

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0048

杨平,何清华,全川.2015.闽江口潮汐沼泽湿地土壤甲烷产生对温度变化的响应[J].环境科学学报,35(9):2957-2963

Yang P, He Q H, Tong C. 2015. Responses of methane production to temperature in tidal marshes soil of the Min River Estuary[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 35(9): 2957-2963

## 闽江口潮汐沼泽湿地土壤甲烷产生对温度变化的响应

杨平,何清华,全川\*

福建师范大学亚热带湿地研究中心, 湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室, 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

收稿日期: 2014-10-25 修回日期: 2015-02-03 录用日期: 2015-02-03

**摘要:** 2012年8月,采集闽江口鱗鱼滩3个典型潮汐沼泽植被带0~30 cm土壤样品进行15 d室内厌氧培养实验,通过测定不同培养温度(20、30和40℃)下土壤甲烷产生潜力,探讨了不同沼泽植被带土壤甲烷产生潜力对温度变化的响应,并探讨了温度和植被类型对土壤甲烷产生的影响。结果表明,20℃时短叶茳茅、芦苇和互花米草沼泽湿地土壤甲烷产生潜力均值分别为0.034、0.057和0.608  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ,30℃时其均值分别为0.127、0.402和0.928  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ;40℃时其均值分别为0.608、1.144和2.447  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。随温度升高,3个沼泽植被带土壤甲烷产生潜力均表现为显著的指数增长趋势,40℃培养条件下的土壤甲烷产生潜力的累积量显著高于20℃和30℃( $p<0.05$ );温度升高对外来入侵种互花米草(*Spartina alterniflora*)沼泽湿地土壤甲烷产生潜力的促进作用最明显;温度和植被类型对河口区潮汐沼泽湿地土壤甲烷产生潜力均具有显著影响( $p<0.001$ ),且这两个因素之间存在显著的交互效应( $p<0.001$ )。

**关键词:** 甲烷产生潜力;温度;植被类型;沼泽湿地;闽江河口

文章编号:0253-2468(2015)09-2957-07 中图分类号:X53 文献标识码:A

## Responses of methane production to temperature in tidal marshes soil of the Min River Estuary

YANG Ping, HE Qinghua, TONG Chuan\*

Research Centre of Wetlands in Subtropical Region, Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process of Ministry of Education, School of Geographical Sciences, Fujian Normal Universities, Fuzhou 350007

Received 25 October 2014; received in revised form 3 February 2015; accepted 3 February 2015

**Abstract:** Soil samples (0~30 cm) from three typical tidal marsh ecosystems, dominated by *Cyperus malaccensis*, *Phragmites australis* and *Spartina alterniflora*, respectively, of the Min River estuary were collected in August 2012, and soil methane production potentials were determined using anaerobic incubation method. There was a significant exponential correlation between methane production potential and soil temperature. At 20℃, the averaged soil methane production potentials of three marsh vegetation zones were 0.034, 0.057 and 0.608  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ , respectively. At 30℃, the averaged soils methane production potential were 0.127, 0.402 and 0.928  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ , respectively. At 40℃, the averaged methane production potential of soils were 0.608, 1.144 and 2.447  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ , respectively. The averaged methane production potentials were significantly higher at 40℃ than those at 20℃ and 30℃ ( $p<0.05$ ). Moreover, the accumulated soil methane production potentials were significantly higher in the *S. alterniflora* marsh zone than that in the *C. malaccensis* marsh and the *P. australis* marsh in every incubation temperatures. Temperature and vegetation type had significant effects on methane production potential ( $p<0.001$ ), with a significant interaction between two parameters ( $p<0.05$ ).

**Keywords:** methane production potential; temperature; vegetation type; tidal wetland; Min River Estuary

### 1 引言 (Introduction)

气候变暖是当今倍受关注的全球性重大环境

问题之一,温室气体排放量不断增加是导致这种变化的重要原因(IPCC, 2013)。甲烷作为大气中仅次于二氧化碳的第二大温室气体,其浓度虽比二氧化

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(No. 41371127); 福建师范大学校级创新团队项目(No. IRTL1205); 福建省基本科研专项重点项目(No. 2014R1034-1)

**Supported by** the National Natural Science Foundation of China (No. 41371127), the Program for Innovative Research Team of Fujian Normal University (No. IRTL1205) and the Key Sciences and Technology Project of Fujian Province (No. 2014R1034-1)

**作者简介:** 杨平(1986—),男,E-mail: yangping528@sina.cn; \* 通讯作者(责任作者), E-mail: tongch@finu.edu.cn

**Biography:** YANG Ping(1986—), male, E-mail: yangping528@sina.cn; \* **Corresponding author**, E-mail: tongch@finu.edu.cn

碳低,但在 100 年时间尺度内其单分子增温潜势是二氧化碳的 25 倍(Tian *et al.*, 2012),对气候变暖的贡献率达 20%左右(沈李东等, 2011; IPCC, 2013).天然湿地作为全球大气甲烷的主要排放源而受关注,每年向大气排放的甲烷为 187~224 Tg,占全球甲烷总排放量的 15%~40%(IPCC, 2013).天然湿地甲烷排放因存在很大的空间变异及其不可预测性,甲烷产生及其影响因子的研究成为当前天然湿地甲烷过程研究的热点(刘德燕和丁维新, 2011; Gonsalves *et al.*, 2011; Sutton-Grier and Megonigal, 2011).

温度作为调节和控制湿地土壤甲烷产生的关键因子,可通过改变产甲烷菌群落结构、微生物活性和有机物质分解等途径调节产甲烷过程(刘德燕和丁维新, 2011; Inglett *et al.*, 2012).植物可通过根系分泌物和脱落物尤其是残留物为产甲烷菌提供底物,对湿地甲烷产生也有着深刻影响(Galand *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 2011).国内外单独就温度变化或不同植被类型下湿地甲烷产生的研究已给予充分关注(van Hulzen *et al.*, 1999; 丁维新和蔡祖聪, 2003; Galand *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2011; Yu *et al.*, 2013),但关于不同植被类型天然湿地甲烷产生对温度变化响应的研究相对较少(Inglett *et al.*, 2012),尤其对全球变化较敏感的亚热带河口潮汐湿地的研究甚少(Zeleke *et al.*, 2013).积极开展该领域的研究对于深化理解天然湿地甲烷排放空间变异的机理具有一定理论价值和现实意义.

闽江河口湿地是中国东南沿海具有重要代表性的亚热带河口潮汐沼泽湿地之一,区域内主要优势植物为芦苇(*Phragmites australis*)、短叶荳苳

(*Cyperus malaccensis*)和互花米草(*Spartina alterniflora*),为探讨不同沼泽植被带土壤甲烷产生速率对温度变化响应提供了较为适宜的场所.本研究以该区域面积最大的鱗鱼滩湿地为研究对象,采集 3 个不同优势沼泽植物群落湿地土壤,在 20、30 和 40 °C 温度下进行 15 d 室内厌氧培养实验,探讨了不同沼泽植被带土壤甲烷产生潜力对温度变化的响应.研究结果为今后深入理解亚热带河口潮汐沼泽湿地不同植被带土壤甲烷产生与排放过程对未来气候变暖的响应以及评估该类型湿地碳汇/源功能等提供基础数据和参考价值.

## 2 材料与方法 (Materials and methods)

### 2.1 研究区概况

研究区域位于闽江河口区面积最大的鱗鱼滩湿地(119°34'12"~119°40'40" E, 26°00'36"~26°03'42" N),面积 3120 hm<sup>2</sup>.受中亚热带海洋性季风影响,气候温暖湿润,年平均气温 19.7 °C,年均降水日 153 d,年均降水量 1346 mm,降水主要集中于 3~9 月(郑彩虹等, 2006).研究区域潮汐属于正规半日潮,水源包括天然降水、河水和潮水.该区域表层土壤温度年变化范围较大(10.5~34.5 °C),年平均土温为 21.3 °C,夏季月平均土温为 30.2 °C(姚顺, 2010).

实验样地位于鱗鱼滩湿地西部,由堤岸向海方向依次分布着芦苇(*P. australis*)、短叶荳苳(*C. malaccensis*)和互花米草(*S. alterniflora*)沼泽植被带,所占比例分别为 15%、25%和 60%,3 个植被带群落结构简单,均为单一种群落.以上 3 个沼泽植被带土壤基本理化性质见表 1.

表 1 实验样地土壤理化性质(金玉凤, 2011)

Table 1 Soil physiochemical properties of each study site in the Min River estuary

植被类型	pH	电导率/ (mS·cm <sup>-1</sup> )	TN/ (g·kg <sup>-1</sup> )	DOC/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	SOC/ (g·kg <sup>-1</sup> )	土壤质地		
						粘粒	粉粒	沙粒
短叶荳苳沼泽 <i>C. malaccensis</i>	5.96±0.13 <sup>a</sup>	0.82±0.03 <sup>a</sup>	0.59±0.04 <sup>a</sup>	79.05±40.44 <sup>a</sup>	15.47±1.02 <sup>a</sup>	10.39%±1.50% <sup>a</sup>	60.63%±6.08% <sup>a</sup>	31.03%±10.87% <sup>a</sup>
芦苇沼泽 <i>P. australis</i>	5.40±0.11 <sup>b</sup>	0.83±0.03 <sup>a</sup>	0.83±0.05 <sup>b</sup>	24.69±4.88 <sup>b</sup>	22.32±1.90 <sup>b</sup>	11.27%±2.11% <sup>a</sup>	63.29%±6.38% <sup>a</sup>	25.44%±7.64% <sup>a</sup>
互花米草沼 <i>S. alterniflora</i>	6.15±0.20 <sup>c</sup>	0.69±0.06 <sup>b</sup>	0.58±0.02 <sup>a</sup>	81.65±22.29 <sup>a</sup>	15.56±0.97 <sup>a</sup>	10.81%±0.91% <sup>a</sup>	59.20%±2.75% <sup>a</sup>	29.97%±3.13% <sup>a</sup>

注:1)表中数据为:均值±标准误差,土壤深度为 0~30 cm,样本数  $n = 9$ ; 2)表中不同字母表示在 0.05 水平上差异显著.

### 2.2 样品采集

2012 年 8 月在堤岸向海方向设置 1 个样线穿过芦苇、短叶荳苳和互花米草沼泽植被带.在每个植

被带内的样线中部间隔 10 m 处设置 1 个土壤采样点,每个植被带共 3 个土壤采样点(图 1).每个采样点 3 个重复,这样每个植被带共 9 个土芯.用长

100 cm、内径为 5.5 cm 的不锈钢土壤采集器钻取 0~30 cm 深的土芯,按 5 cm 间隔分层(每层 3 个重复),并将各段土芯的土壤按原始形态直接装入自

制培养瓶内(150 mL),密封后立刻送回实验室进行厌氧培养实验。

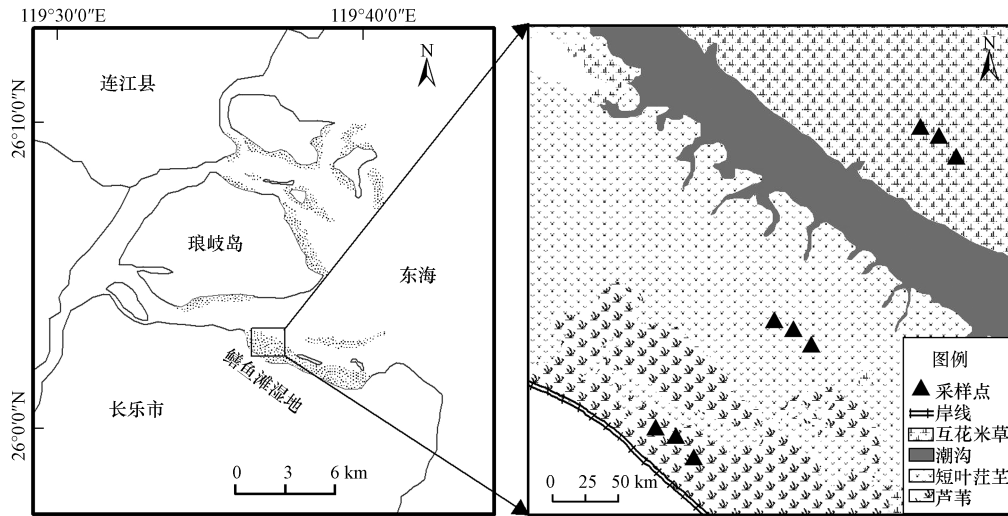


图 1 研究区和采样点位置图

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

### 2.3 甲烷产生的厌氧培养实验

每个培养瓶加入 20 mL 去离子水淹没土样,用橡皮塞和 704 硅胶密封培养瓶口,通过向瓶内充入高纯  $N_2$  实现厌氧环境。随后,将培养瓶分别置于 20 °C、30 °C 和 40 °C (每个温度下 3 个重复)的恒温培养箱连续培养 15 d。培养期间,每天采集 1 次气样,每次用注射器抽取培养瓶上部空间的气体 3 mL 进行分析。每次抽完气体后,重新补上 3 mL 高纯  $N_2$ ,然后继续培养。为期 15 d 培养过程中,每 3 d 计算 1 个甲烷产生潜力,共有 5 个时段的甲烷产生潜力值(在文中用 I、II、III、IV 和 V 分别表示 1~3 d、4~6 d、7~9 d、10~12 d 和 13~15 d 的甲烷产生潜力值)。为防止培养瓶内甲烷浓度过高而对甲烷产生造成抑制作用,每采集完 3 次气样,用高纯  $N_2$  冲洗 3~5 min。详细方法可参见文献(Inglett *et al.*, 2012)。

### 2.4 甲烷产生速率的测定与计算

气样采用岛津 GC-2010 气相色谱仪分析。甲烷检测器为 FID(氢焰离子化检测器),载气为  $N_2$ ,流速为 30 mL·min<sup>-1</sup>;  $H_2$  为燃气,流速为 47 mL·min<sup>-1</sup>; 空气为助燃气,流速为 400 mL·min<sup>-1</sup>;检测器温度为 200 °C,柱箱温度为 45 °C。

甲烷产生速率由下式(Wassmann *et al.*, 1998)计算:

$$P = \frac{dc}{dt} \times \frac{V_H}{W_S} \times \frac{MW}{MV} \times \frac{T_{st}}{T_{st} + T} \quad (1)$$

式中, $P$  为甲烷产生潜力( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $dc/dt$  为培养瓶内上部气相甲烷浓度单位时间的变化( $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ );  $V_H$  为培养瓶内上部空间气体体积(L);  $W_S$  为干土柱重(即为鲜土体积×容重)(g);  $MW$  为甲烷摩尔质量( $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ );  $MV$  (L) 为标准状态下气体摩尔体积 ( $22.4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$ );  $T_{st}$  为标准温度(K);  $T$  为培养温度(°C)。

### 2.5 数据处理与统计分析

采用 Excel 2003 对原始数据进行处理, Origin 8.0 软件进行绘图。利用 SPSS17.0 统计软件包中单因素方差(One-Way ANOVA)分析法分别检验同一沼泽植被带不同培养温度、相同培养温度不同植被类型下土壤甲烷产生潜力的差异性;采用单变量多因素分析法检验温度和植被类型对土壤甲烷产生潜力的影响;采用 LSD 法(least significant difference test)判断是否存在显著差异,显著性水平为  $\alpha=0.05$ 。

在土壤甲烷产生速率随时间变化分析中,各沼泽植被带土壤甲烷产生潜力是 5 个时段甲烷产生潜力值×3 个重复,共 15 个值。各沼泽植被带土壤甲烷产生潜力的累积量为 5 个甲烷产生潜力值之和,其中每个甲烷产生速率值为 6 个土层的平均值。文中误差线均为标准误差。

## 3 结果与分析(Results and analysis)

### 3.1 不同温度下土壤甲烷产生潜力的时间变化

特征

不同培养温度下,各沼泽湿地土壤甲烷产生潜力随着培养时间变化呈现出不同的趋势(图 2).短叶茳茳沼泽土壤甲烷产生潜力在各培养温度下均随着培养时间延长开始逐渐提高,在第 IV 时段达到最大值,之后开始下降.

芦苇沼泽土壤甲烷产生潜力在 20 和 40 °C 条件下均随着培养时间延长开始逐渐提高,在第 IV 时段

和第 III 时段分别达到最大值,之后开始下降;而 30 °C 条件下,土壤甲烷产生潜力在整个培养期间一直保持增加趋势.

互花米草沼泽土壤甲烷产生潜力在 30 和 40 °C 条件下随着培养时间延长开始逐渐增加,在第 IV 时段达到最大值,之后开始下降;而 20 °C 条件下,土壤甲烷产生潜力在整个培养期间一直保持增加趋势.

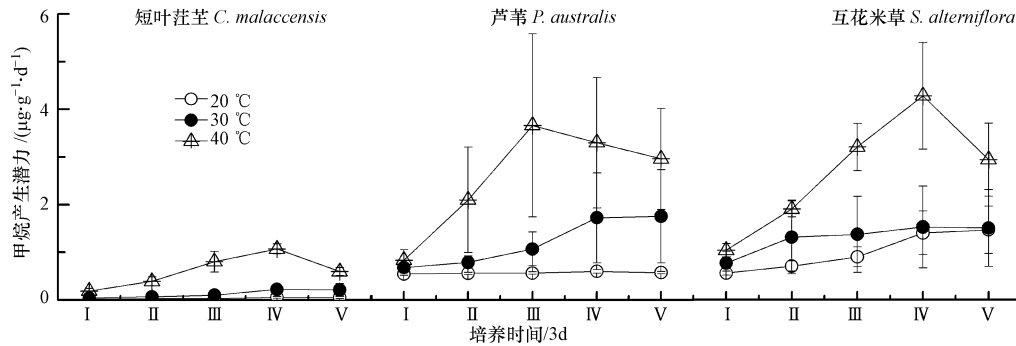


图 2 不同沼泽植被带土壤甲烷产生潜力在 15 d 培养期内的变化

Fig.2 Methane production potential in different marsh vegetation zones during 15 d incubation

3.2 3 种植被沼泽湿地土壤甲烷产生的潜力

培养温度为 20、30 和 40 °C 时,短叶茳茳沼泽湿地土壤甲烷产生潜力分别介于 0.015~0.053, 0.041~0.218 和 0.186~1.068 µg·g⁻¹·d⁻¹, 均值分别为 0.034, 0.127 和 0.608 µg·g⁻¹·d⁻¹; 芦苇沼泽湿地土壤甲烷产生潜力分别介于 0.043~0.073, 0.116~0.700 和 0.202~1.736 µg·g⁻¹·d⁻¹, 均值分别为 0.057, 0.402 和 1.144 µg·g⁻¹·d⁻¹; 互花米草沼泽湿地土壤甲烷产生潜力分别介于 0.114~1.114, 0.344~1.182 和 0.641

~4.220 µg·g⁻¹·d⁻¹, 均值分别为 0.608, 0.928 和 2.447 µg·g⁻¹·d⁻¹. 3 种植被沼泽湿地土壤甲烷产生潜力均呈现随着培养温度增加而显著提高的特征(图 3).

3.3 沼泽湿地土壤甲烷产生潜力的累积量

表 2 为不同沼泽植被带土壤甲烷产生潜力的累积量及其差异性比较.各植被沼泽湿地土壤甲烷产生潜力的累积量在 40 °C 条件下均显著高于 20 和 30 °C (p<0.0001), 而 20 与 30 °C 间的土壤甲烷产生潜力的累积量差异性均不显著(p>0.05)(表 2).

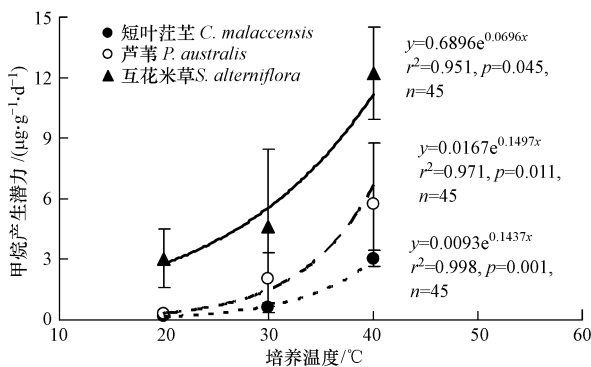


图 3 不同沼泽植被带土壤甲烷产生潜力与温度的关系(甲烷产生潜力为 15 d 培养期间 0~30 cm 深度的平均值, 误差线为标准误差)

Fig.3 Significant relationships between methane production potential and temperature in different marsh vegetation zones

表 2 不同植被沼泽湿地土壤甲烷产生潜力的累积量

Table 2 ccumulated methane production potential ( with standard deviations) in different vegetation types			
培养温度/°C	短叶茳茳 <i>C. malaccensis</i>	芦苇 <i>P. australis</i>	互花米草 <i>S. alterniflora</i>
20	0.17±0.06 <sup>bB</sup>	0.29±0.07 <sup>bB</sup>	3.04±1.44 <sup>bA</sup>
30	0.63±0.25 <sup>bB</sup>	2.01±1.33 <sup>bAB</sup>	4.64±3.83 <sup>bA</sup>
40	3.04±0.41 <sup>aB</sup>	5.72±3.07 <sup>aB</sup>	12.24±2.28 <sup>aA</sup>

1) 表中数据为平均值±标准误 (mean±SE); 2) 不同小写字母表示同一植被沼泽湿地在不同温度间甲烷产生潜力的差异性达到显著水平 (α=0.05); 3) 不同大写字母表示同一温度下不同植被沼泽湿地间甲烷产生潜力的差异性达到显著水平 (α=0.05).

同一温度条件下,各植被沼泽湿地土壤甲烷产生潜力的累积量均表现为外来入侵种互花米草沼泽>芦苇沼泽>短叶茳茳沼泽;其中 20 和 40 °C 条件下,互花米草沼泽的土壤甲烷产生潜力累积量均显

著高于芦苇沼泽和短叶茳苳沼泽( $p < 0.001$ ); 30 °C 条件下, 互花米草沼泽亦显著高于短叶茳苳沼泽( $p < 0.001$ ); 而芦苇沼泽和短叶茳苳沼泽在 3 个温度条件下均无显著差异( $p > 0.05$ ).

#### 4 讨论 (Discussion)

##### 4.1 温度对湿地土壤甲烷产生潜力

湿地甲烷产生是由厌氧微生物介导的碳循环过程, 在这一过程中温度起着十分关键的作用. 本研究中, 除芦苇沼泽和互花米草沼泽分别 30 °C 和 20 °C 外, 3 个沼泽植被带土壤甲烷产生潜力在中后期均开始下降(图 2), 但整体上均呈现随温度上升而明显增加的趋势, 显示出温度升高对河口潮汐湿地土壤甲烷产生有显著的促进作用(图 3 和表 3). 这与其他学者的研究结果相似 (Knoblauch *et al.*, 2008; Inglett *et al.*, 2012; Das and Adhya, 2012). 引起这种变化的主要原因可能与温度上升土壤微生物活性增强、有机质分解速率加快及底物供给充足有关. Inglett 等 (2012) 对美国佛罗里达州圣约翰河沼泽的研究发现, 温度升高可激发土壤微生物活性, 促进土壤中各类有机质分解速率加速, 为产甲烷菌代谢活动提供充足底物, 造成高土温条件下湿地甲烷产生潜力大. Das 和 Adhya (2012) 在进行温度和 CO<sub>2</sub> 浓度升高对湿地土壤甲烷产生影响的研究中也获得类似结果, 并且认为两者对甲烷产生存在显著的交互效应. 低温环境下湿地甲烷产生会被抑制, 其主要原因之一是低温条件下木质素等难分解物质提高了土壤有机碳的抗分解能力, 产甲烷菌所需底物供应呈现不饱和状态, 产甲烷菌功能无法得到有效发挥 (Chasar *et al.*, 2000). 本研究中 3 个植被带土壤甲烷产生潜力在 20 °C 培养条件下均保持较低水平, 可能与低温环境下土壤微生物活性较低、有机质分解速率受限制, 底物供应不足有关.

表 3 温度和植被类型对土壤甲烷产生潜力的影响

Table 3 Effects of temperature and vegetation type on methane production potential

	自由度 <i>df</i>	F 值 <i>F-value</i>	<i>p</i> 值 <i>p-value</i>
温度 ( <i>T</i> )	2	23.61	<0.0001
植被类型 ( <i>V</i> )	2	19.38	<0.0001
<i>T</i> × <i>V</i>	4	2.50	0.046

温度变化还可通过作用产甲烷菌菌群繁殖进而影响盐沼湿地甲烷产生与释放. Zeleke 等 (2013) 对长江口东滩潮汐盐沼湿地沉积物的研究表明, 夏

季相对较高的土温和充足底物供应为沉积物中产甲烷菌生物群落的繁殖提供有利条件, 造成夏季沉积物释放甲烷速率高于春季. 温度增加也可以促使复杂底物的分解, 产生少量且杂质较少的发酵排泄物, 并通过改变产甲烷途径来提高甲烷产生潜力 (Ahring *et al.*, 2001; 吴美容等, 2014). Avery 等 (2003) 通过添加 <sup>14</sup>C 标记底物, 发现美国北卡罗莱纳州 White Oak 潮汐河口沉积物中乙酸发酵途径产生的甲烷量占甲烷产生总量的 69% ± 12%, 并且发现乙酸发酵和 CO<sub>2</sub> 还原途径产甲烷速率均随着培养温度升高 (4 ~ 25 °C) 呈指数增长. Das 和 Adhya (2012) 对印度 Cuttack 和 Sukinda 水稻土甲烷产生的研究也发现, 温度和 CO<sub>2</sub> 浓度升高对土壤中乙酸发酵型和氢营养型产甲烷菌数量、复杂底物的分解能力及土壤甲烷产生均会形成激发效应. 本研究也发现, 3 个沼泽植被带土壤甲烷产生速率均随着培养温度升高呈指数增长(图 3), 且 40 °C 条件下土壤甲烷产生速率均显著高于 20 °C 和 30 °C (表 2). 该研究结果是否与不同温度条件下土壤产甲烷菌优势群落结构演替、甲烷产生途径改变有关, 在今后的研究中需要通过开展相关工作加以证实.

##### 4.2 植被类型对土壤甲烷产生潜力的影响

本研究中, 3 个培养温度梯度下, 互花米草沼泽土壤甲烷产生潜力的累积量均显著高于芦苇沼泽和短叶茳苳沼泽(表 2), 表明植被类型对湿地甲烷产生具有显著影响(表 3). 引起不同沼泽植被带土壤甲烷产生潜力的差异的因素众多, 一个潜在因素是底物的可用性 (McKenzie *et al.*, 1998; Bergman *et al.*, 2000; Zeleke *et al.*, 2013), 如土壤有机质中易分解碳(如可溶性有机碳 DOC)的数量和质量(表 1). 植物释放或残留的有机物质是湿地土壤产甲烷菌所需底物和能量的重要来源 (Sutton - Grierand Megonigal, 2011), 其丰富状况影响到土壤产甲烷能力(丁维新和蔡祖聪, 2002). Inglett 等 (2012) 对美国佛罗里达州圣约翰河沼泽湿地的研究发现, 香蒲 (*Typha domingensis*) 和荸荠 (*Eleocharis interstincta*) 植物群落土壤有机物中易分解碳所占比例大是造成其甲烷产生潜力显著高于另外 3 种沼泽植被带(克拉莎 *Cladium*、黍 *Panicum*、柳树 *Salix*) 土壤的重要原因, 5 种植物群落易分解碳所占比例的大小顺序为香蒲 (16%) > 荸荠 (11.3%) > 黍 (8.0%) > 克拉莎 (7.0%) > 柳树 (5.0%).

不同植被类型的沼泽还可通过植物根系来影

响土壤甲烷产生速率.植物根系可反映土壤提供产甲烷菌可利用碳的情况(Panikov, 1999),在土壤甲烷产生中占有极其重要的地位(Chasar *et al.*, 2000).Purvaja 等(2004)对印度 *Pichavaram* 红树林群落的研究发现,湿地甲烷产生与排放受到植物根系的调节,且甲烷排放的季节性变化与植物生长变化的根系密度显著相关( $p < 0.01$ ).姚晓东等(2013)在进行植物根际对河口湿地土壤甲烷产生潜力影响的研究中也发现类似关系,并得出植物根系越发达,甲烷产生潜力越高的结果.本研究中,在实验初期对土壤样品预处理期间,发现互花米草沼泽土壤样品所含的根系均要显著多于短叶茳芏和芦苇沼泽.可推断,3种沼泽植被带土壤甲烷产生速率的差异性在一定程度上也可能受到植物根系的影响.

不同类型的沼泽还可通过土壤理化性质(如盐分和 pH)来影响甲烷产生.已有研究表明,盐分对甲烷产生具有一定的抑制作用(卢昌义等, 1998),而 pH 在中性或微碱性环境下对甲烷产生具有促进作用(Masscheleyn *et al.*, 1993; Das and Adhya, 2012).本研究中,短叶茳芏、芦苇和互花米草沼泽植被带土壤的电导率 EC 分别为 0.82、0.83 和 0.69  $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ , pH 值分别为 5.96、5.40 和 6.14(表 1),从盐分(用电导率 EC 表征)和 pH 值两个指标看,互花米草沼泽土壤的甲烷产生条件优于短叶茳芏和芦苇沼泽.

本研究中湿地土壤甲烷产生速率不仅受到温度或植被类型单个因素的显著影响( $p < 0.0001$ ),且这两个因素之间对土壤甲烷产生速率存在显著的交互效应( $F = 2.50$ ,  $p = 0.046$ )(表 3).类似结果也出现于其他研究中.王丹等(2013)在进行植被类型对长白山森林土壤碳矿化影响的研究中发现,植被类型和温度对土壤碳矿化累积量具有极显著的交互影响( $p < 0.001$ ).Inglett 等(2012)对美国佛罗里达州圣约翰河淡水沼泽的研究也发现,温度和植被类型对沼泽土壤呼吸及甲烷生成存在显著的交互效应.因此,在今后研究过程中有必要加强温度、植被类型等因素间的交互效应对湿地土壤甲烷产生影响的研究,为揭示该地区的甲烷产生机理提供理论依据.

## 5 结论(Conclusions)

1)湿地甲烷产生是产甲烷菌代谢的产物,对温度变化非常敏感,一般在 0~35 °C 保持相对较高的

活力,低于或高于这一温度,产甲烷菌活性及甲烷产生速率(或潜力)都会受到不同程度的抑制,但以上研究主要聚集在中高纬度淡水沼泽湿地和水稻田人工湿地(Segers, 1998; Parashar *et al.*, 1993; van Hulzen *et al.*, 1999; Wu *et al.*, 2002).与之相比,本研究发现 3 个沼泽植被带土壤甲烷产生速率均表现为随温度上升呈指数增长的趋势,在 40 °C 时甲烷产生速率达到最大值.该研究结果初步显示,亚热带河口盐沼湿地甲烷产生速率最适温度超过 35 °C,并且在短时期内对未来气候变暖可能产生正反馈效应.

(2)相同培养温度下外来入侵物种互花米草沼泽土壤甲烷产生速率均显著高于土著物种短叶茳芏和芦苇沼泽,表明互花米草沼泽土壤甲烷产生速率对增温效应更加敏感.这可能与互花米草沼泽植被带具备较高的底物可用性、较发达的植物根系、适宜的土壤理化环境以及优势产甲烷菌群落结构(Yuan *et al.*, 2014)密切相关.此外,温度和植被类型对潮汐沼泽湿地土壤甲烷产生速率存在显著的交互效应,故在今后研究中除需考虑单个温度环境变量外,更要侧重开展温度与其它环境变量间的综合作用对湿地甲烷产生影响的研究.

**致谢(Acknowledgement):**野外采样和室内工作得到福建师范大学亚热带湿地研究中心的徐辉、万斯昂、任洪昌和汪旭明等同学的帮助,在此表示感谢.

**责任作者简介:**全川(1964—)男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为湿地生物地球化学循环、湿地生态系统服务功能及生态修复.E-mail: tongch@fjnu.edu.cn.

## 参考文献(References):

- Ahring B K, rahim A A, adenovska Z. 2001. Effect of temperature increase from 55 to 65 °C on performance and microbial population dynamics of an anaerobic reactor treating cattle manure [J]. *Water Research*, 35(10): 2446-2452
- Avery G B, Shannon R D, White J R, *et al.* 2003. Controls on methane production in a tidal freshwater estuary and a peatland: methane production via acetate fermentation and CO<sub>2</sub> reduction [J]. *Biogeochemistry*, 62(1): 19-37
- Bergman I, Klarqvist M, Nilsson M. 2000. Seasonal variation in rates of methane production from peat of various botanical origins: effects of temperature and substrate quality [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 33(3): 181-189
- Chasar L S, Chanton J P, Glaser P H, *et al.* 2000. Radiocarbon and stable carbon isotopic evidence for transport and transformation of dissolved organic carbon, dissolved inorganic carbon, and CH<sub>4</sub> in a

- northern Minnesota peatland [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 14(4): 1095-1108
- Das S, Adhya T K. 2012. Dynamics of methanogenesis and methanotrophy in tropical paddy soils as influenced by elevated CO<sub>2</sub> and temperature interaction [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 47: 36-45
- 丁维新, 蔡祖聪. 2002. 土壤有机质和外源有机物对甲烷产生的影响 [J]. *生态学报*, 22(10): 1672-1679
- 丁维新, 蔡祖聪. 2003. 温度对甲烷产生和氧化的影响 [J]. *应用生态学报*, 14(4): 604-608
- Galand P E, Fritze H, Yrjälä K. 2003. Microsite-dependent changes in methanogenic populations in a boreal oligotrophic fen [J]. *Environmental Microbiology*, 5(11): 1133-1143
- Galand P E, Fritze H, Conrad R, *et al.* 2005. Pathways for methanogenesis and diversity of methanogenic archaea in three boreal peatland ecosystems [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 71(4): 2195-2198
- Gonsalves M J, Fernandes C E G, Fernandes S O, *et al.* 2011. Effects of composition of labile organic matter on biogenic production of methane in the coastal sediments of the Arabian Sea [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 182(1/4): 385-395
- Inglett K S, Inglett P W, Reddy K R, *et al.* 2012. Temperature sensitivity of greenhouse gas production in wetland soils of different vegetation [J]. *Biogeochemistry*, 108(1/3): 77-90
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis* [A]// Stocker T F, Qin D, Plattner G K, *et al.* eds. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press
- 金玉凤. 2012. 闽江河口不同沼泽植被带土壤甲烷产生速率的比较及机制分析 [D]. 福州: 福建师范大学
- Knoblauch C, Zimmermann U, Blumenberg M, *et al.* 2008. Methane turnover and temperature response of methane-oxidizing bacteria in permafrost-affected soils of northeast Siberia [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(12): 3004-3013
- Massecheyn P H, DeLaune R D, Patrick Jr W H. 1993. Methane and nitrous oxide emissions from laboratory measurements of rice soil suspensions: effect of soil oxidation reduction status [J]. *Chemosphere*, 26(1/4): 251-260
- McKenzie C, Schiff S, Aravena R, *et al.* 1998. Effect of temperature on production of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> from Peat in a Natural and Flooded Boreal Forest Wetland [J]. *Climatic Change*, 40(2): 247-266
- Liu D Y, Ding W X, Jia Z J, *et al.* 2011. Relation between methanogenic archaea and methane production potential in selected natural wetland ecosystems across China [J]. *Biogeosciences*, 8: 329-338
- 刘德燕, 丁维新. 2011. 天然湿地土壤产甲烷菌及其影响因子研究进展 [J]. *地理科学*, 31(2): 136-142
- 卢昌义, 叶勇, 林鹏, 等. 1998. 海南海莲红树林土壤 CH<sub>4</sub> 的产生及其某些影响因素 [J]. *海洋学报*, 20(6): 132-138
- Panikov N S. 1999. Flutes of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in high latitude wetlands: measuring, modelling and predicting response to climate change [J]. *Polar Research*, 18(2): 237-244
- Parashar D C, Gupta P K, Rai J, *et al.* 1993. Effect of soil temperature on methane emission from paddy fields [J]. *Chemosphere*, 26(1/4): 247-250
- Purvaja R, Ramesh R, Frenzel P. 2004. Plant-mediated methane emission from an Indian mangrove [J]. *Global Change Biology*, 10(11): 1825-1834
- Segers R. 1998. Methane production and methane consumption: a review of processes underlying wetland methane fluxes [J]. *Biogeochemistry*, 41(1): 23-51
- 沈李东, 胡宝兰, 郑平. 2011. 甲烷厌氧氧化微生物的研究进展 [J]. *土壤学报*, 48(3): 619-628
- Sutton-Grier A E, Megonigal J P. 2011. Plant species traits regulate methane production in freshwater wetland soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(2): 413-420
- Tian H Q, Lu C Q, Chen G S, *et al.* 2012. Contemporary and projected biogenic fluxes of methane and nitrous oxide in North American terrestrial ecosystems [J]. *Front Ecology Environment*, 10(10): 528-536
- van Hulzen J B, Segers R, van Bodegom P M, *et al.* 1999. Temperature effects on soil methane production: an explanation for observed variability [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 31(14): 1919-1929
- 王丹, 吕瑜良, 徐丽, 等. 2013. 植被类型变化对长白山森林土壤碳矿化及其温度敏感性的影响 [J]. *生态学报*, 33(19): 6373-6381
- Wassmann R, Neue H U, Bueno C, *et al.* 1998. Methane production capacities of different rice soil derived from inherent and exogenous substrates [J]. *Plant and Soil*, 203(2): 227-237
- 吴美容, 张瑞, 周俊, 等. 2014. 温度对产甲烷菌代谢途径和优势菌群结构的影响 [J]. *化工学报*, 65(5): 1602-1606
- Wu X L, Chin K J, Conrad R. 2002. Effect of temperature stress on structure and function of the methanogenic archaeal community in a rice field soil [J]. *FFMS Microbiology Ecology*, 39(3): 211-218
- 姚顺. 2010. 闽江河口咸草湿地甲烷与二氧化碳排放及主要环境因子分析 [D]. 福州: 福建师范大学
- 姚晓东, 陈重安, 黄佳芳. 2013. 植物根际及土壤有机碳含量和温度对湿地甲烷产生潜力的影响 [J]. *湿地科学与管理*, 9(4): 41-45
- Yu B, Stott P, Yu H X, *et al.* 2013. Methane emissions and production potentials of forest Swamp wetlands in the eastern Great Xing' an Mountains, northeast China [J]. *Environmental Management*, 52(5): 1149-1160
- Yuan J J, Ding W X, Liu D Y, *et al.* 2014. Methane production potential and methanogenic archaea community dynamics along the *Spartina alterniflora* invasion chronosequence in a coastal salt marsh [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98(4): 1817-1829
- Zeleeke J, Sheng Q, Wang J G, *et al.* 2013. Effects of *Spartina alterniflora* invasion on the communities of methanogens and sulfate-reducing bacteria in estuarine marsh sediments [J]. *Frontiers in Microbiology*, 4: 243, doi: 10.3389/fmicb.2013.00243
- 郑彩虹, 曾从盛, 陈志强, 等. 2006. 闽江河口区湿地景观格局演变研究 [J]. *湿地科学*, 4(1): 29-34