

DOI: 10.5846/stxb201805051002

贺文君, 韩广轩, 宋维民, 李培广, 张树岩, 张希涛. 潮汐作用对黄河三角洲盐沼湿地甲烷排放的影响. 生态学报, 2019, 39(17): 6238–6246.

He W J, Han G X, Song W M, Li P G, Zhang S Y, Zhang X T. Effects of tidal action on methane emissions over a salt marsh in the Yellow River Delta, China. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(17): 6238–6246.

# 潮汐作用对黄河三角洲盐沼湿地甲烷排放的影响

贺文君<sup>1,2</sup>, 韩广轩<sup>1,\*</sup>, 宋维民<sup>1</sup>, 李培广<sup>1</sup>, 张树岩<sup>3</sup>, 张希涛<sup>3</sup>

1 中国科学院烟台海岸带研究所, 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 烟台 264003

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 山东省黄河三角洲国家级自然保护区, 东营 257500

**摘要:** 盐沼湿地作为陆海交互作用的过渡带是 CH<sub>4</sub> 重要的自然来源。潮汐活动通过影响 CH<sub>4</sub> 的产生、氧化和传输驱动了湿地 CH<sub>4</sub> 间歇性、周期性的排放。利用涡度相关和微气象监测技术, 对黄河三角洲一个盐地碱蓬生态系统 CH<sub>4</sub> 通量、环境因子和水文要素(潮汐)进行了长期连续监测分析了该生态系统生长季 CH<sub>4</sub> 排放的季节动态及潮汐作用对 CH<sub>4</sub> 排放的影响。结果表明: 生长季该生态系统是 CH<sub>4</sub> 的排放源, 排放日均值为 0.063 mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (范围为 -0.36—0.57 mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>)。潮汐淹水阶段和落潮后湿润阶段表现为 CH<sub>4</sub> 的显著源。此外我们发现, 短期潮汐活动引起土壤干湿状况的变化促进了 CH<sub>4</sub> 脉冲式的排放, 因此未来气候变化下温度升高和降雨季节分配引起的土壤干湿变化将会对该区域 CH<sub>4</sub> 排放甚至碳循环产生积极影响。

**关键词:** 甲烷; 潮汐作用; 干湿循环; 盐沼湿地

## Effects of tidal action on methane emissions over a salt marsh in the Yellow River Delta, China

HE Wenjun<sup>1,2</sup>, HAN Guangxuan<sup>1,\*</sup>, SONG Weimin<sup>1</sup>, LI Peiguang<sup>1</sup>, ZHANG Shuyan<sup>3</sup>, ZHANG Xitao<sup>3</sup>

1 Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Chinese Academy of Science, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Administration Bureau of the Yellow River Delta National Nature Reserve, Dongying 257500, China

**Abstract:** Salt marshes are coastal wetlands that are considered to be a potential natural source of methane (CH<sub>4</sub>). By controlling the production, oxidation, and transport of CH<sub>4</sub> in soils, tidal action drives the episodic and high-magnitude emissions of CH<sub>4</sub> from coastal wetlands. Using the eddy covariance technique, we measured the CH<sub>4</sub> fluxes, environmental factors, and tidal dynamics in a salt marsh in the Yellow River Delta in China. We aimed to investigate the dynamics of CH<sub>4</sub> emissions in the growing season and to analyze the effect of tidal action on CH<sub>4</sub> emission. The results showed that the mean daily methane was 0.063 mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, ranging from -0.36 to 0.57 mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, during the growing season. Tidal flooding and the wet stage after tides are the significant sources of CH<sub>4</sub>. Drying and wetting cycles induced by short-term tides resulted in pulsed CH<sub>4</sub> emissions. Therefore, the soil drought and wetting induced by increasing temperatures and precipitation distribution under climate change will positively impact CH<sub>4</sub> emissions and the carbon cycle in the region.

**Key Words:** methane; tidal action; drying and wetting cycles; salt marsh

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671089); 中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-STZ-ZDTP-023); 中国科学院“十三五”信息化建设专项(XXH13506)

收稿日期: 2018-05-05; 网络出版日期: 2019-05-31

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gxhan@yic.ac.cn

甲烷( $\text{CH}_4$ )作为一种重要的温室气体,其单分子增温潜势是 $\text{CO}_2$ 的28倍<sup>[1]</sup>,大气 $\text{CH}_4$ 浓度微小的变化都可能对全球变化产生显著影响<sup>[2]</sup>。作为陆海相互作用的过渡带,湿地一直被认为是 $\text{CH}_4$ 的自然排放源<sup>[2-3]</sup>,但盐沼湿地因地形因素、环境特征和频繁的潮汐浸淹,其 $\text{CH}_4$ 排放具有较大的时空变异性<sup>[4]</sup>;同时因盐沼湿地沉积物中含有丰富的 $\text{SO}_4^{2-}$ 可能会抑制 $\text{CH}_4$ 的产生,减少其排放<sup>[5]</sup>。

潮汐湿地 $\text{CH}_4$ 通量是土壤和水中 $\text{CH}_4$ 生成、氧化和传输的产物<sup>[6]</sup>。盐沼湿地周期性的潮汐活动引起沉积物盐度、氧化还原电位、有机质和养分的短期波动<sup>[7]</sup>,改变了 $\text{CH}_4$ 的产生效率和传输机制<sup>[8]</sup>,进而决定了盐沼湿地 $\text{CH}_4$ 排放量。潮汐水位变化是影响 $\text{CH}_4$ 排放的重要因素。一方面,涨潮前土壤长期暴露于空气中有利于氧气的渗透增加了土壤氧化层,从而抑制了 $\text{CH}_4$ 的产生<sup>[9]</sup>,涨潮过程中高水位促进了厌氧环境的生成既有利于 $\text{CH}_4$ 的产生又减少了土壤氧化层的空间<sup>[3]</sup>,同时潮汐淹水影响着地表沉积物 $\text{O}_2$ 的可利用性、气体的传输速率等过程<sup>[10-12]</sup>,也潜在地影响 $\text{CH}_4$ 的产生和扩散<sup>[10]</sup>。涨落潮过程中潮水携带大量的 $\text{SO}_4^{2-}$ 可通过瞬间改变末端电子受体的再生和耗尽而对 $\text{CH}_4$ 产生氧化作用影响其排放<sup>[13-14]</sup>。另一方面,落潮后湿润阶段引起土壤厌氧层空间的增加和微生物群落的建立进一步影响 $\text{CH}_4$ 的产生、吸收和传输<sup>[13,15]</sup>。此外,周期性的潮汐活动引起湿地土壤间歇性曝气可能会导致局部的氧化还原循环,从而影响电子受体的电子流<sup>[14]</sup>,进而影响 $\text{CH}_4$ 的产生。

黄河三角洲作为海陆相互作用最为活跃的区域之一<sup>[16]</sup>。受陆海物质交汇、咸淡水混合、地表及地下径流和潮汐等不同水文要素的驱动,黄河三角洲发育了不同的湿地类型和植被群落<sup>[17-19]</sup>,导致该区域 $\text{CH}_4$ 排放存在较大的复杂性和不确定性<sup>[20]</sup>。与传统静态箱相比,涡度相关技术可在大空间、长时间上获得高质量分辨率的通量数据<sup>[21-22]</sup>。此外,涡度相关技术可完整捕捉到潮汐过程中 $\text{CH}_4$ 通量的动态变化,避免由于潮汐活动的短暂性及瞬时性而错过 $\text{CH}_4$ 排放峰值。本研究基于2016年黄河三角洲盐沼湿地生长季数据,利用涡度相关法分析黄河三角洲盐沼湿地 $\text{CH}_4$ 排放通量的季节变化规律,重点探讨潮汐作用对 $\text{CH}_4$ 排放的影响,以期如潮汐水动力过程中滨海盐沼湿地 $\text{CH}_4$ 排放提供数据支持和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态试验站的潮间带观测场(118°41'41"—119°16'41"E)。该区域属于暖温带大陆性季风气候,光照充足,四季分明,夏季多雨。多年平均气温为13.4℃,年平均日照数2590—2830 h,无霜期206 d<sup>[23]</sup>。常年盛行东南风和东北风。多年平均降雨量556.1 mm,年蒸发量1962 mm,干旱指数3.65<sup>[17]</sup>,该研究区域土壤以滨海盐渍土为主,土壤质地为砂质黏壤土,有机质含量丰富<sup>[24]</sup>,以黄河沉积物和泥沙为主要成土母质,受海洋作用强烈,土壤发育年轻<sup>[25]</sup>。表层土壤pH的变化范围为7.7—8.5,呈弱碱性;0—30 cm表层土壤 $\text{SO}_4^{2-}$ 变化幅度为0.01%—0.15%<sup>[26]</sup>。

研究区通量塔位于潮间带中高潮滩(37°47'20"N,119°10'23"E),该区域地势平坦,受半月潮影响,平均涨潮历时6 h 30 min,平均落潮历时9 h 24 min。潮流基本以平行于海岸界的往复流为主<sup>[27]</sup>,潮汐淹水以到达研究区域为准。该区域植被群落组成简单,以一年生草本植物盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)为建群种,伴生有芦苇(*Phragmites australis*)。盐地碱蓬高20—30 cm。

### 1.2 研究方法

在观测场主风风向上,约90%的通量源区主要分布于200 m范围内。通量塔安装有开放式涡度相关系统和微气象观测系统。开放式涡度相关观测系统包括安装高度为2.8 m的开放式 $\text{CH}_4$ 分析仪(LI-7700,LI-Cor,USA)和三维超声风速仪(GILL-WM,LI-Cor,USA),原始数据采样频率为10 Hz,每30 min输出平均值。微气象观测系统包括距地面2.8 m的光量子传感器(LI-190SL,LI-Cor,USA)用于测定光合有效辐射。四分量(NR01,LI-Cor,USA)距离地面2 m用于监测净辐射,空气温湿度传感器(HMP50,Vaisala,Helsinki,Finland)距离地面2 m,可同时测量空气温度和湿度。雨量筒位于1.5 m处(52203,RM Young Inc.,Traverse

City, MI, USA)。土壤因子监测主要包括 5、10 cm 深处的土壤温度(TM-L10, LI-Cor, USA), 所有气象数据通过数据采集器(CR1000, LI-Cor, USA) 在线采集, 并按 30 min 计算平均值进行存储。潮汐水位数据根据水位计和物候远程图像监测系统(RR-8140) 进行监测, 水位计每 30 min 记录一次数据, 物候远程图像从 5:00 点到 19:00 点自动工作, 数据监测间隔 2 h。其他地方有更多仪器详细信息<sup>[28]</sup>。

### 1.3 通量数据质量控制

受天气状况、仪器机械故障、电力中断等因素的影响, 野外数据监测过程中不可避免地会产生异常数据及造成部分数据丢失, 因此需对原始通量数据进行质量控制。数据控制标准为: (1) 剔除  $|F_{\text{CH}_4}| \geq 25 \text{ nmol CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  的异常值和降雨前后半个小时数据; (2) 由于夜间大气层结比较稳定, 导致湍流发展不充分, 因而去除夜间  $u^* < 0.07 \text{ m/s}$  所对应的  $\text{CH}_4$  通量数据; (3) 剔除仪器信号值(Relative signal strength indicator, RSSI) 较弱的  $\text{CH}_4$  通量数据,  $\text{RSSI} < 25\%$ , 得到控制数据, 经质量控制后所得数据占通量数据的 72.5%。

### 1.4 数据分析

基于该区域 2016 年 5—10 月生长季  $\text{CH}_4$  数据、水位和远程图像监测数据, 我们确定了潮汐涨落潮过程, 选择标准详见其他地方<sup>[28]</sup>, 根据此标准我们共筛选出 3 组潮汐过程  $\text{CH}_4$  通量变化数据。

在以上 3 组潮汐过程数据中选取 1 次完整潮汐涨落潮过程作为研究对象, 同时根据潮汐水位的变化将潮汐过程划分为: 涨潮前(干旱阶段): 7 月 2 日 22:30 到 7 月 4 日 19:00; 涨落潮阶段(淹水阶段): 从 7 月 4 日 22:30 到 7 月 6 日 19:00; 落潮后(湿润阶段): 7 月 6 日 22:30 到 7 月 8 日 19:00。潮汐淹水阶段水位最高为 14.5 cm, 并未完全淹没植被, 落潮后潮水完全退去。

利用配对样本  $T$  检验(Paired sample  $t$ -test) 分析涨潮前(干旱阶段)和涨落潮(淹水阶段)、涨潮前和落潮后(湿润阶段)、涨落潮淹水阶段和落潮后  $\text{CH}_4$  通量半小时平均值之间的差异。运用统计分析软件 SPSS 17.0 进行数据统计分析, 运用 Sigmaplot 12.5 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 环境因子季节动态分析

5—10 月整个生长季内, 黄河三角洲盐沼湿地月平均光合有效辐射(Photosynthetic active radiation, PAR) 变幅为 212.1—455.9  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , 呈先上升后下降趋势, 其日均值波动范围为 37.5—614.2  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , 夏季阴雨天气较多, PAR 呈离散模式, 波动较大(图 1)。生长季空气温度日均值为 22.3  $^{\circ}\text{C}$ , 接近 30 年(1978—2008) 生长季平均气温(21.9 $\pm$ 1.6)  $^{\circ}\text{C}$ <sup>[19]</sup>, 日均空气温度变幅为 5.9—31.2  $^{\circ}\text{C}$ 。整个生长季, 空气温度与土壤温度变化趋势一致, 5 cm 土壤温度的日均值为 23.5  $^{\circ}\text{C}$ , 其变化范围为 9.6—31.2 $^{\circ}\text{C}$ ; 10 cm 土壤温度的日均值为 23.4  $^{\circ}\text{C}$ , 其日均值变化范围为 10.7—30.7 $^{\circ}\text{C}$ (图 1)。生长季降水总量为 893.6 mm, 占全年降水量的 95.9%, 受极端天气影响, 8 月 8 日单次降雨量达到 335.3 mm(图 1)。

### 2.2 盐沼湿地 $\text{CH}_4$ 通量排放特征

黄河三角洲盐沼湿地半小时  $\text{CH}_4$  排放通量和水位变化趋势如图 2 所示, 因仪器故障致使部分  $\text{CH}_4$  通量数据缺失。黄河三角洲盐沼湿地地表水位高度主要受降雨和潮汐影响, 土壤干湿状况明显, 无潮汐和降雨时地面无积水。图 2 中水位高度以地面为参考, 表示距离地表高度。2016 年 5—10 月观测期间  $\text{CH}_4$  通量半小时变幅为 -19.7—26.6  $\text{nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , 6 月 30 日达到排放日均最高值为 9.9  $\text{nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , 最低为 9 月 12 日的 -6.4  $\text{nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。地表水位日均值变化范围为 0—84.4 cm, 由极端降雨引起的最大瞬时水位为 35 cm, 而潮汐活动所引起的最大瞬时水位高度为 130 cm。整个生长季,  $\text{CH}_4$  排在连续降雨及涨潮过后的湿润阶段呈逐渐增大趋势。

由表 1 可知, 黄河三角洲盐沼湿地生长季表现为  $\text{CH}_4$  微弱源。6 月份温度高于 5 月份, 但 6 月份  $\text{CH}_4$  排放总量却低于 5 月份。7—8 月份, 降雨增多, 地表水位增大的同时  $\text{CH}_4$  排放量也增大,  $\text{CH}_4$  排放通量在 7 月份达到排放峰值, 最低值出现在 9 月。

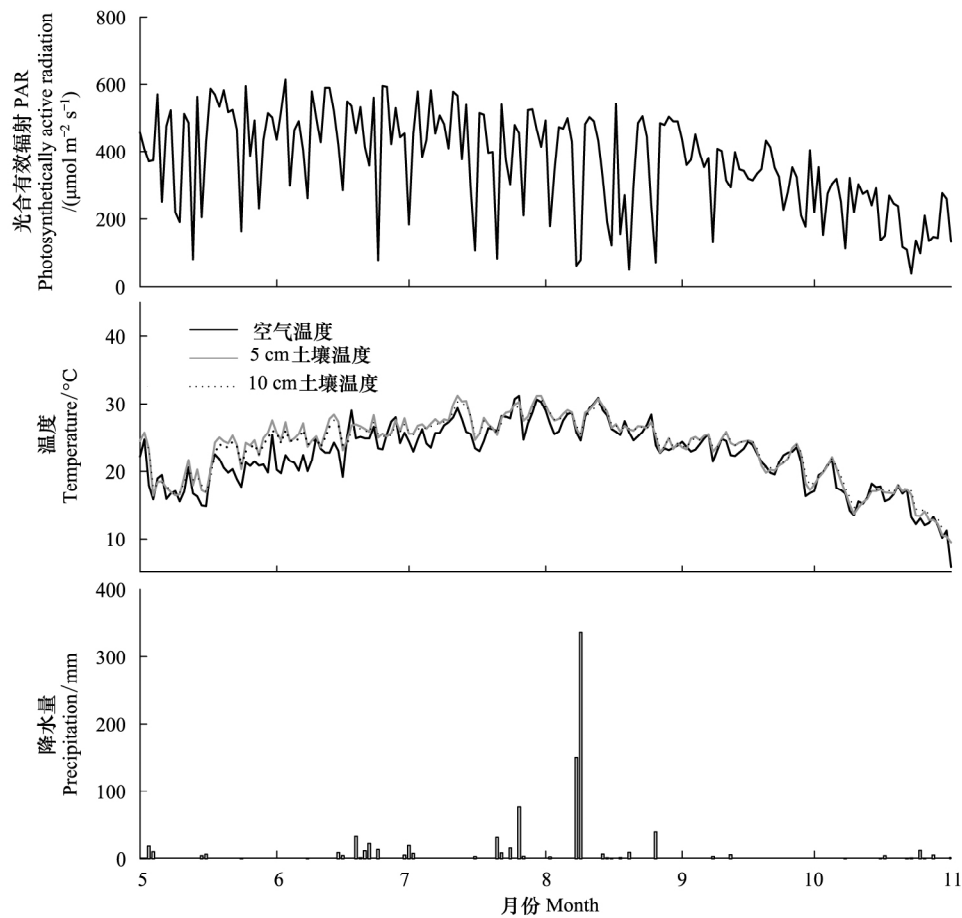


图1 2016 年生长季黄河三角洲湿地环境因子动态

Fig.1 Variations of environmental factor during the growing season of 2016 in the Yellow River Delta

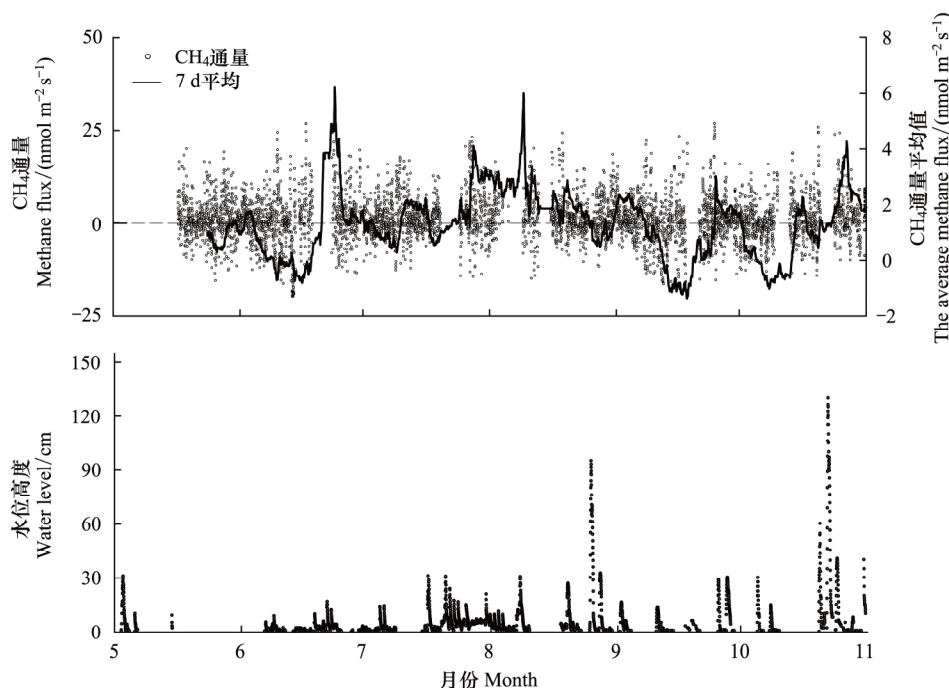
表1 CH<sub>4</sub> 通量各月份排放Table 1 Monthly variations of CH<sub>4</sub> emission

月份 Month	CH <sub>4</sub> 排放通量 Methane emission flux / ( mg m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	月份 Month	CH <sub>4</sub> 排放通量 Methane emission flux / ( mg m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )
5	0.062	8	0.081
6	0.043	9	0.033
7	0.092	10	0.045

## 2.3 潮汐作用对 CH<sub>4</sub> 排放的影响

### 2.3.1 CH<sub>4</sub> 通量排放的日动态

涨落潮不同阶段 CH<sub>4</sub> 排放通量的日动态如图 3 所示。不同潮汐过程中 CH<sub>4</sub> 排放通量具有明显的变幅差异。涨潮前, CH<sub>4</sub> 排放通量波动较小没有明显的峰值变化。涨落潮淹水期间, CH<sub>4</sub> 排放通量随着潮汐水位波动出现多个峰值。涨潮初期, 潮汐对土壤的湿润过程激发了土壤中 CH<sub>4</sub> 的排放, CH<sub>4</sub> 排放速率随着水位的不断上涨不断增大。涨落潮淹水过程中, 潮汐水位波动引起 CH<sub>4</sub> 排放通量的变化, 同时, 第二次潮汐水位的上涨与 CH<sub>4</sub> 排放通量并不同步, 使 CH<sub>4</sub> 排放具有时间上的延迟性。落潮后的湿润阶段, CH<sub>4</sub> 通量波动较大, 存在多个峰值。整个潮汐阶段中, CH<sub>4</sub> 排放量在落潮后的湿润阶段达到整个潮汐过程的排放峰值, 分别为 35.6 nmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>、15.6 nmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> 和 12.5 nmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (图 3)。6 月份, 落潮后 CH<sub>4</sub> 集中排放持续 16 个小时后, 由排放转为吸收 (图 3)。

图2 半小时  $\text{CH}_4$  通量和水位排放动态Fig.2 Half hourly variations of  $\text{CH}_4$  emission and water level

### 2.3.2 $\text{CH}_4$ 排放通量对不同潮汐阶段的响应

利用配对  $t$  检验分析图 3 中一个完整潮汐过程中不同阶段  $\text{CH}_4$  排放通量的差异(图 4)。结果表明: 涨潮前  $\text{CH}_4$  排放均值( $-0.91 \pm 0.26$ )  $\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  显著低于涨落潮淹水阶段( $1.34 \pm 0.36$ )  $\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  和落潮后湿润阶段( $1.24 \pm 0.52$ )  $\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  ( $P < 0.01$ )。涨落潮淹水阶段与落潮后  $\text{CH}_4$  排放均值无显著差异。整个潮汐过程中,  $\text{CH}_4$  以排放为主, 其排放均值为( $0.56 \pm 0.26$ )  $\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。

## 3 讨论

### 3.1 盐沼湿地甲烷通量排放的季节动态比较

黄河三角洲盐沼湿地在生长季(2016年5—10月)是  $\text{CH}_4$  的排放源, 排放日均值为  $0.063 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , 变化范围为  $-0.36$ — $0.57 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , 与前人在该区域的研究数据范围一致, 而与其他类型的滨海湿地  $\text{CH}_4$  通量排放水平差异较大(表 2), 这可能与植被生产力、水文要素、地形地貌、气候条件等因素的差异有关<sup>[11]</sup>。

盐沼湿地土壤中的  $\text{CH}_4$  排放是产生、氧化、传输相互作用的结果<sup>[34-35]</sup>。生长季初期(5—6月)尽管地表及空气温度升高但降雨及潮汐活动较少, 湿地干旱时间较长致使土壤盐分表聚,  $\text{CH}_4$  生产量较小。湿地土壤长期暴露引起土壤盐分升高一方面能够通过渗透胁迫抑制微生物的活性<sup>[21, 36]</sup>; 另一方面, 产甲烷菌作为湿地土壤中最缺乏竞争力的异氧微生物, 在与电子受体竞争中处于劣势<sup>[37-38]</sup>, 表层土壤较高的盐分提高了电子受体的数量<sup>[38]</sup>, 致使土壤由产  $\text{CH}_4$  过程向还原过程转变, 从而增强了对  $\text{CH}_4$  产生的抑制作用, 形成  $\text{CH}_4$  的减排效应<sup>[15]</sup>。夏季较为频繁的降雨及潮汐活动提高了土壤的湿度, 为产  $\text{CH}_4$  提供了较为有利的厌氧环境, 从而促进了  $\text{CH}_4$  的产生及释放, 使得  $\text{CH}_4$  排放量在 7—8 月份较高。尽管潮汐活动在 9 月份较为频繁, 但潮汐过程在提高土壤湿度的同时也使得土壤沉积物中含有较高的  $\text{SO}_4^{2-}$  抑制了  $\text{CH}_4$  的产生, 从而减少其排放<sup>[4]</sup>。此外, 本研究中植被类型以碱蓬群落为主, 不同于莎草等维管植物, 碱蓬没有维管通道来促进  $\text{CH}_4$  从土壤向大气中的传输排放<sup>[39-40]</sup>。

### 3.2 潮汐作用对 CH<sub>4</sub>排放的影响

图 5 为盐沼湿地 CH<sub>4</sub>排放对整个潮汐过程的响应概念图。涨潮前无降雨和潮汐活动,盐沼湿地土壤较为干旱以好氧过程为主,深层厌氧土壤产生的 CH<sub>4</sub>由土壤剖面向大气传输的过程中极易被土壤表层根际微生物氧化而导致其排放量减少<sup>[21, 28, 41]</sup>;涨落潮过程中,潮汐淹水既促进了厌氧层的形成又抑制了土壤氧化层的空间<sup>[3]</sup>,潮汐淹水过程中,湿地土壤产生的 CH<sub>4</sub>通过扩散、气泡和植物传输排放到大气中<sup>[21]</sup>,其中植物传输约占整个 CH<sub>4</sub>排放量的 90%<sup>[42]</sup>。落潮后的湿润阶段,土壤厌氧层空间增加,土壤处于饱和状态促进了 CO<sub>2</sub>的吸收<sup>[20]</sup>,土体中的 CO<sub>2</sub>和 H<sub>2</sub>相互作用生成 CH<sub>4</sub>排放到大气中<sup>[42]</sup>。

落潮后水位接近土壤表层时达到 CH<sub>4</sub>排放的峰值,这种集中排放并不能维持较长时间(图 3)。气体在水中传输速率远低于空气中,潮汐淹水阶段部分 CH<sub>4</sub>溶解于水中,落潮后 CH<sub>4</sub>逐渐排放到大气中被涡度设备监测到从而存在时间上的滞后性<sup>[43]</sup>。落潮后湿地土壤失去水流屏障,土壤厌氧层的空间增加有利于产生的 CH<sub>4</sub>集中释放。此外,潮水退去后滞留在土体中的 CH<sub>4</sub>与大量进入土壤中的 O<sub>2</sub>维持了甲烷氧化菌的活性<sup>[44]</sup>,使得 CH<sub>4</sub>在集中爆发后并不能持续较长时间,并逐渐由排放转为吸收,这与汪青等<sup>[45]</sup>的研究结果一致。

本研究发现,一个潮汐循环中潮汐淹水阶段和落潮后表现为 CH<sub>4</sub>的显著源,涨潮初期潮汐淹水对土壤存在瞬时激发效应,而使 CH<sub>4</sub>排放随着水位的升高不断增加(图 3),伴随着潮汐水位的不断上涨,湿地土壤厌氧层不断增加对土壤中 CH<sub>4</sub>的产生起着积极作用。尽管潮汐淹水引起的静水压阻滞了土壤中 CH<sub>4</sub>的排放<sup>[11]</sup>,但本研究主要为小潮期,潮汐过程中水位并未完全淹没盐地碱蓬,CH<sub>4</sub>可通过植物传输到大气中。此外,潮汐淹水期间大型动物的穴居生活有利于土壤渗透性的增加<sup>[46]</sup>,同时潮汐淹水对螃蟹洞穴的冲刷,增加了土壤的有效表面积有利于 CH<sub>4</sub>的扩散<sup>[8, 47]</sup>,而使涨落潮过程表现为 CH<sub>4</sub>的源。

研究还发现,落潮后湿润阶段 CH<sub>4</sub>排放均值显著高于涨潮前阶段(图 4),由于盐沼湿地受到短期潮汐影响从而对 CH<sub>4</sub>排放速率产生不同的影响<sup>[12]</sup>。辽河口碱蓬湿地涨落潮过程中 CH<sub>4</sub>排放速率显著低于涨潮前<sup>[48]</sup>。闽江河口潮汐湿地的研究也表明,涨潮前要比落潮后具

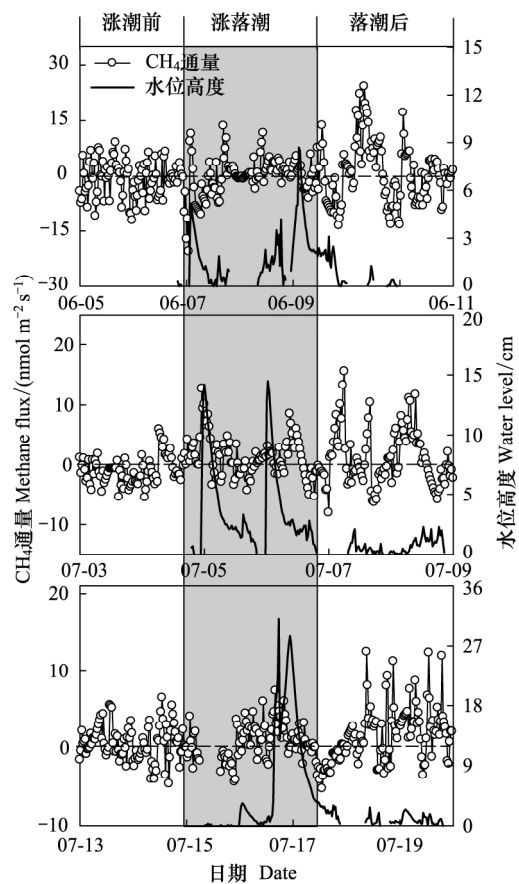


图 3 CH<sub>4</sub>排放通量随水位排放日动态,

Fig.3 Diurnal variations of CH<sub>4</sub> emission under a tidal cycle  
灰色区域表示涨潮期间

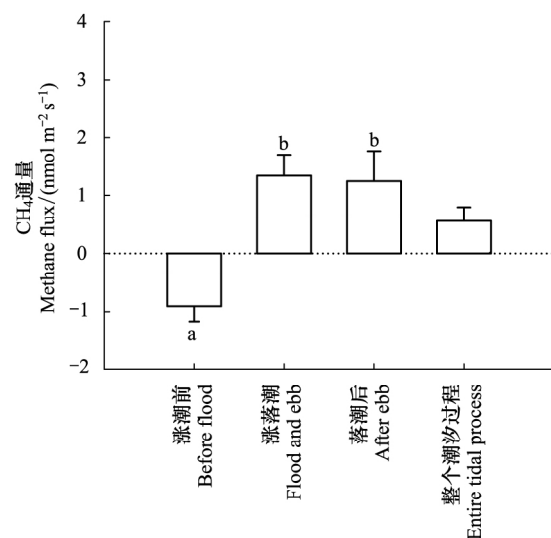


图 4 潮汐各阶段 CH<sub>4</sub>排放动态

Fig.4 CH<sub>4</sub> emission at different stages of tide

表 2 不同区域滨海湿地 CH<sub>4</sub> 排放通量比较

Table 2 Comparison of CH<sub>4</sub> flux in various coastal wetlands

研究地点 Location	湿地类型 Wetland type	主要植被类型 Main vegetation	甲烷排放通量平均值 Mean CH <sub>4</sub> emission flux/( mg m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	研究时段 Observation period	方法 Method	参考文献 Reference	备注 Remarks
黄河口	滨海湿地	碱蓬	0.06	2016.5—2016.10	箱式法	本研究	
辽河口	滨海湿地	芦苇	0.52	3—11	箱式法	[29]	
辽河口	潮汐湿地	碱蓬	0.028	2008.4—2008.10	箱式法	[30]	
黄河口	潮汐湿地	碱蓬	0.026	2010.9—2010.12	箱式法	[3]	
黄河口	潮汐湿地	碱蓬	0.055	2011.5—2011.7	箱式法		
			0.089	2009.8—2009.9	箱式法	[10]	高潮滩
			0.038	2009.8—2009.9	箱式法	[10]	中潮滩
			0.197	2009.8—2009.9	箱式法	[10]	低潮滩
闽江河口	潮汐湿地	短叶荇菜	0.92	4—10	箱式法	[31]	
崇明东滩	潮汐湿地	芦苇	2.71	2011—2012	涡度相关	[3]	
美国路易 斯安那州	盐沼湿地	互花米草	1.58	2012—2013	涡度相关	[32]	
		狐米草					
美国伊利湖	河口湿地	莎草	7.11	2012—2013	涡度相关	[32]	
		慈姑 蓉草					
美国伊利湖	河口湿地	浮水植物 沼泽松树	7.56	2011.3—2013.3	涡度相关	[33]	

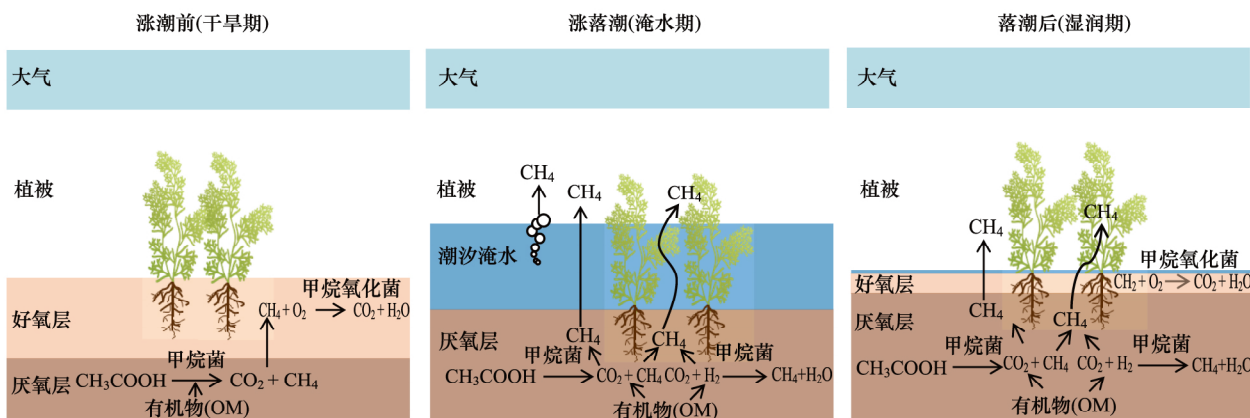


图 5 盐沼湿地 CH<sub>4</sub> 排放对潮汐过程的响应概念图

Fig.5 Conceptual diagram shows how changes in tidal process regulate CH<sub>4</sub> emission from a salt marsh wetland

有更大的 CH<sub>4</sub> 排放量, 涨潮前和落潮后 CH<sub>4</sub> 排放速率没有显著差异<sup>[49]</sup>。汪青等<sup>[45]</sup>的研究表明在落潮后 CH<sub>4</sub> 排放的更多, 这种现象的发生可能与土壤性质有关<sup>[31]</sup>。此外, 水分状况对土壤中 CH<sub>4</sub> 的产生起着决定性作用<sup>[50]</sup>, 落潮后土壤处于饱和状态相较于涨潮前的干旱状态更有利于 CH<sub>4</sub> 的产生。这种由潮汐引起的土壤干湿变化导致了 CH<sub>4</sub> 在落潮后脉冲式的排放, 这种脉冲式的排放也可能与潮汐过程携带来的大量有机物质有关<sup>[51-52]</sup>。此外, 潮汐活动诱导改变了土壤的氧化还原电位等理化性质<sup>[53]</sup>, 促使产甲烷菌和甲烷菌在土壤干湿交替模式下具有不同的活跃程度及增长速率<sup>[14, 54]</sup>, 而使整个潮汐过程中 CH<sub>4</sub> 排放量存在差异。

短期潮汐作用可能会通过改变潮滩暴露和淹水的频率和时长而对湿地 CH<sub>4</sub> 排放产生影响; 同时潮汐引起的干湿循环导致 CH<sub>4</sub> 脉冲式的排放, 很大程度上决定了较长时间尺度上温室气体的排放总量, 可能间接影响盐沼湿地 CH<sub>4</sub> 源/汇功能的转变<sup>[41]</sup>, 而未来气候变化下温度升高和降雨季节分配引起的土壤干湿循环的变化

将会对该区域 CH<sub>4</sub> 排放甚至碳循环产生积极影响。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Bridgman S D, Cadillo-Quiroz H, Keller J K, Zhuang Q L. Methane emissions from wetlands: biogeochemical, microbial, and modeling perspectives from local to global scales. *Global Change Biology*, 2013, 19(5): 1325–1346.
- [3] Li H, Dai S Q, Ouyang Z T, Xie X, Guo H Q, Gu C H, Xiao X M, Ge Z M, Peng C H, Zhao B. Multi-scale temporal variation of methane flux and its controls in a subtropical tidal salt marsh in eastern China. *Biogeochemistry*, 2018, 137(1/2): 163–179.
- [4] Sun Z G, Jiang H H, Wang L L, Mou X J, Sun W L. Seasonal and spatial variations of methane emissions from coastal marshes in the northern Yellow River estuary, China. *Plant and Soil*, 2013, 369(1/2): 317–333.
- [5] Abdul-Aziz O I, Ishtiaq K S, Tang J, Moseman-Valtierra S, Kroeger K D, Gonnee M E, Mora J, Morkeski K. Environmental controls, emergent scaling, and predictions of greenhouse gas (GHG) fluxes in coastal salt marshes. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, 123(7): 2234–2256.
- [6] Chamberlain S D, Gomez-Casanovas N, Walter M T, Boughton E H, Bernacchi C J, DeLucia E H, Groffman P M, Keel E W, Sparks J P. Influence of transient flooding on methane fluxes from subtropical pastures. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(3): 965–977.
- [7] Chauhan R, Datta A, Ramanathan A, Adhya T K. Factors influencing spatio-temporal variation of methane and nitrous oxide emission from a tropical mangrove of eastern coast of India. *Atmospheric Environment*, 2015, 107: 95–106.
- [8] Jacotot A, Marchand C, Allenbach M. Tidal variability of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from the water column within a *Rhizophora* mangrove forest (New Caledonia). *Science of the Total Environment*, 2018, 631–632: 334–340.
- [9] Neubauer S C. Ecosystem responses of a tidal freshwater marsh experiencing saltwater intrusion and altered hydrology. *Estuaries and Coasts*, 2013, 36(3): 491–507.
- [10] 姜欢欢, 孙志高, 王玲玲, 牟晓杰, 孙万龙, 宋红丽, 孙文广. 秋季黄河口滨岸潮滩湿地系统 CH<sub>4</sub> 通量特征及影响因素研究. *环境科学*, 2012, 33(2): 565–573.
- [11] 许鑫王豪, 赵一飞, 邹欣庆, 唐得昊, 刘大伟. 中国滨海湿地 CH<sub>4</sub> 通量研究进展. *自然资源学报*, 2015, 30(9): 1594–1605.
- [12] Hirota M, Senga Y, Seike Y, Nohara S, Kunii H. Fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide in two contrastive fringing zones of coastal lagoon, Lake Nakaumi, Japan. *Chemosphere*, 2007, 68(3): 597–603.
- [13] Olefeldt D, Euskirchen E S, Harden J, Kane E, McGuire A D, Waldrop M P, Turetsky M R. A decade of boreal rich fen greenhouse gas fluxes in response to natural and experimental water table variability. *Global Change Biology*, 2017, 23(6): 2428–2440.
- [14] Deppe M, McKnight D M, Blodau C. Effects of short-term drying and irrigation on electron flow in mesocosms of a northern bog and an alpine fen. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(1): 80–86.
- [15] 王进欣, 王今殊, 钦佩, 张维康. 生源气体排放的潮周期动态研究: 关键科学问题与不确定性. *海洋湖沼通报*, 2011, (4): 134–143.
- [16] Han G X, Xing Q H, Yu J B, Luo Y Q, Li D J, Yang L Q, Wang G M, Mao P L, Xie B H, Mickle N. Agricultural reclamation effects on ecosystem CO<sub>2</sub> exchange of a coastal wetland in the Yellow River Delta. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 196: 187–196.
- [17] Cui B S, Yang Q C, Yang Z F, Zhang K J. Evaluating the ecological performance of wetland restoration in the Yellow River Delta, China. *Ecological Engineering*, 2009, 35(7): 1090–1103.
- [18] Fan X, Pedrolí B, Liu G, Liu Q, Liu H, Shu L. Soil salinity development in the Yellow River Delta in relation to groundwater dynamics. *Land Degradation & Development*, 2012, 23(2): 175–189.
- [19] Han G X, Chu X J, Xing Q H, Li D J, Yu J B, Luo Y Q, Wang G M, Mao P L, Rashad R. Effects of episodic flooding on the net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange of a supratidal wetland in the Yellow River Delta. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 120(8): 1506–1520.
- [20] 贺文君, 韩广轩, 许延宁, 张希涛, 王安东, 车纯广, 孙宝玉, 张孝帅. 潮汐作用下干湿交替对黄河三角洲盐沼湿地净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换的影响. *应用生态学报*, 2018, 29(1): 269–277.
- [21] 韩广轩. 潮汐作用和干湿交替对盐沼湿地碳交换的影响机制研究进展. *生态学报*, 2017, 37(24): 8170–8178.
- [22] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*, 2003, 9(4): 479–492.
- [23] 宋创业, 刘高焕, 刘庆生, 曹铭昌, 黄翀. 黄河三角洲植物群落分布格局及其影响因素. *生态学杂志*, 2008, 27(12): 2042–2048.
- [24] 邢庆会, 韩广轩, 于君宝, 吴立新, 杨利琼, 毛培利, 王光美, 谢宝华. 黄河口潮间盐沼湿地生长季净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换特征及其影响因



- 素. 生态学报, 2014, 34(17): 4966-4979.
- [25] 杨利琼, 韩广轩, 于君宝, 吴立新, 朱敏, 邢庆会, 王光美, 毛培利. 开垦对黄河三角洲湿地净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换的影响. 植物生态学报, 2013, 37(6): 503-516.
- [26] 范晓梅, 刘高焕, 唐志鹏, 束龙仓. 黄河三角洲土壤盐渍化影响因素分析. 水土保持学报, 2010, 24(1): 139-144.
- [27] 高佳, 陈学恩, 于华明, Li M. 黄河口海域潮汐、潮流、余流、切变锋数值模拟. 中国海洋大学学报, 2010, 40(S1): 41-48.
- [28] 贺文君. 潮汐作用对黄河三角洲盐沼湿地生态系统 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 交换的影响. 硕士学位论文. 中国科学院大学(中国科学院烟台海岸带研究所), 2018.
- [29] 黄国宏, 肖笃宁, 李玉祥, 陈冠雄, 杨玉成, 赵长伟. 芦苇湿地温室气体甲烷(CH<sub>4</sub>) 排放研究. 生态学报, 2001, 21(9): 1494-1497.
- [30] 王慧, 赵化德, 张世宇, 刘长安, 关道明. 碱蓬湿地 CH<sub>4</sub> 排放通量及影响因素研究. 海洋环境科学, 2012, 31(2): 173-175.
- [31] 曾从盛, 王维奇, 张林海, 林璐莹, 艾金泉, 章文龙. 闽江河口短叶荇菜潮汐湿地甲烷排放通量. 应用生态学报, 2010, 21(2): 500-504.
- [32] Holm Jr G O, Perez B C, McWhorter D E, Krauss K W, Johnson D J, Raynie R C, Killebrew C J. Ecosystem level methane fluxes from tidal freshwater and brackish marshes of the Mississippi River Delta: implications for coastal wetland carbon projects. Wetlands, 2016, 36(3): 401-413.
- [33] Chu H S, Chen J Q, Gottgens J F, Ouyang Z T, John R, Czajkowski K, Becker R. Net ecosystem methane and carbon dioxide exchanges in a Lake Erie coastal marsh and a nearby cropland. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2014, 119(5): 722-740.
- [34] 周文昌, 崔丽娟, 王义飞, 李伟, 康晓明. 若尔盖高原湿地不同微地貌区甲烷排放通量特征. 植物生态学报, 2016, 40(9): 902-911.
- [35] Wang D Q, Chen Z L, Xu S Y. Methane emission from Yangtze estuarine wetland, China. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2009, 114(G2): G02011.
- [36] Setia R, Marschner P, Baldock J, Chittleborough D. Is CO<sub>2</sub> evolution in saline soils affected by an osmotic effect and calcium carbonate?. Biology and Fertility of Soils, 2010, 46(8): 781-792.
- [37] 曾从盛, 王维奇, 仝川. 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. 地理研究, 2008, 27(6): 1321-1330.
- [38] Poffenbarger H J, Needelman B A, Megonigal J P. Salinity influence on methane emissions from tidal marshes. Wetlands, 2011, 31(5): 831-842.
- [39] Lee S C, Christen A, Black A T, Johnson M S, Jassal R S, Ketler R, Nesic Z, Merkens M. Annual greenhouse gas budget for a bog ecosystem undergoing restoration by rewetting. Biogeosciences, 2017, 14(11): 2799-2814.
- [40] Herbst M, Friberg T, Ringgaard R, Soegaard H. Interpreting the variations in atmospheric methane fluxes observed above a restored wetland. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(7): 841-853.
- [41] 栾军伟, 崔丽娟, 宋洪涛, 王义飞. 国外湿地生态系统碳循环研究进展. 湿地科学, 2012, 10(2): 235-242.
- [42] 孟伟庆, 吴绽蕾, 王中良. 湿地生态系统碳汇与碳源过程的控制因子和临界条件. 生态环境学报, 2011, 20(8/9): 1359-1366.
- [43] 仝川, 黄佳芳, 王维奇, 廖稷, 刘泽雄, 曾从盛. 闽江口半咸水芦苇潮汐沼泽湿地甲烷动态. 地理学报, 2012, 67(9): 1165-1180.
- [44] Ma K, Conrad R, Lu Y H. Dry/Wet cycles change the activity and population dynamics of methanotrophs in rice field soil. Applied and Environmental Microbiology, 2013, 79(16): 4932-4939.
- [45] 汪青, 刘敏, 侯立军, 程书波. 崇明东滩湿地 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的时空差异. 地理研究, 2010, 29(5): 935-946.
- [46] Santos I R, Eyre B D, Huettel M. The driving forces of porewater and groundwater flow in permeable coastal sediments: a review. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2012, 98: 1-15.
- [47] Heron S F, Ridd P V. The tidal flushing of multiple-loop animal burrows. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2008, 78(1): 135-144.
- [48] 袁晓敏, 杨继松, 刘凯, 郑冬梅, 郑佳玉, 刘强. 辽河口滨海湿地 CH<sub>4</sub> 排放特征及其影响因素. 生态学报, 2019, 39(5): 1-15.
- [49] Tong C, Wang W Q, Zeng C S, Marrs B. Methane (CH<sub>4</sub>) emission from a tidal marsh in the Min River estuary, southeast China. Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 2010, 45(4): 506-516.
- [50] 王德宣, 丁维新, 王毅勇. 若尔盖高原与三江平原沼泽湿地 CH<sub>4</sub> 排放差异的主要环境影响因素. 湿地科学, 2003, 1(1): 63-67.
- [51] Dinsmore K J, Skiba U M, Billett M F, Rees R M. Effect of water table on greenhouse gas emissions from peatland mesocosms. Plant and Soil, 2009, 318(1/2): 229-242.
- [52] Zhu X Y, Song C C, Chen W W, Zhang X H, Tao B X. Effects of water regimes on methane emissions in peatland and gley marsh. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 1-7.
- [53] Deborde J, Anschutz P, Guérin F, Poirier D, Marty D, Boucher G, Thouzeau G, Canton M, Abril G. Methane sources, sinks and fluxes in a temperate tidal lagoon: the Arcachon lagoon (SW France). Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010, 89(4): 256-266.
- [54] Segers R. Methane production and methane consumption: a review of processes underlying wetland methane fluxes. Biogeochemistry, 1998, 41(1): 23-51.