


图 3 海水和 NaCl 盐水添加对蝙蝠州短叶荇菜湿地甲烷产生潜力的影响(平均值±标准误)

Fig. 3 Effect of addition of seawater and NaCl solution on soil methane production potential of *C. malaccensis* marsh in the Bianfuzhou (Mean±SE)

对于下洋洲淡水短叶荇菜湿地,与对照比较,4 个盐度的海水处理在 1—12 d 内均对甲烷产生潜力产生显著的抑制作用($P<0.05$),在第 4—6 d, 7—9 d 和 10—12 d,盐度 5 ppt 海水处理的土壤甲烷产生潜力显著高于其它 3 个盐度海水处理的土壤甲烷产生潜力,而其它 3 个盐度海水处理的土壤甲烷产生潜力多无显著性差异

著 ($P>0.05$)。与对照比较,盐度 21 ppt 的 NaCl 溶液在 1—12 d 内对甲烷产生潜力均造成显著的抑制作用,盐度 15 ppt 的 NaCl 溶液在第 4—6 d, 7—9 d 和 10—12 d 对甲烷产生潜力造成显著的抑制作用,盐度 10 ppt NaCl 溶液在第 4—6 d, 7—9 d 显著抑制甲烷产生潜力,盐度 5 ppt NaCl 溶液只在第 4—6 d 显著地抑制甲烷产生潜力(图 4)。

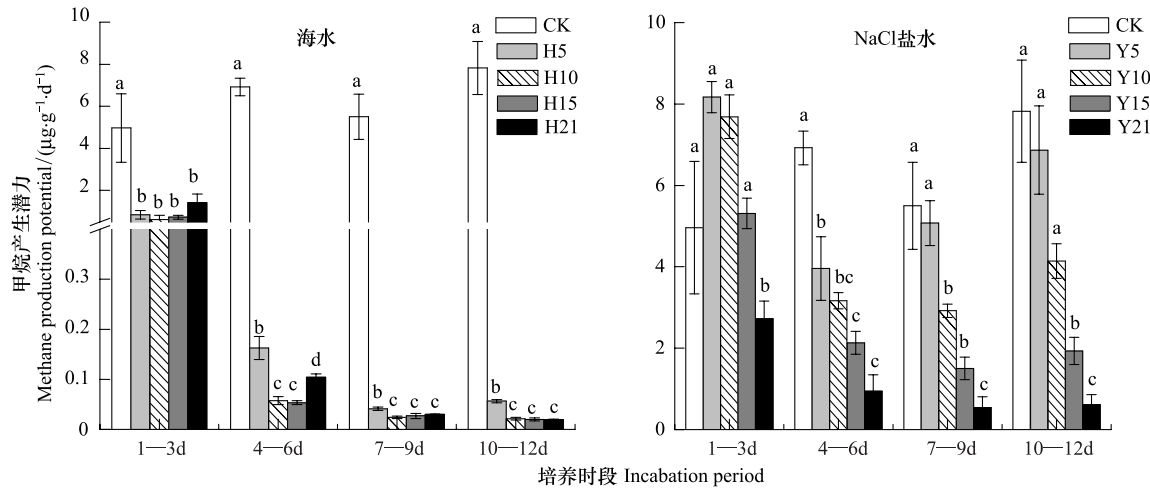


图 4 海水和 NaCl 盐水添加对下洋洲短叶荇菜湿地甲烷产生潜力的影响(平均值±标准误)

Fig. 4 Effect of addition of seawater and NaCl solution on soil methane production potential of *C. malaccensis* marsh in the Xiayangzhou (Mean±SE)

对于塔礁洲淡水短叶荇菜湿地,与对照比较,4 个盐度海水处理 1—12 d 内均对甲烷产生潜力产生显著的抑制作用 ($P<0.05$),在第 1—3 d, 4—6 d,盐度 5 ppt 海水处理下的土壤甲烷产生潜力显著高于其它 3 个盐度海水处理下的土壤甲烷产生潜力,在第 1—3 d, 4—6 d,盐度 21 ppt 海水处理的土壤甲烷产生潜力反而显著高于盐度 10 和 15 ppt 的海水处理 ($P<0.05$)。与对照比较,盐度 21 ppt NaCl 溶液在第 4—6 d, 7—9 d 和 10—12 d 对甲烷产生潜力均造成显著的抑制作用,盐度 15 ppt NaCl 溶液只在第 7—9 d 和 10—12 d 对甲烷产生潜力造成显著的抑制作用,盐度 10 ppt NaCl 溶液在第 7—9 d 显著抑制甲烷产生潜力,盐度 5 ppt NaCl 溶液在 1—12 d 内对甲烷产生潜力均未造成显著的抑制作用(图 5)。

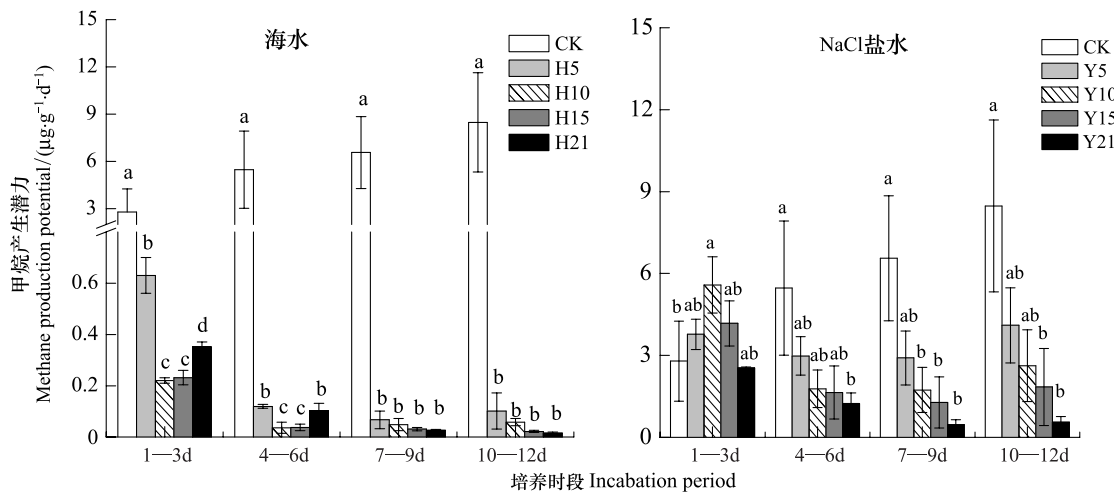


图 5 海水和 NaCl 盐水添加对塔礁洲短叶荇菜湿地甲烷产生潜力的影响(平均值±标准误)

Fig. 5 Effect of addition of seawater and NaCl solution on soil methane production potential of *C. malaccensis* marsh in the Tajiaozhou (Mean±SE)

2.3 海水和纯 NaCl 溶液对甲烷产生潜力的抑制率

相对海水处理,纯 NaCl 溶液对于潮汐淡水、微咸水沼泽湿地甲烷产生潜力的影响要小的多(图 6)。与对照组相比,鳝鱼滩短叶茳茳湿地只有盐度 15, 21 ppt NaCl 溶液显著抑制甲烷产生潜力,抑制率分别为 69.6% 和 43.7%,而盐度 5、10 ppt NaCl 盐水对甲烷产生潜力无显著抑制效应,抑制率仅分别为 17.3% 和 30.9%;对于蝙蝠州短叶茳茳湿地,只有盐度为 21 ppt NaCl 溶液显著抑制了甲烷产生潜力,而盐度 5, 10, 15 ppt NaCl 溶液对甲烷产生潜力均无显著抑制效应,盐度 5 ppt NaCl 溶液对甲烷产生潜力的抑制率仅为 8.7%;对于下洋州短叶茳茳湿地,同样只有盐度 15, 21 ppt NaCl 溶液显著抑制了甲烷产生潜力,而盐度 5, 10 ppt NaCl 溶液对甲烷产生潜力无显著抑制效应;对于塔礁州短叶茳茳湿地,4 个盐度的 NaCl 溶液对于甲烷产生潜力均具有显著的抑制作用(图 6)。

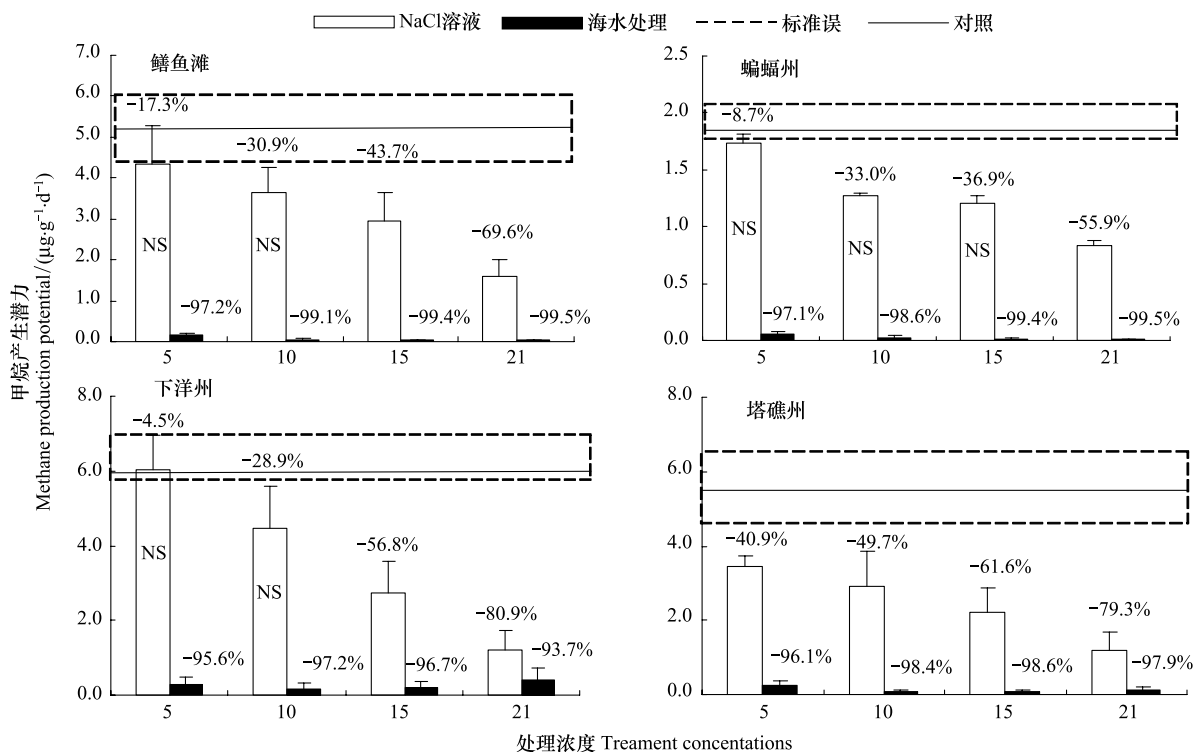
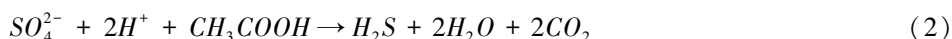


图 6 海水和 NaCl 溶液添加处理 12 天培养期短叶茳茳湿地土壤甲烷产生潜力均值, %代表与对照相比的下降百分比, 各盐度处理显著减少的比例 ($P < 0.05$), NS 代表无显著性差异

Fig. 6 Mean methane production potential of *C. malaccensis* marshes in the 12 days incubation period by the addition of seawater and NaCl solution. Percentages represent differences in mean methane production potential compared with the freshwater control ($P < 0.05$), NS = not significant

3 讨论与结论

硫酸盐还原与甲烷产生是有机底物厌氧矿化的 2 个重要终端氧化过程^[21]。湿地土壤产甲烷菌可利用底物醋酸产生甲烷,而硫酸盐还原菌可利用醋酸产生二氧化碳和硫化氢,并抑制湿地甲烷产生^[22]。醋酸发酵产甲烷及硫酸盐还原的化学反应式如下^[23]:



本研究 12 d 厌氧培养期间内,与对照组相比,4 个盐度的海水添加对于淡水、微咸水短叶茳茳湿地土壤甲烷产生潜力均具有显著的抑制作用,抑制率最高值(99.5%)发生在鳝鱼滩和蝙蝠州短叶茳茳湿地土壤遭受盐度为 21 ppt 模拟海水入侵,最低值(93.7%)发生在下洋州湿地土壤遭受盐度为 21 ppt 模拟海水的入侵(图 6)。

海水中的主要阴离子成分为氯离子和硫酸根离子(表1)。Weston 等^[8]和 Chambers^[11]的研究表明,湿地土壤厌氧环境中的硫酸盐还原菌对于底物的竞争能力远远超过产甲烷菌,伴随着海水入侵,可供硫酸盐还原菌利用的 SO_4^{2-} 浓度也随之升高,使潮汐淡水、微咸水沼泽湿地土壤产甲烷过程向硫酸盐还原作用过程转变,甲烷产生速率明显降低。Pattnaik 等^[24]向热带水稻田土样施加 NaCl , CaCl_2 和 MgSO_4 当量比为 3:2:1,电导率分别为 4, 8, 16 and 20 mS/cm 溶液,室内厌氧培养试验的结果表明,随着电导率的上升,对于非盐性水稻土甲烷产生的抑制效果也在持续增加,在培养试验的第 35 d,盐度为 20 mS/cm 的处理几乎完全抑制了甲烷的产生,盐度为 4 mS/cm 的处理对于甲烷产生的抑制率也超过 55 %。

综合分析图 2—5 表明,海水盐度只要达到 5 ppt 便可显著地抑制河口淡水、微咸水沼泽湿地的甲烷产生过程。此外,从第 4 d 开始,除塔礁州短叶荇菜湿地以外,盐度 10、15 和 21 ppt 的海水处理对于其它 3 个湿地土壤甲烷产生潜力的抑制效应显著高于盐度 5 的海水处理,这表明在盐度为 5—21 ppt 这一区间,盐度 10 ppt 是海水入侵并影响淡水、微咸水沼泽湿地甲烷产生的一个重要的“拐点”,盐度超过 10 ppt 的海水的入侵对于河口淡水、微咸水沼泽湿地甲烷产生的抑制效用显著高于盐度不足 10 ppt 的海水的入侵,而盐度范围在 10—21 ppt 之间的海水入侵对于河口淡水、微咸水沼泽湿地甲烷产生的抑制效果并无差异。

盐度 5 ppt NaCl 溶液并没有显著抑制甲烷产生潜力,甚至盐度 10 ppt NaCl 溶液也不显著抑制甲烷产生潜力(塔礁州除外),只有盐度达到 15 ppt 以上, NaCl 溶液才显著抑制甲烷产生潜力(蝙蝠州除外),以上结果表明, Cl^- 对于湿地土壤甲烷产生的抑制作用只在高的 NaCl 浓度时才发生。Chambers 等^[18]在 3 周的淡水湿地土样室内泥浆培养并模拟盐水入侵试验中,也发现添加 NaCl 计量分别为 5 g/kg 和 14 g/kg 处理与对照组比较差异并不显著,只有 35 g/kg 处理时才显著降低甲烷产生潜力。Baldwin 等^[13]研究也表明,高浓度的 NaCl 溶液抑制淡水湿地土壤中醋酸发酵型产甲烷菌,这也有助于解释本研究中只有盐度 15, 21 ppt NaCl 溶液才显著抑制甲烷产生潜力的实验结果。因此可以推测,相对于 Cl^- 胁迫过程, SO_4^{2-} 还原作用对于甲烷产生过程的抑制作用明显。

本研究中 4 个盐度的模拟海水入侵对于微咸水和淡水潮汐湿地甲烷产生潜力的抑制效应十分接近,抑制效率保持在一个很高的范围(93.7 %—99.5%)。但是, NaCl 溶液对潮汐微咸水和淡水湿地甲烷产生潜力的抑制效应并不完全相同,当盐度为 10 ppt 时, NaCl 溶液对塔礁州淡水潮汐湿地土壤甲烷产生潜力的抑制效应大于微咸水潮汐湿地(鳊鱼滩和蝙蝠州);当盐度为 15 和 21 ppt 时, NaCl 溶液对淡水潮汐湿地(下洋州和塔礁州)土壤甲烷产生潜力的抑制效应大于微咸水潮汐湿地(鳊鱼滩和蝙蝠州)。淡水潮汐沼泽湿地甲烷产生潜力对于 NaCl 溶液添加的响应更敏感,微咸水潮汐湿地(鳊鱼滩和蝙蝠州)土壤间隙水中 Cl^- 离子浓度显著高于 2 个淡水潮汐湿地(表 2),可以推测其已遭受一定的氯离子胁迫影响,因而对于 NaCl 溶液添加而造成的氯离子胁迫作用具有一定的适应性。

对于模拟海水入侵处理,由图 2—图 5 可以看出,与对照比较,各时段不同盐度处理的土壤甲烷产生潜力均有所下降,与最初 1—3 d 培养期相比,之后 3 个时段(9 d)甲烷产生潜力下降的更明显,且各时段间没有明显差异。这一结果与 Chambers 等^[18]连续 3 周(每周测定一个甲烷产生速率)的模拟海水入侵淡水湿地的结果一致。在模拟海水入侵事件发生的前几天,即培养实验初期,泥浆中硫酸盐和甲烷产生底物(乙酸)含量均较高,硫酸盐还原对于土壤甲烷产生潜力表现出明显的抑制作用,然后随着时间的推移,后 3 个时段土壤甲烷产生潜力进一步下降且相近,推测可能是由于硫酸盐还原过程的抑制作用在最初 1—3 d 培养期已将土样中甲烷产生底物(乙酸等)大部分消耗掉,因此,后 3 个时段甲烷产生潜力明显下降,且无显著差异;或是由于随着培养时间的推移,硫酸盐还原抑制效应逐渐增强,并具有一定的持续性,这样虽然土样中仍有足够的甲烷产生底物,但基本是被硫酸盐还原过程所利用,甲烷产生受到程度更大的抑制,进而造成后 3 个时段土壤甲烷产生潜力显著下降,且无显著差异。

本研究应用土样泥浆厌氧培养试验,评价了不同盐度的海水和 NaCl 溶液对土壤电导率低于 2 mS/cm 的闽江河口区微咸水、淡水短叶荇菜沼泽湿地甲烷产生潜力影响的短期效应,研究发现:

(1) 盐度 5 ppt 海水添加处理即可显著地抑制闽江河口淡水、微咸水沼泽湿地甲烷产生潜力,抑制率在 93% 以上。

(2) NaCl 溶液只有盐度达到 15 和 21 ppt 才可显著抑制闽江河口淡水、微咸水沼泽湿地甲烷产生潜力,且抑制率最多为 80.9%,盐度为 5 和 10 ppt NaCl 溶液不显著抑制闽江河口淡水、微咸水沼泽湿地甲烷产生潜力,抑制率多小于 30%。

(3) 伴随着海水入侵而发生的硫酸盐还原作用及 Cl^- 离子胁迫作用对河口淡水、微咸水沼泽湿地甲烷产生具有显著的抑制效应。

本研究是在实验室运用厌氧培养实验,并模拟海水入侵开展盐分对河口潮汐淡水和微咸水沼泽湿地土壤甲烷产生潜力影响的研究,今后应加强原位模拟试验,把室内培养实验与野外原位实验相结合,更科学和全面地评估海水入侵对于河口潮汐淡水沼泽湿地土壤甲烷产生和排放的影响。

致谢:本研究在野外采样中得到福建师范大学湿地研究团队的章文龙、徐辉和万斯昂等同学大力协助,在此表示感谢。

参考文献 (References):

- [1] IPCC. Climate Change: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge-New York: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Knowles N. Natural and management influences on freshwater inflows and salinity in the San Francisco Estuary at monthly to interannual scales. *Water Resources Research*, 2002, 38(12): 25-1-25-11, .
- [3] Odum W E. Comparative ecology of tidal freshwater and salt marshes. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1988, 19(1): 147-176.
- [4] McLusky D S. Marine and estuarine gradients-an overview. *Netherland Journal of Aquatic Ecology*, 1993, 27(2-4): 489-493.
- [5] Barendregt A, Whigham D F, Meire P, Baldwin A H, van Damme S. Wetlands in the tidal freshwater zone. *Wetlands: Functioning, Biodiversity Conservation, and Restoration*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006, 191: 117-148.
- [6] DeLaune R D, Smith C J, Patrick Jr W H. Methane release from Gulf coast wetlands. *Tellus B*, 1983, 35(1): 8-15.
- [7] Bartlett K B, Bartlett D S, Harriss R C, Sebacher D I. Methane emissions along a salt marsh salinity gradient. *Biogeochemistry*, 1987, 4(3): 183-202.
- [8] 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 (2005—2012)*, 2006, 111 (G1): G01009, doi: 10.1029/2005JG000071.
- [9] Weston N B, Vile M A, Neubauer S C, Velinsky D J. Accelerated microbial organic matter mineralization following salt-water intrusion into tidal freshwater marsh soils. *Biogeochemistry*, 2011, 102(1-3): 135-151.
- [10] Neubauer S C. Ecosystem responses of a tidal freshwater marsh experiencing saltwater intrusion and altered hydrology. *Estuaries and Coasts*, 2013, 36(3): 491-507.
- [11] Chambers L G, Osborne T Z, 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(1-3): 363-383.
- [12] Frankenberger W T, Bingham F T. Influence of salinity on soil enzyme activities. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, 46(6): 1173-1177.
- [13] Baldwin D S, Rees G N, Mitchell A M, Watson G, Williams J. The short-term effects of salinization on anaerobic nutrient cycling and microbial community structure in sediment from a freshwater wetland. *Wetlands*, 2006, 26(2): 455-464.
- [14] 刘剑秋, 曾从盛, 陈宁. 闽江河口湿地研究. 北京: 科学出版社, 2006.
- [15] 王玲玲, 孙志高, 牟晓杰, 孙万龙, 宋红丽, 姜欢欢. 黄河口滨岸潮滩湿地 CO_2 , CH_4 和 N_2O 通量特征初步研究. *草业学报*, 2011, 20(3): 51-61.
- [16] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703-707.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.

- [18] Chambers L G, Reddy K R, Osborne T Z. Short-term response of carbon cycling to salinity pulses in a freshwater wetland. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(5): 2000-2007.
- [19] Wassmann R, Neue H U, Bueno C, Lantin R S, Alberto M C R, Buendia L V, Bronson K, Papen H, Rennenberg H. Methane production capacities of different rice soils derived from inherent and exogenous substrates. *Plant and Soil*, 1998, 203(2): 227-237.
- [20] Bergman I, Klarqvist M, Nilsson M. Seasonal variation in rates of methane production from peat of various botanical origins: effects of temperature and substrate quality. *FEMS Microbiology Ecology*, 2000, 33(3): 181-189.
- [21] Struchtemeyer C G, Elshahed M S, Duncan K E, McInerney M J. Evidence for acetoclastic methanogenesis in the presence of sulfate in a gas condensate-contaminated aquifer. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, 71(9): 5348-5353.
- [22] Oremland R S, Polcin S. Methanogenesis and sulfate reduction: competitive and noncompetitive substrates in estuarine sediments. *Applied and Environmental Microbiology*, 1982, 44(6): 1270-1276.
- [23] van der Gon H A D, van Bodegom P M, Wassmann R, Lantin R S, Metra-Corton T M. Sulfate-containing amendments to reduce methane emissions from rice fields: mechanisms, effectiveness and costs. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2001, 6(1): 71-89.
- [24] Pattnaik P, Mishra S R, Bharati K, Mohanty S R, Sethunathan N, Adhya T K. Influence of salinity on methanogenesis and associated microflora in tropical rice soils. *Microbiological Research*, 2000, 155(3): 215-220.