

DOI: 10.5846/stxb201707011184

张逸飞, 刘小慧, 杨平, 黄佳芳, 郭谦谦, 全川. 模拟  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降对闽江口淡水感潮野慈姑湿地甲烷排放通量的影响. 生态学报, 2018, 38(13): - .  
Zhang Y F, Liu X H, Yang P, Huang J F, Guo Q Q, Tong C. Effects of simulated sulfate deposition on methane flux from a *Sagittaria trifolia*-dominated freshwater tidal wetland in the Min River estuary. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(13): - .

## 模拟 $\text{SO}_4^{2-}$ 沉降对闽江口淡水感潮野慈姑湿地甲烷排放通量的影响

张逸飞<sup>1</sup>, 刘小慧<sup>1</sup>, 杨平<sup>1</sup>, 黄佳芳<sup>1,2,3</sup>, 郭谦谦<sup>1</sup>, 全川<sup>1,2,3\*</sup>

1 福建师范大学地理科学学院, 福建 福州 350007

2 湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室, 福建 福州 350007

3 福建师范大学亚热带湿地研究中心, 福建 福州 350007

**摘要:** 2015 年 12 月—2016 年 10 月, 每月小潮日原位定期向闽江口塔礁洲淡水感潮野慈姑 (*Sagittaria trifolia* L.) 湿地施加剂量为 60、120 kg S  $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$  的  $\text{K}_2\text{SO}_4$  溶液 (分别记做 S-60 和 S-120), 探讨模拟硫酸根 ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) 沉降对河口淡水感潮湿地甲烷 ( $\text{CH}_4$ ) 排放通量及间隙水  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度的影响。对照、S-60 和 S-120 处理组  $\text{CH}_4$  排放通量年均值分别为  $(7.88 \pm 1.00) \text{ mg h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 、 $(6.55 \pm 0.97) \text{ mg h}^{-1} \text{ m}^{-2}$  和  $(6.66 \pm 1.49) \text{ mg h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 。在年尺度上, 2 个高强度模拟  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降处理组均未显著降低闽江口淡水感潮野慈姑湿地  $\text{CH}_4$  排放通量 ( $P > 0.05$ ), 即高强度  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降不会对河口淡水感潮湿地  $\text{CH}_4$  排放通量产生类似于其对泥炭湿地和水稻田的显著抑制效应。在年尺度以及秋、冬季, 两个施加  $\text{K}_2\text{SO}_4$  溶液处理显著增加了野慈姑湿地 10 cm 深度土壤间隙水  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度。对于各个处理组, 温度较高的夏、秋季  $\text{CH}_4$  排放通量均显著高于温度相对较低的冬、春季 ( $P < 0.05$ )。不同处理组  $\text{CH}_4$  排放通量均与土壤温度呈显著正相关关系, 温度仍然是影响亚热带河口淡水感潮湿地  $\text{CH}_4$  排放通量的重要环境因子。

**关键词:**  $\text{CH}_4$  排放;  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降; 淡水感潮湿地; 野慈姑; 小潮日; 闽江河口

## Effects of simulated sulfate deposition on methane flux from a *Sagittaria trifolia*-dominated freshwater tidal wetland in the Min River estuary

ZHANG Yifei<sup>1</sup>, LIU Xiaohui<sup>1</sup>, YANG Ping<sup>1</sup>, HUANG Jiafang, GUO Qianqian<sup>1</sup>, TONG Chuan<sup>1,2,3\*</sup>

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

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

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

**Abstract:** Exogenous sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) resulting from human activity, can strongly influence the emission of methane ( $\text{CH}_4$ ) from wetland ecosystems. Previous studies have reported the suppression  $\text{CH}_4$  emissions of peatlands and paddies by cumulative  $\text{SO}_4^{2-}$  deposition in simulated acid rain conditions. However, very few studies have presented data on the effect of the addition of  $\text{SO}_4^{2-}$  on  $\text{CH}_4$  emissions in estuarine freshwater tidal wetlands. In this study, the effect of simulated deposition of  $\text{SO}_4^{2-}$  on the  $\text{CH}_4$  emissions was examined by manipulating  $\text{SO}_4^{2-}$  inputs to a *Sagittaria trifolia*-dominated freshwater tidal wetland in the Tajiaozhou area of the Min River estuary from December 2015 to October 2016. Monthly pulses of dissolved  $\text{K}_2\text{SO}_4$  were applied over one year at doses of 60 and 120 kg S  $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$  (abbreviated as S-60 and S-120, respectively), and  $\text{CH}_4$  fluxes were measured at regular intervals using a static chamber/gas chromatographic method. On the annual scale, the

基金项目: 福建省基本科研专项重点项目 (2014R1034-1), 国家自然科学基金资助项目 (41371127) 和福建师范大学校级创新团队项目 (IRTL1205) 资助

收稿日期: 2017-07-01; 网络出版日期: 2018-00-00

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

average CH<sub>4</sub> emissions from the control, S-60- and S-120-amended plots were 7.88±1.00, 6.55±0.97 and 6.66±1.49 mg h<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>, respectively. Thus, the two addition treatments did not significantly decrease the CH<sub>4</sub> emissions from *S. trifolia*-dominated freshwater tidal wetland, which is different from the effects of simulated SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> deposition on the CH<sub>4</sub> emissions from peatlands and paddies in other reports. The S-60 and S-120 treatments significantly increased the pore water SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> concentrations at a depth of 10 cm in the *S. trifolia* wetland at an annual scale as well as in autumn and winter. CH<sub>4</sub> emissions in summer and autumn were significantly higher than those in winter and spring. CH<sub>4</sub> emissions from the control, S-60- and S-120-amended plots demonstrated significant positive correlations with soil temperature. These results indicate that soil temperature is an important environmental factor affecting the temporal variation of CH<sub>4</sub> emission from a subtropical estuarine freshwater tidal wetland.

**Key Words:** CH<sub>4</sub> emission; SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> deposition; freshwater tidal wetland; *Sagittaria trifolia*; neap day; Min River estuary

大气中温室气体浓度增加引起的全球气候变暖是当前人类关注的重大科学问题<sup>[1]</sup>, 甲烷(CH<sub>4</sub>)作为影响地球辐射平衡的重要温室气体, 其在百年尺度内增温潜势约为 CO<sub>2</sub> 的 25 倍, 对温室效应的贡献率达 17%<sup>[1-2]</sup>。2015 年全球大气库 CH<sub>4</sub> 平均浓度达 1845±2 ppb, 相比工业革命前增加近 150%<sup>[2]</sup>。明晰不同生态系统 CH<sub>4</sub> 排放通量是全球变化研究的重要内容之一。湿地是大气中 CH<sub>4</sub> 的“天然释放源”, CH<sub>4</sub> 年排放量约 100—231 Tg, 占全球 CH<sub>4</sub> 排放总量的 20%—39%<sup>[3]</sup>。作为全球湿地的重要组成部分, 河口湿地 CH<sub>4</sub> 排放通量研究也受到较多的关注<sup>[4-6]</sup>。酸雨对于陆地和水生生态系统的影响普遍存在。近年来, 模拟硫沉降对泥炭湿地和水稻田的研究表明, 酸雨中硫酸根离子(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)可激发湿地土壤硫酸盐还原菌活性, 提升其与湿地土壤产甲烷菌竞争共同底物的能力, 进而降低湿地土壤 CH<sub>4</sub> 产生和湿地 CH<sub>4</sub> 排放<sup>[7-8]</sup>。Gauci 等<sup>[7-9]</sup>对苏格兰高原泥炭湿地和葡萄牙水稻田的研究发现, 硫沉降显著降低以上湿地 CH<sub>4</sub> 排放通量, 并初步估算可减少全球湿地 CH<sub>4</sub> 排放通量的 8%, 而这一数字将在 2030 年将达到 15%。SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 沉降对于河口、滨海感潮淡水或微咸水湿地 CH<sub>4</sub> 排放通量的影响鲜见报道, 仝川等<sup>[10]</sup>研究显示, 模拟 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 沉降对河口微咸水短叶茳茳湿地 CH<sub>4</sub> 排放通量基本无抑制作用。然而, 模拟 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 沉降对河口淡水感潮湿地 CH<sub>4</sub> 排放通量的影响还未见报道。

福建省酸雨降水 pH 值低, 且硫酸型酸雨较明显, 为我国酸雨影响较为严重的区域之一<sup>[11]</sup>。本研究于小潮日在闽江口塔礁洲淡水感潮野慈姑湿地开展原位模拟 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 沉降试验, 测定湿地 CH<sub>4</sub> 排放通量以及土壤间隙水理化指标, 以期揭示 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 沉降对河口淡水感潮湿地 CH<sub>4</sub> 排放通量及间隙水化学的影响, 探讨影响河口淡水感潮湿地 CH<sub>4</sub> 通量的主要环境因子, 为评估硫酸型酸雨对我国亚热带河口淡水感潮湿地 CH<sub>4</sub> 排放通量的影响提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于闽江口塔礁洲(119°18'29"—119°22'04"E, 25°58'03"—25°57'37"N)。闽江口属中亚热带与南亚热带海洋性季风气候的过渡地带, 气候温暖而湿润<sup>[12]</sup>, 降水充沛且多集中于 3—9 月。塔礁洲受潮汐作用显著, 表现为非正规的半日浅潮<sup>[10, 12]</sup>。塔礁洲面积约 878 hm<sup>2</sup>, 中间部分为居民点及农田, 洲四周主要由沙滩和泥滩组成, 其上分布的主要湿地植物有短叶茳茳(*Cyperus malaccensis*)及野慈姑(*Sagittaria trifolia* L)等。本研究选取位于塔礁洲南侧的淡水感潮野慈姑湿地(盐度: 0.10‰±0.4‰)为研究样地(图 1), 样地基本理化指标背景值和野慈姑群落特征见表 1。

### 1.2 样地布设及模拟 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 沉降处理

在塔礁洲南侧选取野慈姑长势良好、覆盖均匀, 且环境条件均一的地段随机布设 2 条与河岸平行的样带, 间距 2 m。样带一用于气样和间隙水样采集, 共布设 9 个 PVC 底座(长×宽×高: 35 cm×35 cm×40 cm), 底座埋

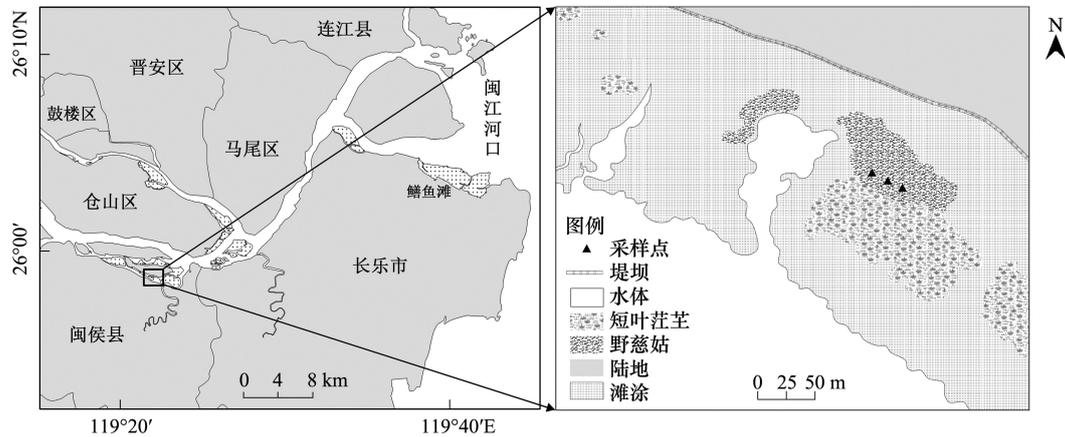


图 1 闽江河口塔礁洲研究样点位置示意图

Fig.1 Location of study site in the Tajiaozhou of the Min River estuary

深约 30 cm,顶部出露地表约 10 cm,各底座两两间距 50 cm,用以开展模拟  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降试验,包括 2 个模拟  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降处理组和 1 个对照组,每处理组 3 个重复。样带二用于土样采集,相同方法布设 9 个底座,并开展与样带一同样的  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降处理。为避免实验过程中人为干扰,在 2 个样带旁搭建简易木质栈桥便于采样。

表 1 研究样地土壤理化性质背景值及野慈姑群落特征

Table 1 Soil physical and chemical background value and feature of *S. trifolia* community of the sampling site

采样点 Sampling site	电导率 EC/ (mS/cm)	pH	$\text{Cl}^-$ / (mg/kg)	$\text{SO}_4^{2-}$ / (mg/kg)	含水率 Water content/%	粒径 Particle size/%		
						黏粒 Clay	粉粒 Powder	砂粒 Sand
塔礁洲 Tajiaozhou	0.26—0.41	4.54—4.94	24.03—24.83	74.92—90.71	54.25—58.90	9.85—12.02	46—52.75	36.36—42.87
采样点 Sampling site	TC/ (g/kg)	TN/ (g/kg)	植株均高 Plant height/ m	植株密度 Plant density/ (株/m <sup>2</sup> )	容重 Bulk density/ (g/cm <sup>3</sup> )	生物量 Biomass/(kg/m <sup>2</sup> )		
						地上 Above ground	地下 Below ground	
塔礁洲 Tajiaozhou	17.05—20.54	1.52—1.83	0.4—0.5	18—25	0.54—0.61	0.09—0.16	0.17—0.37	

根据世界范围内酸雨影响区硫沉降负荷的一般区间(25—100 kg  $\text{SO}_4^{2-}$ -S  $\text{hm}^{-2}$ )<sup>[8]</sup>,及 2005—2007 年福建省降水中  $\text{SO}_4^{2-}$ -S 年均沉降量(26 kg  $\text{SO}_4^{2-}$ -S  $\text{hm}^{-2}$ )<sup>[11]</sup>,按照高输入量的原则,向 2 个处理组分别添加 60、120 kg S  $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$  的  $\text{K}_2\text{SO}_4$  溶液(分别记为 S-60、S-120),对照组记为 CK。2015 年 12 月至 2016 年 10 月,每月定期向底座内施加  $\text{K}_2\text{SO}_4$  溶液,将各处理输入总量平分到 12 个月,每月每个 S-60 处理组施加 0.133 g  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,每个 S-120 处理组施加 0.267 g  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,对照组未施加  $\text{K}_2\text{SO}_4$  溶液。施加  $\text{K}_2\text{SO}_4$  溶液过程约为 30—40 min,以最大限度地保证  $\text{K}_2\text{SO}_4$  溶液下渗进入土壤。每月选定 2 个连续晴天小潮日作为溶液施加日,在退潮后地表无水淹时段进行  $\text{K}_2\text{SO}_4$  溶液施加,第 1 天仅施加  $\text{K}_2\text{SO}_4$  溶液,第 2 天则在施加  $\text{K}_2\text{SO}_4$  溶液后约 2—3 h 开始采集气样、间隙水样和土样。

### 1.3 $\text{CH}_4$ 的采集与测定

采用静态箱-气相色谱法对  $\text{CH}_4$  进行采集与测定<sup>[7-8]</sup>。静态箱由底座和顶箱(长×宽×高:35 cm×35 cm×50 cm)组成,顶箱侧面有抽气孔。顶箱合盖后用水密封底座凹槽,并即刻进行第 1 次采集,之后间隔 10 min 采集 1 次样品,共采集 4 次气样,每次采气 50 mL,分别注入铝箔气样袋(德林,大连)。采集样品立刻运回实验室,用 GC-2010 气相色谱仪(岛津,日本)测定气样中  $\text{CH}_4$  浓度,通过以下公式计算  $\text{CH}_4$  排放通量<sup>[7-8]</sup>:

$$F = \frac{M}{V} \cdot \frac{dc}{dt} \cdot H \cdot \left( \frac{273}{273 + T} \right)$$

式中, $F$  为  $\text{CH}_4$  的气体通量( $\text{mg h}^{-1} \text{m}^{-2}$ ); $M$  为  $\text{CH}_4$  摩尔质量( $\text{g/mol}$ ); $V$  为标准状态下气体摩尔体积; $dc/dt$  为单位时间  $\text{CH}_4$  的浓度变化率( $\text{CH}_4$  的浓度测量数据,仅在其线性回归系数  $R^2 > 0.9$  时有效); $H$  为顶箱箱高

( $m$ );  $T$  为气体收集箱箱温( $^{\circ}\text{C}$ )。

#### 1.4 间隙水采集与测定

2015 年 11 月,在样带一布设的底座内埋入土壤间隙水采集器<sup>[13-14]</sup>,采集土壤 10 cm 深度间隙水样。间隙水采集器为内径 5 cm 的 PVC 材质圆柱体,顶部加盖密封,底部 10 cm 处四周开有小孔。每月小潮日第 1 天在施加  $\text{K}_2\text{SO}_4$  溶液前抽干间隙水采集器内间隙水,第 2 天在采集气样后立刻采集间隙水水样,放入 50 mL 聚乙烯瓶中,立即带回实验室,过滤后在 2—3 天内测定各项指标。利用 ICS-2100 离子色谱仪(DIONEX, USA)测定水样中  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度。

#### 1.5 环境因子测定

与气样采集同步,使用便携式手持气象仪(Kestrel-3500, USA)测定离地 1.5 m 处气温、湿度和平均风速;利用便携式电导仪(2265FS, USA)原位测定样带一中各处理样地 10 cm 深度土壤温度、电导率(EC);同时采集样带二各底座内的土样(0—10 cm),经风干、磨碎后过 2 mm 筛,使用 pH 计(ST3100, USA)通过蒸馏水浸提法(水土质量比为 2.5:1)测定土壤 pH 值。

研究区野慈姑湿地本底土壤容重、含水率以及植物生物量分别于 2015 年 12 月及 2016 年 4 月、7 月、9 月测定。容重采用环刀法,含水率采用烘干法测定。植物生物量在样带中各底座间的野慈姑群落测定,地上生物量用样方齐地收割法(样方面积:50 cm $\times$ 50 cm, 4 个重复),地下根系用挖掘法,地上生物量和地下根系生物量均用水清洗、烘干至恒重测定。研究区野慈姑湿地本底土壤容重、含水率以及植物生物量见表 1。

#### 1.6 数据处理与分析

运用 Excel 2003 和 SPSS 18.0 统计分析软件对数据进行整理分析。采用双因素方差分析检验月份、模拟  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降处理及两者的交互作用对  $\text{CH}_4$  排放通量、间隙水土壤间隙水  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度及土壤理化指标的影响。 $\text{CH}_4$  排放通量与气象因子、土壤和土壤间隙水理化性质间的相关性利用 Pearson 相关法分析。运用 ArcGIS 10.2 制作研究区域概况图,Origin 8.0 软件进行数据制图。文中数据为平均值 $\pm$ 标准误。

## 2 结果与分析

### 2.1 模拟 $\text{SO}_4^{2-}$ 沉降对 $\text{CH}_4$ 排放通量的影响

图 2 为模拟  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降下各处理样地  $\text{CH}_4$  排放通量的月动态和季节变化。对于各处理组,温度较高的夏、秋季  $\text{CH}_4$  排放通量均显著高于温度相对较低的冬、春季(图 2),模拟  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降各处理样地  $\text{CH}_4$  排放通量月变化具有显著的差异(表 2)。CK、S-60 和 S-120 处理组  $\text{CH}_4$  排放通量变化范围分别介于(0.05 $\pm$ 0.02—33.17 $\pm$ 6.00)  $\text{mg h}^{-1} \text{m}^{-2}$ 、(0.21 $\pm$ 0.09—28.58 $\pm$ 0.09)  $\text{mg h}^{-1} \text{m}^{-2}$  和(0.09 $\pm$ 0.02—25.23 $\pm$ 5.51)  $\text{mg h}^{-1} \text{m}^{-2}$ ,平均值分别为(7.88 $\pm$ 1.00)  $\text{mg h}^{-1} \text{m}^{-2}$ 、(6.55 $\pm$ 0.97)  $\text{mg h}^{-1} \text{m}^{-2}$  和(6.66 $\pm$ 1.49)  $\text{mg h}^{-1} \text{m}^{-2}$ 。在年尺度上,3 种处理间无显著性差异( $P>0.05$ ),但月份与  $\text{SO}_4^{2-}$  处理交互作用对  $\text{CH}_4$  排放通量影响显著( $P<0.05$ )(表 2)。

表 2 模拟  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降处理和月份对野慈姑湿地  $\text{CH}_4$  排放通量的影响

Table 2 Effects of simulated  $\text{SO}_4^{2-}$  deposition and month on  $\text{CH}_4$  fluxes from the *S. trifolia* wetland

	冬季 Winter		春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn		年度 Year	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
处理 Treatment	2.414	$P>0.05$	0.267	$P>0.05$	1.499	$P>0.05$	1.567	$P>0.05$	1.856	$P>0.05$
月份 Month	8.194	$P>0.05$	63.61	$P<0.001$	33.12	$P<0.01$	59.71	$P<0.001$	34.519	$P<0.001$
处理 $\times$ 月份 Treatment $\times$ month	0.936	$P>0.05$	0.959	$P>0.05$	1.247	$P>0.05$	89.591	$P>0.05$	2.547	$P<0.05$

### 2.2 模拟 $\text{SO}_4^{2-}$ 沉降对土壤间隙水 $\text{SO}_4^{2-}$ 浓度的影响

模拟  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降各处理样地 10 cm 深度土壤间隙水  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度的月动态和季节动态如图 3 所示。CK、S-60 和 S-120 处理组间隙水  $\text{SO}_4^{2-}$  离子浓度均值分别为(9.01 $\pm$ 1.64)、(15.73 $\pm$ 1.37)  $\text{mg/L}$  和(16.61 $\pm$ 2.68)  $\text{mg/L}$ ;最高值分别为(13.34 $\pm$ 0.83)、(21.53 $\pm$ 2.94)  $\text{mg/L}$  和(26.71 $\pm$ 11.17)  $\text{mg/L}$ ,均出现在 12 月;最低值分别为(3.85 $\pm$

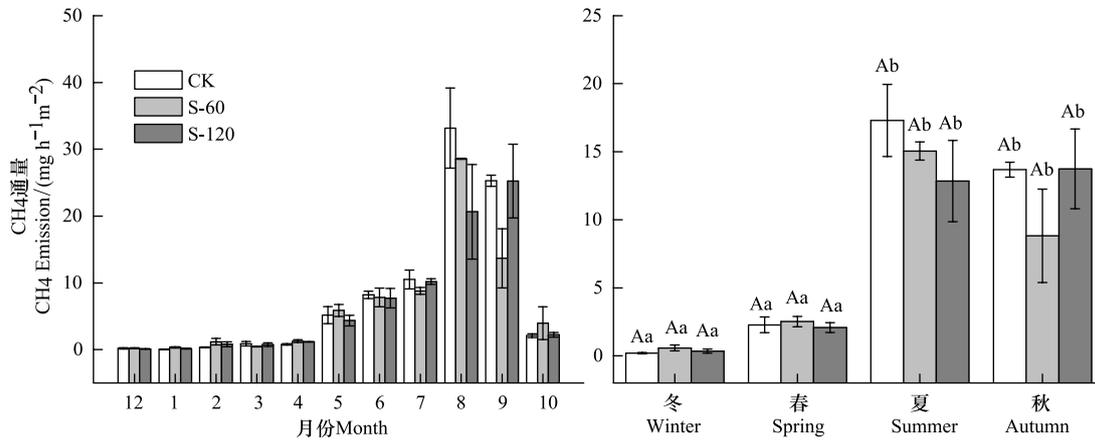


图 2 模拟 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 沉降情景下野慈姑湿地甲烷排放通量的月动态 (a) 和季节动态 (b)

Fig.2 Monthly and seasonal variations of CH<sub>4</sub> emission from the *S. trifolia* wetland with different simulated SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> deposition in the Tajiaozhou CK, 对照 control group; S-60, 60 kg S hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> 处理 60 kg S hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> treatment group; S-120, 120 kg S hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> 处理 120 kg S hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> treatment group. 不同大写字母代表同季节不同处理间差异性显著,不同小写字母代表同一处理不同季节差异性显著, (P<0.05)

0.49)、(10.28±0.08) mg/L 和 (4.94±1.31) mg/L, 分别出现在 5、4 和 6 月份。

CK 组和 S-60 处理组 4 个季节间隙水 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 浓度无差异 (P>0.05), S-120 处理组冬季间隙水 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 浓度显著高于春、夏季 (P<0.05) (图 2)。在年尺度以及秋、冬季两个节尺度上, 3 个处理间存在显著差异 (P<0.05) (表 3)。以上结果表明, 在年尺度以及秋、冬季, S-60 处理和 S-120 处理显著增加了间隙水 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 浓度。

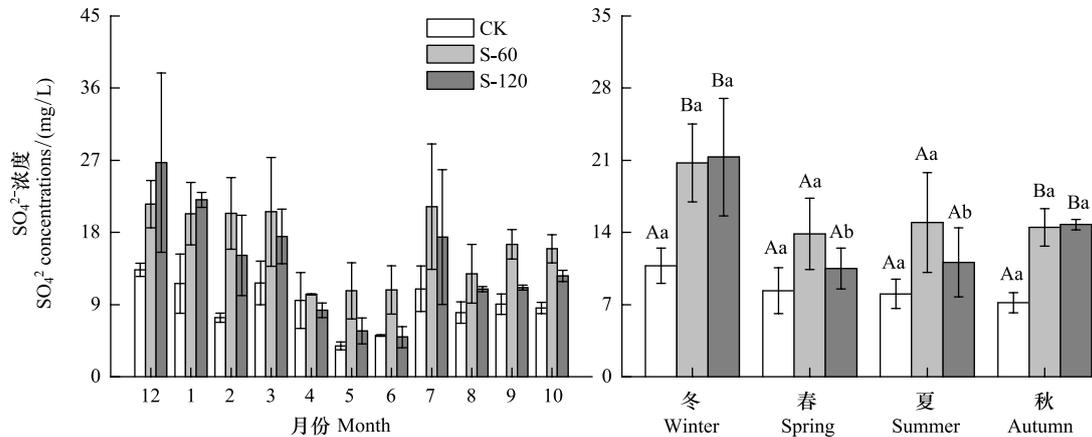


图 3 模拟 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 沉降情景下野慈姑湿地间隙水 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 浓度的月动态和季节动态

Fig.3 Monthly and seasonal variations of pore water SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> concentrations in the *S. trifolia* wetland with different simulated SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> deposition in the Tajiaozhou

CK, 对照 control group; S-60, 60 kg S hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> 处理 60 kg S hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> treatment group; S-120, 120 kg S hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> 处理 120 kg S hm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> treatment group. 不同大写字母代表同季节不同处理间差异性显著,不同小写字母代表同一处理不同季节差异性显著, (P<0.05)

表 3 模拟 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 沉降处理和月份对野慈姑湿地间隙水 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 浓度的影响

Table 3 Effects of simulated SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> deposition and month on pore water SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> concentrations in the *S. trifolia* wetland

	冬季 Winter		春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn		年度 Year	
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
处理 Treatment	4.544	P=0.025	2.235	P>0.05	1.967	P>0.05	24.149	P<0.001	4.260	P<0.001
月份 Month	1.272	P>0.05	7.538	P=0.004	3.803	P<0.05	0.924	P>0.05	11.518	P<0.001
处理×月份 Treatment×month	0.308	P>0.05	0.527	P>0.05	0.213	P>0.05	9.991	P<0.05	0.580	P>0.05

### 2.3 模拟 $\text{SO}_4^{2-}$ 沉降处理各样地土壤理化变化特征

模拟  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降各处理样地土壤理化特征月动态见图 4。各处理样地土壤温度最高值和最低值均分别出现在 7 月和 12 月, 土壤 pH 最高值和最低值均分别出现在 2 月和 10 月。各处理土壤电导率动态变化规律不明显。双因素方差分析结果表明: 各处理样地土壤温度和 pH 均有显著的月间差异 ( $P < 0.001$ ), 各处理间土温和土壤 pH 均无显著性差异 ( $P > 0.05$ ); 各样地土壤电导率不仅月间差异显著 ( $P < 0.001$ ), 而且各处理间也存在显著性差异 ( $P = 0.001$ ), 表明模拟  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降作用可显著提高土壤电导率。

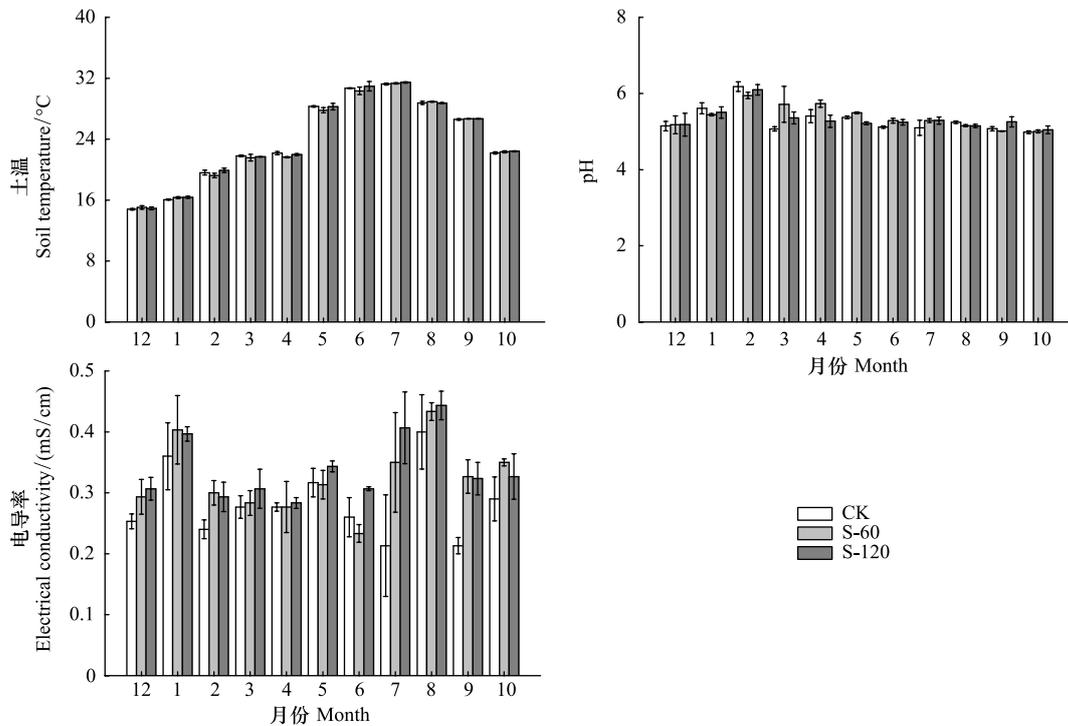


图 4 模拟  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降情景下野慈姑湿地土壤温度(a)、pH 值(b)、电导率(c)的月动态

Fig.4 Monthly variations of soil temperature(a), pH (b), electric conductivity(c) in the *S. trifolia* wetland with different simulated  $\text{SO}_4^{2-}$  deposition in the Tajiao Zhou

### 2.4 模拟 $\text{SO}_4^{2-}$ 沉降情景下 $\text{CH}_4$ 排放通量与环境因子的关系

图 5 为各处理样地  $\text{CH}_4$  排放通量与间隙水  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度、土壤 pH 和土壤电导率的散点图以及与土温的指数关系拟合图。各处理样地  $\text{CH}_4$  排放通量与间隙水  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度、土壤 pH 和土壤电导率无相关性 ( $P > 0.05$ ,  $n = 99$ ), 各处理样地  $\text{CH}_4$  排放通量与土壤温度指数拟合关系相关性极显著 ( $P < 0.01$ ,  $n = 99$ )。

## 3 讨论

本研究中施加高剂量的  $\text{K}_2\text{SO}_4$  溶液 ( $60$  和  $120 \text{ kg S hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ) 对闽江口淡水感潮野慈姑湿地  $\text{CH}_4$  排放通量均无显著的抑制效应。表 4 为模拟国际上模拟  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降对不同湿地类型  $\text{CH}_4$  排放通量的影响, 从表 4 可见, 与泥炭湿地和水稻田的研究结果相比<sup>[7-9]</sup>, 本研究模拟  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降后河口淡水感潮湿地  $\text{CH}_4$  排放通量下降的幅度明显较小, 然而, 与闽江口鱗鱼滩微咸水感潮湿地相比<sup>[10,12]</sup>, 本研究模拟  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降后湿地  $\text{CH}_4$  排放通量下降的幅度又存在一定程度的增加。

甲烷产生菌(MA)与硫酸盐还原菌(SRB)广泛存在于厌氧湿地土壤中, 竞争并利用着共同的基质( $\text{CH}_3\text{COOH}$  和  $\text{CO}_2/\text{H}_2$ )<sup>[18-19]</sup>。相比 MA, SRB 对以上基质具有更强的亲和力<sup>[16,19-21]</sup>。泥炭湿地和水稻田土壤  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度均很低, 大量外源硫酸根的输入导致土壤  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度显著增加, 硫酸盐还原作用增强, 甲烷排放通量因而

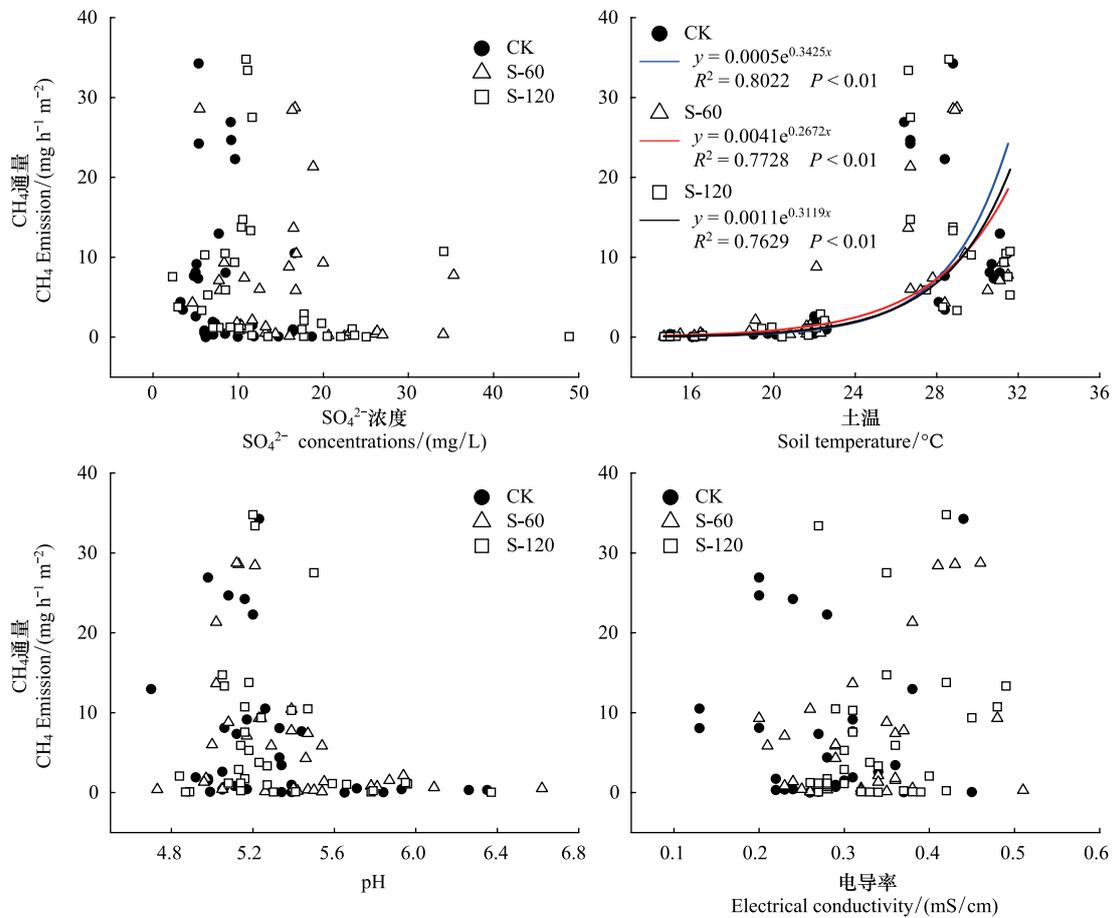


图 5 模拟  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降情景下野慈姑湿地  $\text{CH}_4$  排放通量与环境因子的相关关系

Fig.5 Relationship between  $\text{CH}_4$  fluxes with soil physical and chemical properties in the *S. trifolia* wetland with different simulated  $\text{SO}_4^{2-}$  deposition

显著降低<sup>[9,17,22]</sup>

表 4 模拟  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降对不同湿地  $\text{CH}_4$  排放通量的抑制作用

Table 4 Suppression of  $\text{CH}_4$  flux from different wetland types with simulated  $\text{SO}_4^{2-}$  deposition

研究区域 Study area	湿地类型 Wetland type	模拟 $\text{SO}_4^{2-}$ 沉降量 Simulated $\text{SO}_4^{2-}$ deposition /kg S hm <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup>	植物群落 Vegetation	与对照组比较 下降幅度 Decrease percentage compared with control /%	文献 Literature
Moidach More	泥炭湿地	25, 50, 100	泥炭藓群落	29, 22, 32	Gauci 等, 2002 <sup>[8]</sup>
Loch More	泥炭湿地	15, 50, 100	泥炭藓群落	28, 31, 29	Gauci 等, 2004 <sup>[9]</sup>
Bog Lake	泥炭湿地	24	泥炭藓群落	32	Dise 和 Verry, 2001 <sup>[15]</sup>
Degero Stormyr	泥炭湿地	10-20	泥炭藓群落	6	Granberg 等, 2001 <sup>[16]</sup>
Portugal	水稻田湿地	100	水稻群落	30	Gauci 等, 2006 <sup>[17]</sup>
Portugal	室内培养	100	—	22	Gauci 等, 2008 <sup>[7]</sup>
闽江口鱗鱼滩 Min River estuary	微咸水湿地	25,50,100	短叶荳苳群落	9.4	仝川等, 2010 <sup>[10]</sup>
闽江口鱗鱼滩 Min River estuary	微咸水湿地	24	短叶荳苳群落	8.3	胡敏杰等, 2016 <sup>[12]</sup>
闽江口塔礁洲 Min River estuary	淡水感潮湿地	60,120	野慈姑群落	16.8, 15.6	本研究

不同于内陆泥炭湿地和水稻田, 本研究中河口淡水感潮野慈姑湿地虽然盐度也很低(0.10‰±0.4‰), 由

于受潮汐和上游径流的共同影响,一方面,虽然模拟  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降处理选择在每个月的小潮日地表出露阶段开展,并缓慢施加  $\text{K}_2\text{SO}_4$  溶液以保证其尽量下渗入土壤中,同时施加  $\text{K}_2\text{SO}_4$  溶液的随后 3—4 h 地表仍然出露,但我们推测随后上涨的盐度极低的感潮上溯水,仍会稀释样地间隙水中  $\text{SO}_4^{2-}$  离子浓度,使得硫酸盐还原作用增强的效果并不显著;另一方面,研究样地的土壤含水率维持在 54.3%—58.9%,即使缓慢施加  $\text{K}_2\text{SO}_4$  溶液,但较高的土壤含水率,仍会造成溶液下渗深度有限,致使较深层土壤硫酸盐还原速率变化不大,以上原因均可能最终导致本研究中模拟  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降对淡水感潮野慈姑湿地  $\text{CH}_4$  排放通量的抑制效应不显著。

本研究样地对照组土壤间隙水(10 cm 深度)  $\text{SO}_4^{2-}$  年平均浓度为  $(9.01 \pm 1.64)$  mg/L,在模拟  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降作用下,S-60、S-120 两个处理组土壤间隙水  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度分别增至  $(15.73 \pm 1.37)$  mg/L、 $(16.61 \pm 2.68)$  mg/L,均远低于闽江口鱗鱼滩半咸水感潮湿地土壤间隙水  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度本底值(0—30 cm 深度年均值:405.0 mg/L)<sup>[12]</sup>,即闽江口鱗鱼滩湿地土壤间隙水  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度相对饱和,对于模拟  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降的响应更不敏感,这是本研究模拟  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降情景下  $\text{CH}_4$  排放通量下降幅度(16%)高于闽江口鱗鱼滩半咸水湿地模拟  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降情景下  $\text{CH}_4$  排放通量下降幅度(8.3%和 9.4%)的主要原因。

本研究中各个处理样地  $\text{CH}_4$  排放通量均与土壤温度呈显著正相关关系( $P < 0.01$ ),表明温度仍是调控亚热带河口感潮湿地  $\text{CH}_4$  排放通量的主要环境因素。湿地  $\text{CH}_4$  排放是  $\text{CH}_4$  产生、氧化以及传输的最终体现<sup>[15,23-24]</sup>,土壤温度增加可以通过提升湿地土壤产甲烷菌活性进而促进  $\text{CH}_4$  产生<sup>[25-28]</sup>。闽江口区域夏季及初秋为全年高温期,较高的温度增强了微生物活性及代谢功能,因此促进了湿地  $\text{CH}_4$  产生。

#### 4 结论

每月小潮日施加高剂量  $\text{K}_2\text{SO}_4$  溶液(60 和 120 kg S  $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ ) 在年尺度上均未显著降低闽江口淡水感潮野慈姑湿地  $\text{CH}_4$  排放通量,即模拟高强度  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降不对闽江口淡水感潮湿地  $\text{CH}_4$  排放通量产生类似于其对泥炭湿地和水稻田的显著抑制效应。不同处理下的  $\text{CH}_4$  排放通量均与土温呈现极显著的正相关关系,温度同样是影响亚热带河口淡水感潮湿地  $\text{CH}_4$  排放通量时间变化的主要环境因子。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [ 2 ] 中国气象局气候变化中心. 中国温室气体公报. (2016-01-12). <http://www.cma.gov.cn/2011xwxz/2011xqxxw/2011xqxw/201601/P020160119406161109141.pdf>.
- [ 3 ] Menon S, Denman K L, Brasseur G, et al. Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. *Lawrn Brly Naonal Laboraory*, 2005, 2007: 499-587.
- [ 4 ] Sha C Y, Mitsch W J, Mander Ü, Lu J J, Batson J, Zhang L, He W S. Methane emissions from freshwater riverine wetlands. *Ecological Engineering*, 2011, 37(1): 16-24.
- [ 5 ] Allen D, Dalal R C, Rennenberg H, Schmidt S. Seasonal variation in nitrous oxide and methane emissions from subtropical estuary and coastal mangrove sediments, Australia. *Plant Biology*, 2011, 13(1): 126-133.
- [ 6 ] 李杨杰, 陈振楼, 王东启, 胡泓, 王初. 长江口盐沼带湿地生态演替过程中甲烷排放研究. *环境科学学报*, 2014, 34(8): 2035-2042.
- [ 7 ] Gauci V, Dise N B, Howell G, Jenkins M E. 2008. Suppression of rice methane emission by sulfate deposition in simulated acid rain. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(G3): G00A07.
- [ 8 ] Gauci V, Dise N, Fowler D. Controls on suppression of methane flux from a peat bog subjected to simulated acid rain sulfate deposition. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(1): 4-1-4-12.
- [ 9 ] Gauci V, Matthews E, Dise N, Walter B, Koch D, Granberg G, Vile M. Sulfur pollution suppression of the wetland methane source in the 20th and 21st centuries. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(34): 12583-12587.
- [ 10 ] 全川, 柳铮铮, 曾从盛, 钟春棋, 黄佳芳. 模拟  $\text{SO}_4^{2-}$  沉降对河口潮汐湿地甲烷排放通量的影响. *中国环境科学*, 2010, 30(3): 302-308.
- [ 11 ] 赵卫红. 福建省主要城市降水离子特征及沉降量现状分析. *亚热带资源与环境学报*, 2008, 3(3): 19-24.
- [ 12 ] 胡敏杰, 邹芳芳, 任鹏, 杜威宁, 全川. 河口潮滩湿地  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$  排放通量对氮硫负荷增强的响应. *环境科学学报*, 2016, 36(4):

1359-1368.

- [13] Yu J B, Liu J S, Sun Z G, Sun W D, Wang J D, Wang G P, Chen X B. The fluxes and controlling factors of  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CH}_4$  emissions from freshwater marsh in Northeast China. *Science China Earth Sciences*, 2010, 53(5): 700-709.
- [14] Song C C, Xu X F, Tian H Q, Wang Y Y. Ecosystem-atmosphere exchange of  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  and ecosystem respiration in wetlands in the Sanjiang Plain, Northeastern China. *Global Change Biology*, 2009, 15(3): 692-705.
- [15] Dise N B, Verry E S. Suppression of peatland methane emission by cumulative sulfate deposition in simulated acid rain. *Biogeochemistry*, 2001, 53(2): 143-160.
- [16] Granberg G, Sundh I, Svensson B H, Nilsson M. Effects of temperature, and nitrogen and sulfur deposition, on methane emission from a boreal mire. *Ecology*, 2001, 82(7): 1982-1998.
- [17] Gauci V, Dise N B, Howell G. Suppression of rice methane production and emission by low dose sulfate application//Proceedings of the American Geophysical Union, Fall Meeting. San Francisco, USA: AGU, 2006.
- [18] 沈菊培, 贺纪正. 微生物介导的碳氮循环过程对全球气候变化的响应. *生态学报*, 2011, 31(11): 2957-2967.
- [19] 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.
- [20] 胡伟芳, 曾从盛, 高君颖, 章文龙, 张林海, 王维奇, 黄佳芳, 颜燕燕. 闽江口鱻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. *环境科学学报*, 2015, 35(4): 1116-1124.
- [21] 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.
- [22] 仝川, 陈重安, 黄佳芳. 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. *湿地科学*, 2011, 9(4): 305-313.
- [23] Segarra K E A, Comerford C, Slaughter J, Joye S B. Impact of electron acceptor availability on the anaerobic oxidation of methane in coastal freshwater and brackish wetland sediment. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 115: 15-30.
- [24] Dodla S K, Wang J J, Delaune R D, Breitenbeck G. Carbon gas production under different electron acceptors in a freshwater marsh soil. *Chemosphere*, 2009, 76(4): 517-522.
- [25] 杨平, 何清华, 仝川. 闽江口不同沼泽植被带土壤甲烷产生潜力的温度敏感性. *中国环境科学*, 2015, 35(3): 879-888.
- [26] Eriksson T, Öquist M G, Nilsson M B. Production and oxidation of methane in a boreal mire after a decade of increased temperature and nitrogen and sulfur deposition. *Global Change Biology*, 2010, 16(7): 2130-2144.
- [27] 沙晨燕, 谭娟, 王卿, 王敏. 不同类型河滨湿地甲烷和二氧化碳排放初步研究. *生态环境学报*, 2015, 24(7): 1182-1190.
- [28] Chmura G L, Anisfeld S C, Cahoon D R, Lynch J C. Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(4): 1111.