秋季黄河口滨岸潮滩湿地系统 CH4 通量特征及影响 因素研究

姜欢欢¹² 孙志高^{1*} 王玲玲¹² 牟晓杰¹²³ 孙万龙¹² 宋红丽¹² 孙文广¹

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所海岸带环境过程重点实验室,山东省海岸带环境过程重点实验室,烟台 264003; 2. 中国 科学院研究生院,北京 100049; 3. 中国科学院东北地理与农业生态研究所,长春 130012)

摘要: 2009 年秋季(9、10 月) 运用静态暗箱--气相色谱法对黄河口滨岸潮滩湿地系统的 CH₄ 排放通量进行了观测,并对影响 CH₄ 通量特征的关键因子进行了识别. 结果表明,在空间上,秋季高潮滩、中潮滩、低潮滩和光滩的 CH₄ 通量范围分别为 -0.206~1.264、-0.197~0.431、-0.125~0.659、-0.742~1.767 mg·(m²•h)⁻¹,均值为 0.089、0.038、0.197 和 0.169 mg·(m²•h)⁻¹ 均表现为 CH₄ 排放源,但源功能整体表现为低潮滩 > 光滩 > 高潮滩 > 中潮滩;在时间上 9、10 月的 CH₄ 排放 通量范围分别为 -0.444~1.767、-0.742~1.264 mg·(m²•h)⁻¹,均值为 0.218、0.028 mg·(m²•h)⁻¹ 除 9 月高潮滩表现为 CH₄ 弱汇外,其它潮滩的 CH₄ 通量均明显高于 10 月.研究发现,黄河口滨岸潮滩湿地环境因素变化比较复杂,CH₄ 排放通量 受多重因素控制.不同潮滩湿地在 9、10 月 CH₄ 排放通量的差异可能主要与温度(特别是气温)以及植被生长状况的差异有 关,而水盐条件和潮汐状况对潮滩湿地系统 CH₄ 通量特征的影响也不容忽视.

关键词:潮滩湿地;甲烷;通量特征;影响因素;黄河口;秋季

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012) 02-0565-09

Methane Fluxes and Controlling Factors in the Intertidal Zone of the Yellow River Estuary in Autumn

JIANG Huan-huan¹², SUN Zhi-gao¹, WANG Ling-ling¹², MOU Xiao-jie¹²³, SUN Wan-long¹², SONG Hong-li¹², SUN Wen-guang¹

(1. Key Laboratory of Coastal Environment Processes, Shandong Provincial Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China)

Abstract: The characteristics of methane (CH_4) fluxes from tidal wetlands of the Yellow River estuary were observed *in situ* with static-chamber and GC methods in September and October 2009, and the key factors affecting CH_4 fluxes were discussed. From the aspect of space, the CH_4 flux ranges in high tidal wetland, middle tidal wetland, low tidal wetland, bare flat are -0.206-1.264, -0.197-0.431, -0.125-0.659 and -0.742-1.767 mg·(m²•h)⁻¹, the day average fluxes are 0.089, 0.038, 0.197 and 0.169 mg·(m²•h)⁻¹, respectively, indicating that the tidal wetlands are the sources of CH_4 and the source function of CH_4 differed among the four study sites, in the order of low tidal wetland ecosystems are -0.444-1.767 and -0.742-1.264 mg·(m²•h)⁻¹, and the day average fluxes are 0.218 and 0.028 mg·(m²•h)⁻¹ in September and October, respectively. The CH_4 fluxes in each tidal wetland in September are higher than those in October except that the high tidal wetland acts as weak sink in September. Further studies indicate that the changes of environmental factors in the Yellow River estuary are complicated, and the CH_4 fluxes are affected by multiple factors. The differences of CH_4 fluxes characteristics among different tidal wetlands in autumn are probably related to temperature (especially atmospheric temperature) and vegetation growth status , while the effects of water or salinity condition and tide status on the CH_4 flux characteristics might not be ignored.

Key words: tidal wetland; methane; flux characteristic; controlling factor; Yellow River estuary; autumn

大气中 CO₂、CH₄ 等温室气体浓度升高导致的 全球气候变化是人类共同关注的全球环境问题之 -. CH₄ 作为仅次于 CO₂ 的重要温室气体,其对全
 球气候变暖的增温贡献已达 15%^[1,2]. 全球大气中

基金项目: 国家自然科学基金项目(40803023 41171424);国家海洋局海洋-大气化学与全球变化重点实验室基金项目(GCMAC1002);中国科 学院战略性先导科技专项(XDA05030404-2);山东省自然科学基金重点项目(ZR2010DZ001);中国科学院知识创新工程重要方向 项目(KZCX2-YW-223)

作者简介:姜欢欢(1986~),女,硕士研究生,主要研究方向为湿地生物地球化学,E-mail: hhjiang13@163.com * 通讯联系人,E-mail: zgsun@yic.ac.cn

收稿日期: 2011-04-08; 修订日期: 2011-06-20

的 CH_4 含量(体积分数) 值已从工业化前约 715 × 10^{-9} 增加到 20 世纪 90 年代初期的1 732 × 10^{-9} ,并 在 2005 年达到1 774 × 10^{-9} ,已远远超过了根据冰 芯记录得到的 65 万年以来含量的自然变化范围 ($320 \times 10^{-9} \sim 790 \times 10^{-9}$)^[3],其对于全球变暖的影 响日益成为各国政府普遍关注的科学问题. 因此、研 究 CH_4 的"源/汇"功能及其对全球变暖的影响有重 要意义.

湿地作为具有多种独特功能的生态系统 ,是 CH4 最重要的排放源. 据统计 ,全球湿地 CH4 年排 放估计值为 100~200 Tg^[4],占全球年 CH₄ 排放量 的 20% 左右^[5]. 我国湿地面积约有6 594万 hm²,占 世界湿地面积的 10%,位居亚洲第一位,世界第四 位. 目前国内学者对 CH₄ 排放的研究主要集中在人 工湿地——水稻田的探讨上^[6~8],对自然湿地的研 究也有较多涉及 但这些研究主要集中于三江平原 沼泽湿地^[9,10]、若尔盖高原湿地^[11,12]、闽江口湿 地[13~15]、长江口滨岸潮滩湿地[16,17]和南方红树林沼 泽^[18,19]等相关探讨上.黄河三角洲为我国暖温带保 存最完整、最广阔和最年轻的湿地生态系统 在北方 河口湿地中具有代表性. 目前,国内对黄河口滨海湿 地的研究主要集中在湿地生物多样性及保护^[20 21]、 湿地环境演变与退化^[22]、湿地生态系统恢复^[23]和湿 地生态价值评价[24]等方面,对生物地球化学的研究 还比较薄弱 而对温室气体的排放规律研究还鲜有报 道. 鉴于此 笔者于 2009 年秋季(9、10 月) 植物生长 末期对黄河口潮滩湿地的 CH₄ 通量特征进行了初步 研究 目的在于探讨不同潮滩湿地系统 CH4 的通量 特征差异,并识别影响其通量特征的关键因子,以期 为评估黄河三角洲滨海湿地生态系统 CH₄ 排放对大 气环境的影响提供科学依据 也为该区滨海湿地生物 地球化学的相关研究提供基础数据.

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于山东省黄河三角洲国家级自然保 护区内,试验于2009年9~10月在今黄河入海口北 部滨海潮滩湿地典型试验区内进行.黄河三角洲国 家级自然保护区(37°40′N~38°10′N,118°41′E~ 119°16′E)位于东营市境内,地处渤海之滨的黄河口 滨岸潮滩湿地由黄河携带大量泥沙在入海口处沉积 所形成.该保护区于1992年经国家林业局批准建 立,总面积为15.3万 hm²,是全国最大的河口三角 洲自然保护区,在世界范围河口湿地生态系统中具 有较强的代表性,主要保护黄河口新生湿地生态系 统和珍稀濒危鸟类.保护区属暖温带季风气候区,具 有明显的大陆性季风气候特点,雨热同期,四季分 明,冷热干湿界限极为明显.该区年平均气温 12.1℃,无霜期196 d,≥10℃的年积温约4300℃, 年均蒸发量1962 mm,年均降水量为551.6 mm, 70%的降水集中于7、8月.保护区的土壤类型主要 为隐域性潮土和盐土,主要植被类型为芦苇 (*Phragmites australis*)群落、芦苇-荻(*Triarrhena sacchariflora*)群落、穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)群落、柽柳(*Tamarix chinensis*)群落、翅碱 蓬(*Suaeda salsa*)群落及补血草(*Limoninum sinense*) 群落等.

1.2 样地选择与样品采集

在今黄河入海口北部依据水盐梯度和植被类型 确定了4个典型研究样地.自黄河口滨岸至潮滩,分 布的典型滨海湿地类型分别为翅碱蓬-芦苇湿地(高 潮滩)、翅碱蓬-柽柳湿地(中潮滩)、翅碱蓬湿地(低 潮滩)和光滩.野外观测时,在上述4个典型样地各 布设一个观测点位,每个点位3个重复,研究采用的 数据是基于3个平行采样箱数据的算术平均值.4 个点位的地理位置和土壤基本理化性质详见表1.

2009年9和10月下旬(24~26日),即潮滩植 被正处于成熟期(生长末期)时,对4个潮滩湿地的 CH4 通量进行了观测. CH4 气体采集采用静态暗箱-气相色谱法.采样箱由 0.4 mm 厚的铁皮制成,箱体 四周及顶部用白色泡沫包裹以确保采样时箱内温度 变化不大.采样箱采用标准式组合设计,由箱体和底 座两部分组成,箱体规格为50 cm×50 cm×100 cm, 底座规格为 50 cm × 50 cm × 20 cm. 采集样品时,采 样箱各部分之间均用水密封 防止气体外露和外界 气体进入.采样箱内装有搅气小风扇、温度传感器、 采气三通阀及气压平衡管.9、10月的观测均在白天 出露期进行,但在9月监测期间遇潮汐,受不规则半 日潮的影响,光滩出露时间短,监测时间从07:30~ 15:00 ,每 1.5 h 进行一次观测 ,共观测 6 次 ,其它潮 滩观测时间均从 07:30~16:30,共观测 7次.样品 采集采用 60 mL 塑料注射器 在 60 min 时间段内每 15 min 采集一次样品(共采集4个气体样品),采集 完毕后立即将气体样品置于 0.5 L 的铝塑复合气袋 中(化工部大连光明化工研究所生产).样品采集的 同时 同步观测的环境因子有土壤含水量、土壤电导 率(EC)、气温、箱温、地表温度、不同深度(5、10、 15 和 20 cm) 地温等.

		Table I Co	mparison of envir	onmental conditions	of soils at diffe	erent sampling sites		
潮滩	地理位置	电导率 /µS•cm ⁻¹	土壤温度 /℃	含水的体积分数 /%	TC /%	TN ∕mg∙kg ⁻¹	NO_3^N /mg•kg ⁻¹	NH4 ⁺ −N /mg•kg ⁻¹
高潮滩	37°45′93.6″N , 119°09′6.4″E	15.45 ± 1.44	21. 22 ± 3. 82	35. 28 ± 0. 68	1.22 ± 0.02	385. 89 ± 8. 19	1.31 ±0.39	3.05 ± 0.71
中潮滩	37°46′23.8″N , 119°09′8.7″E	13. 84 ±0. 81	21. 23 ±4. 31	34. 26 ± 0. 52	1.29±0.01	391. 36 ± 22. 94	1. 21 ± 0. 27	3.87 ± 1.06
低潮滩	37°46′73.1″N , 119°09′7.9″E	10. 38 ± 2. 08	20. 74 ± 7. 28	34. 67 ± 2. 22	1.27 ± 0.02	362. 53 ± 6. 29	1. 10 ± 0. 57	2.92 ± 0.80
光滩	37°46′89.0″N , 119°10′2.0″E	10. 85 ± 0. 44	20. 30 ± 6. 01	35. 76 ± 1. 71	1.56 ± 0.02	453. 15 ± 31. 41	1. 19 ± 0. 42	3.74 ±0.75

表1 观测点位土壤基本理化性质¹⁾

1) 表中数值为 MEAN ± S. D.

1.3 样品分析

样品采集后 36 h 内 在实验室用 Agilent 7890A 气相色谱仪进行分析. 60 min 内采集的 4 个气体样 品浓度与采样时间间隔存在相关关系,所有样品的 相关系数均在 *R*² > 0.95 时才视为有效.

1.4 通量计算与统计分析

CH₄ 排放通量采用下式进行计算:

$$J = \frac{dc}{dt} \times \frac{M}{V_0} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \times H$$

式中 J 为气体通量 [$mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$] dc/dt 为采样 时气体体积分数随时间变化的回归曲线斜率 M 为 CH_4 的摩尔质量($g \cdot mol^{-1}$) P 为采样点气压(Pa) , T 为采样时的绝对温度(K) $V_0 \cdot P_0 \cdot T_0$ 分别为标准 状态下的气体摩尔体积($mL \cdot mol^{-1}$)、空气气压(Pa) 和绝对温度(K) H 为地面(或水面) 以上采样箱高 度(m) J 的结果为正值表示气体排放到大气 ,负值 表示气体流入土壤或土壤吸收消耗大气中 CH_4 .

运用 Origin 7.5 进行计算和绘图 ,运用 SPSS 13.0 进行统计分析.

2 结果与讨论

2.1 环境温度变化

采样期间 9 月为阴天,10 月为晴天,但有微 风.图1为9、10 月不同潮滩湿地的环境温度变 化.据图可知 9、10 月采样当天的温度变化均比 较明显,其中气温和箱温的变化趋势较为一致. 具体来说 9 月除低潮滩的气温在10:30 取得最 高值,箱温在13:30 取得最高值外,高潮滩、中潮 滩、光滩的气温和箱温最高值出现时间一致,分 别在13:30、13:30、10:30 取得最高值.不同的 是,10 月高潮滩和中潮滩的气温和箱温在10:30 取得最高值,而低潮滩和光滩在13:30 取得最高 值.9、10 月地温(特别是 15 cm 和 20 cm) 最高 值的出现存在不同程度的滞后现象.比较而言 *9* 月的各温度参数均极显著大于 10 月(*P* < 0.01),表明9月的温度极显著高于10 月.

2.2 潮滩-大气界面 CH₄ 的排放通量及其变化特征 **2.2.1** 高潮滩

秋季高潮滩-大气界面的 CH_4 通量整体呈"排 放-吸收"变化特征(图 2),通量范围为 - 0.206 ~ 1.264 mg·(m²·h)⁻¹,均值为 0.089 mg·(m²·h)⁻¹, 变异系数为 417.88%,白天整体表现为 CH_4 排放 源.整体而言 9、10 月的 CH_4 通量除在 13:30 呈相 反变化趋势外,其它时刻均有相似变化特征,即在 07:30~10:30 表现为排放,12:00、15:00、16:30 表 现为吸收.具体来说,9 月的 CH_4 通量范围为 -0.206~0.168 mg·(m²·h)⁻¹,均值为 - 0.012 mg·(m²·h)⁻¹,其中排放峰出现在 10:30,吸收峰出 现在 16:30 整体表现为 CH_4 的弱汇.与之相比,10 月 的 CH_4 通量 范围 为 - 0.176~ 1.264 mg·(m²·h)⁻¹,均值为 0.190 mg·(m²·h)⁻¹,其中排 放峰出现在 09:00,吸收峰出现在 12:00,整体表现 为 CH_4 的较强排放源.

2.2.2 中潮滩

秋季中潮滩-大气界面的 CH₄ 通量整体呈 "吸 收-排放"趋势,但其变化无明显规律(图 2),通量范 围介于 - 0. 197 和 0. 431 mg·(m²•h)⁻¹之间,均值 为 0. 038 mg·(m²•h)⁻¹,变异系数为 474. 12% 整体 表现为 CH₄ 排放源. 具体而言 9 月的 CH₄ 通量范 围为 - 0. 162 ~ 0. 431 mg·(m²•h)⁻¹,均值为 0. 081 mg·(m²•h)⁻¹ 吸收峰出现在 12: 00,排放峰出现在 15: 00 整体表现为 CH₄ 排放源. 与之相比,10 月的 CH₄ 通量范围为 - 0. 197 ~ 0. 111 mg·(m²•h)⁻¹,均 值为 - 0. 005 mg·(m²•h)⁻¹,吸收峰和排放峰分别





Fig. 1 Changes of environment temperatures in different tidal wetlands in Autumn

在 09:00 和 12:00 整体表现为 CH₄ 的弱汇.

2.2.3 低潮滩

秋季低潮滩-大气界面的 CH₄ 通量范围介于 -0.125和 0.659 mg·(m²•h)⁻¹之间,通量均值为 0.197 mg·(m²•h)⁻¹,变异系数为 127.83%,整体表 现为 CH₄ 排放源(图 2).比较而言,9、10 月的 CH₄ 通量特征存在较大差异.就9 月而言,通量范围为 -0.002 ~ 0.659 mg·(m²•h)⁻¹,均值为 0.325 mg·(m²•h)⁻¹.除13:30表现为CH₄的弱汇外,其它 时刻均表现为CH₄排放源,且排放峰出现在10:30. 与之相比,10月的CH₄通量范围为-0.125~0.424 mg·(m²•h)⁻¹均值为0.069 mg·(m²•h)⁻¹,CH₄通 量呈"排放-吸收"交替变化特征,其排放峰和吸收峰 分别出现在07:30和16:30,且整体表现为CH₄弱



图 2 秋季不同潮滩湿地 CH₄ 排放通量变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of CH4 fluxes in different tidal wetlands in Autumn

排放源.

2.2.4 光滩

秋季光滩-大气界面的 CH4 通量范围为 -0.742 1.767 mg·(m²•h)⁻¹,均值为 0.169 mg·(m²·h)⁻¹,变异系数为406.94%,整体表现为 CH4 排放源(图 2). 总体而言 ,CH4 通量在 9、10 月 均呈"吸收-排放"交替变化特征,其在07:30、 09:00、13:30均同时表现为吸收或排放,而在 10:30、12:00、15:00 则呈相反变化趋势.具体而 言,9月的 CH4 通量范围为 - 0.444 ~ 1.767 mg·(m²•h)⁻¹ 均值为 0.480 mg·(m²•h)⁻¹ ,整体表 现为 CH4 的强排放源 ,CH4 排放量自上午开始逐渐 增加,并在10:30达到排放峰值,而吸收峰值出现在 下午 13: 30. 10 月的 CH₄ 通量范围为 - 0.742 ~ $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$, 均值为 0.119 _ 0.141 $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$ 整体表现为 CH₄ 的汇.

2.2.5 CH₄ 通量的空间差异

图 3 为秋季不同潮滩湿地白天 CH_4 通量均值 之间的空间差异.数据是基于白天各个观测时刻数 据的算术平均值(高、中、低潮滩 n = 7;光滩 n = 6), 据图 3 可知 9 月除高潮滩表现为 CH_4 的较弱吸收 外 ,其它潮滩存在明显的 CH_4 排放梯度变化 ,整体 表现为光滩 > 低潮滩 > 中潮滩. 与之相比 ,10 月的 CH_4 排放表现为高潮滩 > 低潮滩 ,而 CH_4 吸收表现 为光滩 > 中潮滩 ,但中潮滩对 CH_4 的吸收作用很 弱. 总体来说 秋季黄河口滨岸潮滩湿地系统表现为 CH_4 的排放源 ,但其源功能整体表现为低潮滩 > 光



569

滩 > 高潮滩 > 中潮滩.

3 影响 CH₄ 通量的环境因子分析

3.1 温度

温度主要通过影响产 CH4 菌的活性和 CH4 的 氧化输送来最终影响到 CH4 的排放 温度的变化可 使微生物由休眠状态快速转化为活化状态,从而彻 底改变反应速率[25]. 温度也是日周期内变化最为明 显的环境因子.通过对9、10月CH,通量与气温、箱 温以及不同深度地温的相关分析发现 除9月中潮 滩和光滩的各温度与 CH₄ 通量均呈正相关、10 月 低潮滩的各温度与 CH₄ 通量均呈负相关外,其它情 况下的相关性并不一致(或正或负). 总体而言 (仅9 月中潮滩的 CH₄ 通量与 10 cm、15 cm 地温显著正 相关(r 分别为 0.845 和 0.779, P < 0.05), 而其它 相关性并不显著(表 2). 由图 1(b) 和图 2(b) 也可 看出 9 月中潮滩 CH₄ 最大通量出现的时刻与 10 cm 地温最大值出现的时刻正好吻合.

已有研究表明,产CH₄菌发挥作用的最适宜温 度为 25~30℃^[26].本研究中,9、10 月不同潮滩各 层地温的均值分别为 24.6℃和 17.1℃ 9 月的土壤 温度更接近干产 CH, 的最适温度, 而这可能是9月 的 CH, 排放通量总体大干 10 月的重要原因. 整体 而言 通过综合9、10 月的 CH₄ 通量与各热量指标 进行相关分析可知 秋季 CH4 通量与气温和箱温均 呈极显著正相关关系(P<0.01) 而与地表温度及5 cm 地温呈显著正相关关系(P < 0.05),说明温度对 于秋季潮滩湿地的 CH₄ 排放具有一定的促进作用. 表 2 温度与 CH_4 通量的 Pearson 相关系数及显著性分析

	Table 2	Pearson correla	tion coefficients a	and significant ar	nalysis between C	H ₄ fluxes and the	e temperatures	
潮滩	月份	气温	地表温度	5 cm 地温	10 cm 地温	15 cm 地温	20 cm 地温	箱温
三油滩	9 ²⁾	0.255	0.290	- 0. 269	-0.503	-0.607	-0.692	-0.056
同州州	10 ²⁾	0.310	-0.117	- 0. 591	-0.657	-0.657	-0.582	0.049
中海海	9 ²⁾	0.520	0.467	0.562	0.845 ^{* 1)}	0. 779 ^{* 1)}	0.732	0.639
中角州	10 ²⁾	-0.227	-0.061	0.354	0.578	0.556	0.532	-0.320
们动力	9 ²⁾	0.201	-0.031	-0.316	-0.311	-0.200	-0.725	-0.141
11.5 /#/] //E	10 ²⁾	-0.081	-0.329	- 0. 108	-0.256	-0.355	-0.320	-0.360
光滩	9 ³⁾	0.788	0.877	0. 527	0.326	0.049	0.036	0.706
	$10^{4)}$	0.582	0.601	0.568	0.516	-0.041	0.308	0.602

02	Pearcon	correlation	coefficients	and significan	t analycic between	CH	fluxer and	the temperatures

1) * 表示 P < 0.05 显著水平; 2) n = 7; 3) n = 5; 4) n = 6

3.2 水分

由于 CH₄ 是土壤有机物厌氧分解过程中产生 的^[27] 因此土壤水分的多少是控制 CH₄ 产生所需厌 氧环境的关键因子,它直接影响O2 可利用率、气体 扩散速率和微生物活性^[28],并间接影响与 CH₄ 产生 相关的土壤 pH 值、Eh 等因素 ,最终影响到 CH₄ 的 产生与扩散.本研究发现 9 月除光滩的 CH₄ 排放通 量与土壤含水量(包括土壤表层、地下5 cm、10 cm 含水量) 均呈正相关外,其它潮滩湿地的 CH4 通量 与土壤含水量均呈负相关;而10月各潮滩湿地的 CH4 排放通量与表层、5 cm 土壤含水量呈正相关, 而与 10 cm 土壤含水量呈负相关,且各相关性均不 显著(P>0.05).任万辉等^[6]认为,土壤中CH₄的产 生一般随水分含量的增加而增加,因为 CH4 产生所 需的厌氧环境在很大程度上决定于土壤水分状况, 水分增加促进了厌氧环境的形成. 此外,上官行健 等^[7]对稻田土壤、叶勇等^[18]对研究厦门红树林的相 关研究也得到类似结论.本研究中 CH4 通量与土壤 含水量的相关性并不显著可能是由于对于任何一个

潮滩湿地而言,其含水量变化不大,由此导致其对 CH4 通量的影响并不明显,而这与王维奇^[15]的研究 结果相一致. 虽然各潮滩的 CH4 排放通量变化与土 壤水分均未呈现出显著相关关系,但综合各个潮滩 秋季 CH₄ 通量的均值可知 ,低潮滩和光滩明显高于 中潮滩和高潮滩 即靠近海的潮滩 CH4 通量高于靠 陆的潮滩,此结果与叶勇等^[29]的研究得出的土壤 CH₄产生量外滩>中滩>内滩的滩面变化趋势一 致.由于各个潮滩在其它物理性质方面还存在差异, 所以只能推测水分可能具有某种效应,但并不能确 定 CH₄ 通量的差异是否为水分差异所致.

此外 CH₄ 排放通量还可能受到潮汐引起的地 表水深变化的影响.就9月来说,采样当天中午出现 潮汐现象,低潮滩在13:30时由于涨潮引起的水深 为 11.4 cm 而光滩在 12:00 时水深即达 4.0 cm. 涨 潮后二者的通量均表现出明显变化(图2). 就低潮 滩而言 ,CH4 通量特征由 12:00 的排放转为 13:30 的微弱吸收 之后排放通量迅速增加 原因可能与低 潮滩距海较远潮水上升慢下降快且持续时间较短有

关. 涨潮后,土壤表面较深的滞水可能阻碍了 CH₄ 向大气的排放,故通量立即变小;而当土壤被潮水 淹没一段时间后,含氧量降低,还原反应占主导地 位,实际上更适于 CH₄ 的产生^[16].当潮水退去后,土 壤中产生的大量 CH₄ 可以释放出来,故表现为更大 的排放通量.另外,由于涨潮而引起的土壤表层温度 从 12:00 的 29.0℃迅速降至 13:30 的 24.1℃,而这 可能是涨潮初期引起的 CH₄ 排放减少的间接原因. 与之相比,光滩在涨潮初期(12:00) 的 CH₄ 排放通 量明显降低,但当潮水较大地表滞水较深时,CH₄ 通 量在 13:30~15:00 一直表现为吸收,原因可能是由 于光滩距海较近潮汐涨落变化比较缓慢,即地表潮 水上升快下降慢且慢持续时间长有关,长时间和较 深的地表滞水严重阻碍了 CH₄ 向大气的排放.

3.3 盐分

除了温度和水分外 盐分作为影响 CH₄ 排放的 重要因子 国内外也有较多相关报道. 盐度可通过影 响产 CH₄ 细菌的活性来间接影响 CH₄ 通量的变化. 本研究表明 9、10 月不同潮滩湿地的 CH4 通量仅 与 5 cm 土层的盐度(以 EC 表征) 呈负相关 而与 10 cm、15 cm 土层的盐度呈正相关,但相关性均不显 著(*P*>0.05),说明土壤表层较高的盐分在一定程 度上抑制了 CH₄ 的产生, 而较深土层较低的盐分可 能不足以对 CH₄ 产生抑制作用. 现有大量研究发 现,土壤盐分可能抑制 CH₄ 的产生^[13,19],高的 CH₄ 产生率几乎总出现在低盐分条件下^[30]. Denier 等^[31]、Mishra 等^[32]的研究也表明,向试验土壤中添 加盐分后 CH₄ 的产生量明显降低. 曾从盛等^[14] 的 研究还发现 随着盐分添加浓度的增加 CH4 产生潜 力逐渐降低. 较高盐分对 CH4 产生抑制的主要原因 在于 盐分增加提高了土壤中电子受体的数量 使得 CH4 产生菌在竞争底物乙酸和氢时处于劣势,只有 当电子受体还原待尽时才会有 CH4 产生,同时盐分 过多也可能限制产 CH4 微生物的活性^[14]. 但也有研 究认为 盐分增加导致的电子受体对 CH4 产生菌产 生毒害作用是抑制 CH, 产生的主要机制^[33]. 本研究 中 盐分与 CH, 排放通量之间的相关性均不显著, 说明盐分可能并不是影响不同潮滩湿地秋季 CH4 排放通量的重要因素.

3.4 植被

采样点的主要植被类型为碱蓬,属盐生维管束 植物,它可以通过影响 CH4 的产生、氧化、传输和排 放来影响 CH4 的通量变化.维管束植物光合作用的 产物是 CH4 产生的主要碳源,植物根系的周转和碳

物质的分泌为产 CH4 细菌提供底物 /维管束植物根 际氧化是 CH₄ 氧化最主要的途径^[34]. 湿地 CH₄ 是 从土壤-水-植物体系向大气进行传输的[35],而植物 传输是植物生长区域 CH4 传输的主要形式(可将 50%~90%土壤中产生的 CH₄ 传输到大气)^[34]. Sebacher 等^[36]研究表明,滨海湿地的 Thphalatifolia 群落中,超过50%的进入大气的CH4是通过植物 对流输送的. 可见,植物可通过多方面来影响 CH4 通量 而不同植物产生的效应也有所不同. 本研究 中 秋季的 CH₄ 排放通量总体表现为低潮滩 > 光滩 >高潮滩>中潮滩(2.2.5节).由于9、10月为高 潮滩碱蓬的生长末期 大部分植被已经枯萎 但低潮 滩的碱蓬此间正值成熟期 其生长依然比较旺盛 从 而更有利于 CH₄ 排放,而这也可能是导致低潮滩 CH4 通量较大的重要原因. 此外,光滩虽然无植被覆 盖但通量却较高 部分原因可能在于 CH4 产生后可 直接通过土壤或水体排放到大气的缘故.

3.5 CH₄ 排放通量环境因子识别

为了探讨影响 CH_4 通量的可能主控因素,本研 究对黄河口 4 个潮滩湿地秋季的 13 个环境因素进 行了主成分分析(n = 53).选取的环境因素包括气 温、不同深度地温(0, 5, 10, 15, 20 cm)、箱温、不同 土层含水量(0, 5, 10 cm)、不同土层电导率(5, 10, 15 cm). 依据主成分分析原理,选取了特征值 > 1 的 前 3 个主成分 C1 ,C2 ,C3(表 3) ,其累积贡献率达到 了 89.62%,较好地反映了秋季黄河口滨岸潮滩湿 地的环境特征.

表3 特征值及主成分贡献率

Table 3	Eigenvalues and prin	ncipal component o	contribution rates
主成分	- 特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
C1	7.027	54.054	54.054
C2	2.832	21.787	75.841
C3	1.792	13.783	89.624
C4	0.603	4.640	94.264
C5	0. 251	1.935	96. 199
C6	0. 165	1.267	97.466
C7	0.115	0.882	98.348
C8	0.091	0.697	99.045
С9	0.049	0.378	99.424
C10	0.045	0.347	99.771
C11	0.019	0.144	99.915
C12	0.007	0.055	99.969
C13	0.004	0.031	100.00

根据主成分分析结果(表4),第一主成分 C₁ 与 X₁ ~ X₇ 等 7 个因素呈较大正相关,而这些因素均与 生态系统的热量状况有关,因此可以看作是热量条 件的代表.第二主成分 $C_2 与 X_9 ~ X_{13}$ 呈较大正相关, 而这些因素均与生态系统的水分和盐分状况有关, 可以看作是水盐条件的代表.第三主成分 C_3 比较复 杂,与 $X_8 X_{10}$ 呈较大正相关,而与 $X_{11} X_{12}$ 呈较大负 相关,而这些因素也可以看作是水盐条件的代表.对 潮滩湿地选取每个主成分中相关系数绝对值较大者 作为代表,通过逐步引入-剔除法建立这些环境因素 与 CH_4 排放通量的多元回归方程:

$$Y = -0.552 + 0.031X_{1}$$

(R = 0.360, n = 53, P = 0.039)

式中, *Y*为 CH₄ 通量 *X*₁ 为气温. 表4 主成分载荷

,	Table 4	Load of p	orincipal components		
び接回フ			主成分		
环境 囚士		C_1	C ₂	C ₃	
气温 X ₁		0. 921	-0.209	0.126	
地表温度 X ₂		0.902	-0.180	0.087	
5 cm 地温 X ₃		0.975	-0.167	0.036	
10 cm 地温 X ₄		0.980	-0.056	0.038	
15 cm 地温 X ₅		0.952	-0.125	0.007	
20 cm 地温 X ₆		0.958	-0.050	- 0. 020	
箱温 X ₇		0.952	-0.151	0.117	
地表含水量 X_8		0.429	0.426	0.645	
5 cm 含水量 X ₉		0.068	0.787	0.501	
10 cm 含水量 X ₁	0	-0.264	0.632	0.614	
5 cm 电导率 X ₁₁		0.263	0.669	-0.581	
10 cm 电导率 X ₁	2	0.395	0.703	-0.518	
15 cm 电导率 X ₁	3	0.488	0.737	-0.320	

环境因素中只有气温进入回归方程,说明气温对 秋季黄河口潮滩湿地系统 CH₄ 排放具有显著影响, 而这与 3.1 节得出的秋季 CH₄ 通量与气温呈显著正 相关的结论相一致,回归分析还发现,其它因素对 CH₄ 排放通量虽有一定影响但均未达到显著水平.

4 结论

(1) 在空间上,秋季高潮滩、中潮滩、低潮滩和 光滩的 CH_4 通量均值分别为 0. 089、0. 038、0. 197 和 0. 169 mg·(m²·h)⁻¹,均表现为 CH_4 排放源,但 源功能整体表现为低潮滩 > 光滩 > 高潮滩 > 中 潮滩.

(2) 在时间上 9、10 月份潮滩湿地的 CH₄ 排放
通量范围分别为 - 0.444 ~ 1.767 mg·(m²•h)⁻¹、
-0.742 ~ 1.264 mg·(m²•h)⁻¹,均值为 0.218 mg·(m²•h)⁻¹、0.028 mg·(m²•h)⁻¹ 除9月高潮滩
表现为 CH₄ 弱汇外 其它潮滩的 CH₄ 通量均明显高于 10 月.

(3) 黄河口滨岸潮滩湿地的环境变化比较复

杂, CH_4 排放通量受多重因素控制. 秋季不同潮滩湿 地 CH_4 排放通量的差异可能主要与温度以及植被 生长状况的差异有关,其中气温与 CH_4 通量呈显著 正相关关系($Y = -0.552 + 0.031X_1$, R = 0.360, n= 53, P = 0.039),而水盐条件和潮汐状况对 CH_4 排放通量的影响也不容忽视.

参考文献:

- [1] Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect [J]. Science, 1990, 248 (4960): 1217– 1219.
- [2] 宋文质,王少彬,苏维瀚,等. 我国农田土壤的主要温室气体 CO₂、CH₄和 N₂O 排放研究 [J]. 环境科学,1996,17 (1):85-88.
- [3] IPCC. Changes in atmospheric constituents and in radioactive forcing [A]. In: Climate change: the physical science basis [C]. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2007.
- [4] 王德宣,丁维新,王毅勇.若尔盖高原与三江平原沼泽湿地 CH₄ 排放差异的主要环境影响因素[J].湿地科学,2003,1
 (1):63-67.
- [5] Ding W X , Cai Z C , Wang D X. Preliminary budget of methane emissions from natural wetlands in China [J]. Atmospheric Environment , 2004 , 38(5): 751–759.
- [6] 任万辉,许黎,王振会.中国稻田甲烷产生和排放研究 I.
 产生和排放机理及其影响因子 [J]. 气象,2004,30(6):3-7.
- [7] 上官行健, 王明星, 陈德章, 等. 稻田土壤中的 CH₄ 产生 [J]. 地球科学进展, 1993, **8**(5): 1-12.
- [8] 彭世章,李道西,徐俊增,等.节水灌溉模式对稻田 CH₄ 排 放规律的影响[J].环境科学,2007,28(1):9-13.
- [9] 杨继松,刘景双,王金达,等.三江平原生长季沼泽湿地 CH₄、N₂O排放及其影响因素[J].植物生态学报,2006,**30** (3):432-440.
- [10] Song C C , Xu X F , Tian H Q , et al. Ecosystem-atmosphere exchange of CH₄ and N₂O and ecosystem respiration in wetlands in the Sanjiang Plain , Northeastern China [J]. Global Change Biology , 2009 , 15(3): 692–705.
- [11] 王德宣,吕宪国,丁维新,等. 若尔盖高原沼泽湿地 CH₄ 排 放研究 [J]. 地球科学进展,2002,17(16): 877-880.
- [12] 姚守平. 若尔盖高原花湖湖滨湿地甲烷排放研究 [D]. 成都: 中国科学院研究生院成都生物研究所,2007.
- [13] 王维奇,曾从盛, 仝川.水、盐梯度及外来植物入侵对河口湿 地土壤甲烷产生潜力的影响[J].农业系统科学与综合研 究, 2009, 25(4):481-486.
- [14] 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[J].地理研究, 2008, 27(6): 1321-1330.
- [15] 王维奇. 闽江河口芦苇湿地甲烷排放及其主要环境影响因子 分析 [D]. 福州: 福建师范大学,2008.

- [16] 汪青,刘敏,侯立军,等.崇明东滩湿地CO₂、CH₄和N₂O排 放的时空差异[J].地理研究,2010,29(5):935-946.
- [17] 王东启,陈振楼,王军,等.夏季长江口潮间带 CH₄、CO₂和 N₂O 通量特征 [J]. 地球化学,2007,**36**(1):78-88.
- [18] 叶勇,卢昌义,谭凤仪,等. 红树林湿地土壤 CH₄产生率及 其土壤理化因素影响的研究 [J].土壤学报,2000,37(1): 77-84.
- [19] 卢昌义,叶勇,林鹏,等. 海南海莲红树林土壤 CH₄ 的产生
 及其某些影响因素 [J]. 海洋学报,1998,20(6): 132-138.
- [20] 李政海,王海梅,刘书润,等.黄河三角洲生物多样性分析 [J]. 生态环境,2006,15(3):577-582.
- [21] 梁玉,房用,王月海,等.黄河三角洲湿地不同植被恢复类型对植被多样性的影响[J].东北林业大学学报,2008,36 (9):48-50.
- [22] 张晓龙.现代黄河三角洲滨海湿地环境演变及退化研究[D].青岛:中国海洋大学,2005.
- [23] 黄翀,刘高焕,王新功,等.不同补水条件下黄河三角洲湿 地恢复情景模拟[J].地理研究,2010,29(11):2026-2034.
- [24] 刘庆,李伟,陆兆华.基于遥感与 GIS 的黄河三角洲绿色空间生态服务价值评估 [J].生态环境学报,2010,19(8): 1838-1843.
- [25] 丁维新,蔡祖聪. 温度对甲烷产生和氧化的影响 [J]. 应用 生态学报,2003,14(4):604-608.
- [26] 丁维新,蔡祖聪. 土壤有机质和外源有机物对甲烷产生的影响 [J]. 生态学报,2002,22(10): 1672-1679.
- [27] Wassmann R, Neue H U, Bueno C, et al. Methane production capacities of different rice soils derived from inherent and exogenous substrates [J]. Plant and soil, 1998, 203(2): 227-

237.

- [28] Hirota M, Senga Y, Seike Y, et al. Fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide in two contrastive fringing zones of coastal lagoon, Lake Nakaumi, Japan [J]. Chemosphere, 2007, 68(3): 597-603.
- [29] 叶勇,卢昌义,林鹏. 厦门东屿白骨壤林土壤甲烷的产生量、 氧化量、传输率与库量[J]. 台湾海峡,2001,20(2):236-244.
- [30] Supparattanapan S , Saenjan P , Quantin C , et al. Salinity and organic amendment effects on methane emission from a rain-fed saline paddy field [J]. Soil Science & Plant Nutrition ,2009 ,55 (1): 142–149.
- [31] Denier van der Gon H A C , Neue H U. Methane emission from a wetland rice field as affected by salinity [J]. Plant and Soil , 1995 , 170(2): 307–313.
- [32] Mishra S R , Pattnaik P , Sethunathan N , et al. Anion-Mediated salinity affecting methane production in a flooded alluvial soil [J]. Geomicrobiology Journal , 2003 , 20(6): 579–586.
- [33] Chidthaisong A, Conrad R. 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, 2000, 31(1): 73-86.
- [34] 段晓男,王效科,欧阳志云.维管植物对自然湿地甲烷排放 的影响[J].生态学报,2005,25(12):3375-3382.
- [35] 陈槐,周舜,吴宁,等.湿地甲烷的产生、氧化及排放通量研 究进展[J].应用于环境生物学报,2006,12(5):726-733.
- [36] Sebacher D I, Harriss R C, Bartlett K B. Methane emissions to the atmosphere through aquatic plants [J]. Journal of Environmental Quality, 1985, 14(1): 40-46.