

DOI: 10.5846/stxb201907291598

张前前, 胡启武, 冯哲, 文旻, 吴琴, 徐健. 鄱阳湖沉水植物区不同深度土壤甲烷排放对温度水分变化的响应. 生态学报, 2020, 40(21): 7659-7667.
Zhang Q Q, Hu Q W, Feng Z, Wen M, Wu Q, Xu J. Response of methane emissions to temperature and moisture changes at different soil depths in the submerged plant zones of Poyang Lake. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(21): 7659-7667.

鄱阳湖沉水植物区不同深度土壤甲烷排放对温度水分变化的响应

张前前¹, 胡启武^{1,2,*}, 冯哲¹, 文旻¹, 吴琴¹, 徐健¹

1 江西师范大学地理与环境学院, 南昌 330022

2 江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 南昌 330022

摘要: 采集鄱阳湖沉水植物区 0—10 cm 和 10—30 cm 土壤样品, 通过设置 2 个温度 (18℃ 和 28℃) 和 2 个水分 (淹水 2 cm 和土柱取出水面后的实际土壤水分含量) 处理组合, 进行持续 2 年的甲烷 (CH₄) 排放室内培养实验, 以探讨不同深度土壤 CH₄ 排放对温度、水分变化的响应差异, 以及温度、水分和土层对湿地土壤 CH₄ 排放的交互影响。结果表明: 0—10 cm 和 10—30 cm 土壤 CH₄ 排放速率变化范围分别为 0.01—3.63 μgCH₄-C kg⁻¹ d⁻¹、0.02—1.99 μgCH₄-C kg⁻¹ d⁻¹; 均值分别为 0.72 和 0.15 μgCH₄-C kg⁻¹ d⁻¹。温度、水分和土层 3 因素及其交互作用均对土壤 CH₄ 排放有显著影响 ($P < 0.01$), 且土层的影响最大。两水分处理下的 CH₄ 排放对温度变化的敏感性均表现为 0—10 cm (Q_{10} 为 1.78、3.26) 高于 10—30 cm 土层 (Q_{10} 为 1.04、1.08)。CH₄ 平均排放速率及累计排放量均表现为 0—10 cm 显著高于 10—30 cm 土层, 且培养前期高于培养后期, 显示基质有效性对土壤 CH₄ 排放的重要影响。

关键词: 鄱阳湖; 湿地; 甲烷; 温度; 水分

Response of methane emissions to temperature and moisture changes at different soil depths in the submerged plant zones of Poyang Lake

ZHANG Qianqian¹, HU Qiwu^{1,2,*}, FENG Zhe¹, WEN Min¹, WU Qin¹, XU Jian¹

1 School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

2 Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

Abstract: This study analyzes the different response of CH₄ emissions from two soil depths to temperature and moisture changes, as well as the interactive effects of temperature, moisture and soil layer. To accomplish this objective, soils in the submerged plant zones of Poyang Lake were sampled at depths of 0—10 cm and 10—30 cm. Subsequently, the soil samples were incubated for two years at two distinct temperatures (18℃ vs 28℃) and at two moisture treatments (the initial soil moisture during initial soil sampling vs the moisture at 2 cm water depth). The results showed that the soil CH₄ emissions varied from 0.01 to 3.63 μgCH₄-C kg⁻¹ d⁻¹ for the 0—10 cm depth samples, and 0.02 to 1.99 μgCH₄-C kg⁻¹ d⁻¹ for the 10—30 cm depth samples, respectively. Temperature, moisture, soil layer and their interactions all had significant effects on soil CH₄ emissions ($P < 0.01$), though the soil layer had the maximum impact. It was observed that the temperature sensitivity of soil CH₄ emissions from the 0—10 cm depth samples was higher than that of the 10—30 cm depth sample for both of the moisture treatments. Both mean and cumulative soil CH₄ emissions from the 0—10 cm depth samples were significantly higher than the 10—30 cm depth samples. In addition, soil CH₄ emissions in the early incubation period were

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31270522, 31460129)

收稿日期: 2019-07-29; 修订日期: 2020-05-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huqiwu1979@gmail.com

higher than the later period, suggesting that the substrate availability can play a substantial role in soil CH₄ emissions in wetlands.

Key Words: Poyang Lake; wetland; methane; temperature; moisture

甲烷(CH₄)是地位仅次于二氧化碳(CO₂)的重要温室气体,其在百年尺度上的全球增温潜势是CO₂的28—34倍^[1-2]。大气中的CH₄浓度已从1750年的0.72 μmol/mol上升到2011年的1.80 μmol/mol,升高近2.5倍^[2]。湿地长期处于水淹和厌氧状态,为CH₄产生提供了有利条件,因而成为大气CH₄重要的天然释放源^[3],每年向大气中排放CH₄约占全球CH₄排放总量的30%^[4]。由于不同区域、不同类型湿地水文状况与水文过程复杂多样,全球和区域湿地CH₄排放评估存在极大的不确定性^[4]。当前,我国湿地CH₄研究大多集中于青藏高原高寒区和温带地区^[5-13],热带和亚热带地区的研究相对薄弱^[14-19],且现有研究多关注湿地挺水植物区CH₄排放与影响因子^[16,20-21],缺乏对沉水植物区CH₄排放的关注。大量的通量观测已经证实土壤温度和水分是控制湿地CH₄排放的关键因子。其中,温度主要通过影响土壤中产甲烷菌进而影响CH₄的产生、氧化及排放^[22],较高的水分容易使湿地土壤形成厌氧环境^[12],促进CH₄产生。然而,野外通量观测往往容易忽视CH₄排放的另外一个重要影响因子—基质有效性,并且通常把不同深度的土壤作为一个整体进行观测,极少区分不同土层的CH₄排放。而不同土层有机质含量及其组成往往存在较大差异,亦代表着基质有效性的差异。不同土层CH₄排放对温度、水分变化是否具有差异化的响应?基质有效性、温度和水分三者之间是否对CH₄排放存在交互作用?这些科学问题尚需更多的研究来回答。

鄱阳湖作为中国最大的淡水湖,沉水植物区常年处于厌氧环境,其分布面积占鄱阳湖全湖植被的近50%^[23-24],被视为重要的CH₄释放源^[25]。因此本研究通过采集鄱阳湖湿地沉水植物分布区不同深度土壤,区分不同土层CH₄排放,探讨土壤温度、水分及基质有效性对湿地CH₄排放的交互作用,为进一步阐明鄱阳湖湿地CH₄排放的变化机理,降低区域湿地CH₄排放评估的不确定性提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

研究区选在鄱阳湖南矶湿地国家级自然保护区,该区位于鄱阳湖南部赣江三角洲前沿地带(28°52′05″—29°06′50″ N, 116°10′33″—116°25′05″ E)。保护区内除南山岛和矾山岛2个居民点占据4 km²面积之外,其余为洲滩和水域,总面积约330 km²。湖滨洲滩的淹没时间视当年的具体水文情势,一般在3—5个月不等,其余时间洲滩大都出露于水面。该区气候属亚热带湿润季风气候,多年平均气温17.6℃,多年平均降水量为1450—1550 mm。该区域的湿地植被沿水位梯度可分为草甸植被带、挺水植被带、湿生植被带和沉水植被带,优势物种分别为狗牙根(*Cynodon dactylon*)、萎蒿(*Artemisia igniaria*)、芦苇(*Phragmites australis*)、南荻(*Triarrhena lutarioriparia*)、灰化苔草(*Carex cinerascens*)、黑藻(*Hydrilla verticillata*)等,土壤类型分别为草甸土和草甸沼泽土。

1.2 实验设计

在鄱阳湖南矶湿地国家自然保护区的白沙湖,选择典型沉水植物(以黑藻为优势种)分布区,利用柱状透明采泥管(内径4 cm)以“S”型随机多点采集土柱,分别截取0—10 cm、10—30 cm两个土层的混合样品,其中,10—30 cm土层在靠近30 cm处截取样品,以明显区别于表层土样的有机质含量。将采集的土壤样品冷藏保鲜带回实验室,一部分样品进行土壤有机碳及其不同组分、全氮、微生物碳氮测定,一部分用于CH₄排放室内培养实验。室内培养实验设置18℃和28℃两个温度处理。其中,低温18℃为研究区年均温;高温设置为28℃,考虑此温度是土壤微生物活动的适宜温度,以及进一步分析CH₄排放温度敏感性Q₁₀的需要^[26]。鄱阳湖近年来湿地干旱化趋势明显,部分沉水植物区,特别是地表淹水较浅的湖滩洼地,存在土壤出露水面的可

能。因此,本研究设计淹水和非淹水 2 个处理。对于淹水处理,统一设置为淹水 2 cm 深度;设置非淹水状态的水分处理时,主要参考土柱取出水面后的实际土壤水分含量。由于不同土层的容重、孔隙度等差异,两土层的实际水分含量存在较大差异。其中,0—10 cm 和 10—30 cm 土壤水分分别为 $100\% \pm 12\%$ 、 $80\% \pm 10\%$ 。

参照文献^[27-28]进行培养实验设计和 CH_4 排放速率的计算。具体过程如下:将各组不同处理的土样(100 g 干土计)装入 1 L 培养瓶密闭,每组处理 4 个重复随机放入人工气候箱(QHY—450 型,温控精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$,湿度波动 5% RH)进行避光培养。此外,分别设置高温 28°C 与低温 18°C 空白对照各 4 个重复随机放入人工气候箱。气体取样时首先通过密封瓶口外接的三通阀,利用注射器抽取 10 mL 气体,随后测定培养瓶内剩余空气气压,并进一步通过气体状态方程计算抽取气体之前的瓶内空气气压。 CH_4 浓度用 Aligent 4890D 气相色谱仪进行测定。气体取样频率:前 3 个月每 1 周取样 1 次,第 4—6 月每 2 周取样 1 次,第 7—9 月每 3 周取样 1 次,培养 10 个月之后每 4 周取样 1 次,共计培养 735 d。每次取完气体后,短暂卸去密封瓶的封口,通入压缩空气,使前一次土壤有机质分解积累在顶端空气中的 CO_2 、 CH_4 等气体溢出,以快速达到补充氧气,回归正常空气状态。并通过添加去离子水以保持相应土壤水分含量,然后重新密封置于相应温度下培养待下一次抽样分析。培养实验开始前的土壤理化性状见表 1。

1.3 CH_4 排放计算公式

$$F = \frac{(P_1 - P_2)(V_1 - V_2) \times M}{R(273.15 + T) \times t \times m \times 10^3} \quad (1)$$

式中, F 为 CH_4 排放速率($\mu\text{gCH}_4\text{-C kg}^{-1}\text{d}^{-1}$), P_1 为土壤样品培养一定时间后产生的 CH_4 分压(Pa); P_2 为空白对照组的 CH_4 分压(Pa); V_1 为土壤样品培养一定时间后培养瓶内的 CH_4 体积(L); V_2 为空白对照组的 CH_4 体积(L); R 为气体常数($8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$); T 为培养温度($^\circ\text{C}$); M 为 CH_4 的摩尔质量(16 g/mol); t 为两次气体取样的间隔时间(d); m 为土壤质量(g)。

根据文献^[29-30],采用下式计算 CH_4 排放的温度敏感性:

$$Q_{10} = (K_1 / K_2)^{10 / (T_1 - T_2)} \quad (2)$$

式中, T_1 和 T_2 为培养温度, K_1 和 K_2 分别对应 T_1 和 T_2 温度下的 CH_4 排放速率。

1.4 数据分析

数据采用 Excel 2016 软件进行处理,Origin 2018 绘制图表。采用 SPSS 17.0 及 Minitab 17.0 多因素方差分析法分析温度、水分和土层 3 因素及其交互作用对 CH_4 排放的影响,显著性水平设置为 $\alpha=0.05$ 。

表 1 土壤培养前理化性状特征

Table 1 Soil properties before incubation

主要土壤理化性状 Main soil properties	土层 Soil layer	
	0—10 cm	10—30 cm
总有机碳 Total organic carbon/(mg/g)	10.01	6.49
全氮 Total nitrogen/(mg/g)	1.01	0.68
碳氮比 Total organic carbon/Total nitrogen	9.90	9.50
重组有机碳 Heavy fraction organic carbon/(mg/g)	9.55	6.27
轻组有机碳 Light fraction organic carbon/(mg/g)	0.46	0.22
可溶性碳 Dissolved organic carbon/($\mu\text{g/g}$)	153.63	101.36
微生物量碳 Microbial biomass carbon/($\mu\text{g/g}$)	144.80	54.37
微生物量氮 Microbial biomass nitrogen/($\mu\text{g/g}$)	12.94	8.89
微生物量碳氮比 Microbial biomass carbon/Microbial biomass nitrogen	11.20	6.10

2 结果与分析

2.1 0—10 cm 土壤 CH_4 排放速率变化

随着培养时间的增加,0—10 cm 土壤在高温 28°C 和低温 18°C 培养环境中 CH_4 排放速率均表现出波动中

下降的变化趋势,且不同水分处理表现一致,即培养初期0—195 d波动中快速下降,培养中期196—391 d缓慢下降,培养后期392—735 d变化平稳(图1)。温度和水分对0—10 cm土壤CH₄排放速率均产生显著影响($P<0.01$)。其中,高温环境下两水分处理的土壤CH₄平均排放速率分别为0.39和2.00 $\mu\text{gCH}_4\text{-C kg}^{-1}\text{ d}^{-1}$;低温环境下CH₄平均排放速率则分别为0.21和0.31 $\mu\text{gCH}_4\text{-C kg}^{-1}\text{ d}^{-1}$ 。

相同温度培养环境下,CH₄平均排放速率均表现为淹水2 cm处理高于100%水分处理;相同水分处理下CH₄排放速率则表现为高温>低温。整体来说,0—10 cm土壤CH₄排放速率大小为:高温×淹水2 cm>高温×100%水分>低温×淹水2 cm>低温×100%水分。

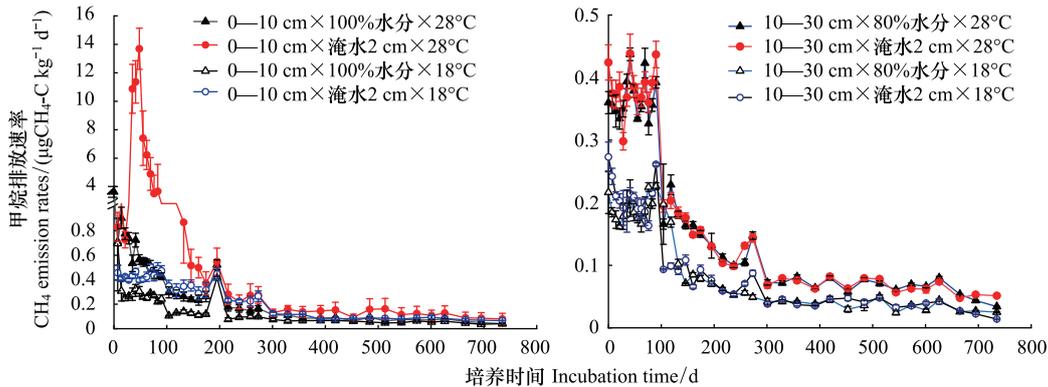


图1 不同处理条件下土壤甲烷排放速率随培养时间的变化

Fig.1 Variations of methane emission rates under different treatments with incubation time

2.2 10—30 cm 土壤 CH₄排放速率变化

10—30 cm 土壤在高温 28°C 和低温 18°C 培养环境中,CH₄排放速率亦呈现出波动中下降的变化规律,且不同水分处理表现一致,即培养初期0—90 d 内波动中缓慢下降,91—300 d 期间波动中快速下降,301—735 d 期间变化平稳(图1)。温度和水分对10—30 cm 土壤CH₄排放速率影响显著($P<0.01$),高温培养环境中,两水分处理下10—30 cm 土壤CH₄平均排放速率分别为0.19和0.20 $\mu\text{gCH}_4\text{-C kg}^{-1}\text{ d}^{-1}$;而低温环境下则分别为0.10和0.11 $\mu\text{gCH}_4\text{-C kg}^{-1}\text{ d}^{-1}$ 。

10—30 cm 土壤CH₄排放速率在同一温度培养环境下,亦表现出淹水2 cm 处理高于80%水分处理,且在同一水分处理下CH₄排放速率均为高温>低温。总体上,10—30 cm 土壤CH₄排放速率大小为:高温×淹水2 cm>高温×80%水分>低温×淹水2 cm>低温×80%水分。

2.3 不同深度土壤 CH₄累积排放总量

实验结果表明,温度和水分对不同深度土壤CH₄排放总量影响显著($P<0.01$),其中,0—10 cm 土壤在高温和两水分处理的培养环境下CH₄排放总量分别为138.86和639.54 $\mu\text{gCH}_4\text{-C/kg}$;而在低温环境中则分别为81.39和136.67 $\mu\text{gCH}_4\text{-C/kg}$ 。10—30 cm 土壤在高温培养环境和两水分处理下CH₄排放总量分别为89.44和91.58 $\mu\text{gCH}_4\text{-C/kg}$;在低温培养环境中则分别为48.68和49.78 $\mu\text{gCH}_4\text{-C/kg}$ 。

总体上,0—10 cm 土壤CH₄排放总量均高于10—30 cm 土壤,且相同水分处理下CH₄排放总量均为高温环境>低温环境,相同温度处理下的CH₄排放总量均以淹水2 cm 最高(图2)。

3 讨论

温度、水分和土层及其交互作用对湿地土壤CH₄排放影响显著($P<0.01$)(表2)。Minitab 方差分析结果显示,土层对CH₄排放的影响最大,贡献达到了23.13%,其次是水分13.21%和温度11.38%。

温度是影响湿地CH₄排放的重要因素之一^[31-32],本研究中温度对湿地土壤CH₄排放有显著影响($P<$

0.01),不同土层间 CH_4 排放速率及排放总量均为高温 28°C 高于低温 18°C ,这与已有研究结果一致^[33-35]。可见温度上升对湿地 CH_4 排放具有促进作用。温度上升提高土壤微生物活性加快有机质的分解^[30];此外,温度上升改变产甲烷菌群落结构及多样性因而提升 CH_4 产生效率^[32,36-37]。通常用 Q_{10} 表示 CH_4 排放对温度变化的敏感性^[38],数值越大表明 CH_4 排放对温度变化越敏感。本研究中 0—10 cm 土壤两水分处理下的 Q_{10} 变化范围分别为 1.02—3.14, 0.98—18.29;均值为 1.78 和 3.26; 10—30 cm 土壤则分别为 0.47—1.78, 0.85—1.51;均值为 1.03 和 1.08。该结果处于 Segers 等人^[39]的研究结果范围之内,但高于宋长春等人^[8]对我国三江平原小叶章 (*Calamagrostis angustifolia*) 草甸湿地 CH_4 排放通量 Q_{10} (Q_{10} 值为 1.90) 的估算;低于全川等^[40]对闽江河口鳊鱼滩潮汐湿地短叶茼蒿 (*Cyoeus malaccensis*)、蘆草 (*Scirpus triquetus*) 等沼泽 CH_4 排放通量温度敏感性 (Q_{10} 值分别为 5.23 和 4.79) 的研究。由于 Q_{10} 受多因子的综合影响,不同区域或不同类型的湿地土壤 CH_4 排放对温度变化响应的变幅较大^[41]。

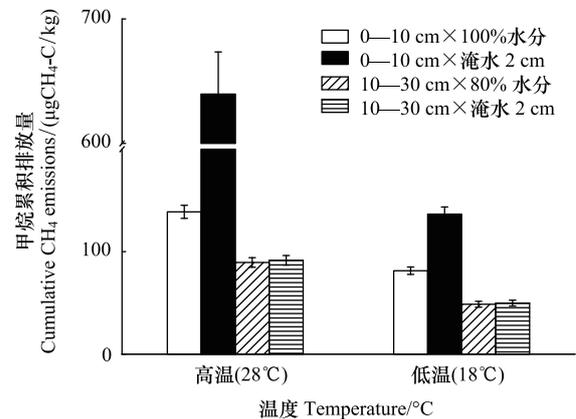


图 2 不同处理条件下土壤甲烷累积排放总量

Fig.2 Total amount of methane emissions under different treatments

表 2 温度(T)、水分(M)和土层(S)对 CH_4 排放速率及累积排放量的影响分析

Table 2 Analysis of the effects of temperature (T), moisture (M) and soil layer (S) on methane emission rates and cumulative emissions

因变量 Dependent variable	自变量 Variable	平方和 Sum of squares	df	均方 Mean square	F	P
CH_4 排放速率 Methane emissions rates	T	18.36	1	18.36	10.96	<0.01
	M	31.09	2	15.54	9.28	<0.01
	S	37.76	1	37.76	22.54	<0.01
	T×M	24.15	2	12.08	7.80	<0.01
	T×S	29.93	1	29.93	19.32	<0.01
	M×S	57.89	3	19.30	11.15	<0.01
	T×M×S	24.15	2	12.08	7.80	<0.01
CH_4 累积排放量 Cumulative methane emissions	T	827556.22	1	827556.22	65.06	<0.01
	M	1528072.24	1	764036.12	60.06	<0.01
	S	1682151.42	1	1682151.42	132.24	<0.01
	T×M	1130851.12	2	1130851.12	90.61	<0.01
	T×S	1375276.66	1	1375276.66	220.39	<0.01
	M×S	2642742.67	3	880914.22	57.07	<0.01
	T×M×S	1130851.11	2	565425.56	90.61	<0.01

此外,0—10 cm 土壤两水分处理下的温度敏感性(1.78 和 3.26)高于 10—30 cm 土壤(1.03 和 1.08),且在实验不同培养阶段,0—10 cm 土壤 Q_{10} 值培养前期高于培养后期,两水分处理下以淹水 2 cm 最高,但 10—30 cm 土壤差异并不明显(图 3)。0—10 cm 土壤 CH_4 排放速率对温度变化较 10—30 cm 土壤更为敏感,这可能是由于 0—10 cm 土壤的总有机碳及其活性有机碳组分,如轻组有机碳、可溶性有机碳和微生物量碳等含量高于 10—30 cm 土壤(表 1),可提供更高的基质有效性,温度升高后促使土壤微生物和酶活性增强加快了对底物的分解,促进 CH_4 的排放^[42]。

CH_4 产生是严格的厌氧过程,水分含量的高低决定了 CH_4 产生和氧化的环境条件^[43],水位波动可以使土

壤由产 CH_4 环境转变为 CH_4 氧化环境^[44]。本研究中,不同水分对 CH_4 排放的影响显著 ($P < 0.01$), 水分增加对 CH_4 排放有明显促进作用, 不同土层土壤在相同温度下 CH_4 排放速率及累积排放量均为淹水 2 cm 高于非淹水处理。该结果与丁维新^[44]、Henneberg 等人^[45] 关于水位对 CH_4 排放影响的研究结果一致。沙晨燕等^[46] 对美国 Olentangy 河人工湿地 CH_4 排放量研究发现, 深水对比交错区的 CH_4 排放量更高; Mander 等^[47] 对温室气体排放随水位变化研究显示, 水位越高 CH_4 排放量越大。因此, 土壤水分对湿地 CH_4 排放影响显著。此外, 孙志高等^[48] 研究发现水分含量增高明显促进了 CH_4 排放, 并且抑制了温度对 CH_4 排放的作用强度和敏感性。可见当温度和水分对 CH_4 排放有交互作用时, 水分对 CH_4 排放的影响可能超过温度, 但水分对温度影响的具体机制目前尚不清楚, 还需更进一步的探究。

土壤基质有效性亦对湿地土壤 CH_4 排放影响显著, 土壤中丰富的有机质能为微生物提供充足的产 CH_4 基质^[49-52], 基质供应越充足, 土壤产 CH_4 能力越强^[44, 53]。本研究中, 土壤总有机碳含量(表 1) 明显低于三江平原^[54]、若尔盖高原等湿地^[55-56]。这主要是由于研究区地处亚热带, 湿热的气候条件利于有机碳分解, 且在高动态水情变化环境下, 有机碳易发生迁移。但与杭州湾^[57]、洞庭湖湿地^[58] 及闽江口湿地^[59] 土壤有机碳含量相比差异不大。土壤中可溶性有机碳含量是影响土壤产 CH_4 能力的重要因素^[60-61], 沉水植物区虽总有机碳含量低于挺水植物区, 但长期淹水环境增加了溶解性有机碳含量, 且流域水流携入外源有机质在洲滩退水后积聚, 使其可溶性有机碳含量在所有植被类型及湖底无植被区中最高^[62]。

本研究中, 黑藻群落土壤 CH_4 排放均表现为 0—10 cm 土层高于 10—30 cm 土层, 而以不同土层总有机碳为基质总量, 亦表现出相同规律。0—10 cm 土层在高温和两水分处理下, 土壤基质 CH_4 排放总量分别为 13.75、63.32 $\text{mgCH}_4\text{-C kg soc}^{-1}$; 而在低温环境中则分别为 8.06、13.53 $\text{mgCH}_4\text{-C kg soc}^{-1}$ 。10—30 cm 土层在高温培养环境和两水分处理下其土壤基质 CH_4 排放总量为分别为 13.78、14.11 $\text{mgCH}_4\text{-C kg soc}^{-1}$; 在低温培养环境中则分别为 7.50、7.67 $\text{mgCH}_4\text{-C kg soc}^{-1}$ 。该结果主要是由于 0—10 cm 土层有机质含量高于 10—30 cm 土层(表 1), 即两土层所能提供的产 CH_4 基质不同所致。Dasselaar 等^[63] 对泥炭沼泽土壤研究结果表明, 不同深度土壤基质的差异, 致使 CH_4 产生能力随土壤深度增加而降低; Avery^[34] 对美国河口潮汐湿地的研究也得出一致结论, 并且指出 0—10 cm 土壤是 CH_4 产生的主要发生层。也有研究发现, 不同土层土壤基质间的差异, 对湿地产甲烷菌群落结构和活性影响明显, 进而影响 CH_4 产生和排放^[50, 64-65]。本研究中, 在培养后期, 不同土层 CH_4 排放速率均趋于平稳状态, 这可能是由于土壤中基质变化引起, 随着实验进行, 土壤中易分解基质逐渐被消耗, 基质有效性降低抑制了 CH_4 产生和排放^[66], Vizza 等^[52] 通过在湿地中添加易分解有机物后发现 CH_4 产生显著提高了 75%。可见 CH_4 产生受控于土壤基质有效性的影响^[67-68], 尤其是易分解基质。

4 结论

鄱阳湖沉水植物区土壤 CH_4 排放受温度、水分和土层及其交互作用的显著影响 ($P < 0.01$), 其中土层对 CH_4 排放的影响最大。此外, 0—10 cm 土壤 CH_4 平均排放速率、累积排放量及温度敏感性均高于 10—30 cm 土壤。

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

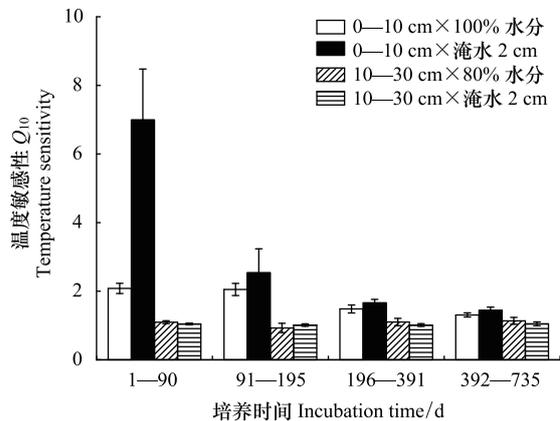


图 3 不同土层甲烷排放的温度敏感性

Fig. 3 Temperature sensitivity of methane emissions from different soil layers

- Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Neubauer S C, Magonigal J P. Moving beyond global warming potentials to quantify the climatic role of ecosystems. *Ecosystems*, 2015, 18(6): 1000-1013.
- [3] Zhu Q, Peng C H, Liu J X, Jiang H, Fang X Q, Chen H, Niu Z G, Gong P, Lin G H, Wang M, Wang H, Yang Y Z, Chang J, Ge Y, Xiang W H, Deng X W, He J S. Climate-driven increase of natural wetland methane emissions offset by human-induced wetland reduction in China over the past three decades. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 38020.
- [4] Kirschke S, Bousquet P, Ciais P, Saunois M, Canadell J G, Dlugokencky E J, Bergamaschi P, Bergmann D, Blake D R, Bruhwiler L, Cameron-Smith P, Castaldi S, Chevallier F, Feng L, Fraser A, Heimann M, Hodson E L, Houweling S, Josse B, Fraser P J, Krummel P B, Lamarque J F, Langenfelds R L, Le Quére C, Naik V, O'Doherty S, Palmer P I, Pison I, Plummer D, Poulter B, Prinn R G, Rigby M, Ringeval B, Santini M, Schmidt M, Shindell D T, Simpson I J, Spahni R, Steele L P, Strode S A, Sudo K, Szopa S, van der Werf G R, Voulgarakis A, van Weele M, Weiss R F, Williams J E, Zeng G. Three decades of global methane sources and sinks. *Nature Geoscience*, 2013, 6(10): 813-823.
- [5] Hirota M, Tang Y H, Hu Q W, Hirata S, Kato T, Mo W H, Cao G M, Mariko S. Methane emissions from different vegetation zones in a Qinghai-Tibetan Plateau wetland. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(5): 737-748.
- [6] Hirota M, Tang Y H, Hu Q W, Hirata S, Kato T, Mo W H, Cao G M, Mariko S. Carbon dioxide dynamics and controls in a deep-water wetland on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecosystems*, 2006, 9(4): 673-688.
- [7] Chen H, Wu N, Yao S P, Gao Y H, Zhu D, Wang Y F, Xiong W, Yuan X Z. High methane emissions from a littoral zone on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(32): 4995-5000.
- [8] Song C C, Xu X F, Tian H Q, Wang Y Y. Ecosystem-atmosphere exchange of CH₄ and N₂O and ecosystem respiration in wetlands in the Sanjiang Plain, Northeastern China. *Global Change Biology*, 2009, 15(3): 692-705.
- [9] 孙晓新, 宋长春, 王宪伟, 毛璐, 郭跃东, 路永正. 多年冻土退化对湿地甲烷排放的影响研究进展. *生态学报*, 2011, 31(18): 5379-5386.
- [10] Chen H, Zhu Q A, Peng C H, Wu N, Wang Y F, Fang X Q, Jiang H, Xiang W H, Chang J, Deng X W, Yu G R. Methane emissions from rice paddies natural wetlands, lakes in China: synthesis new estimate. *Global Change Biology*, 2013, 19(1): 19-32.
- [11] Zhou W C, Cui L J, Wang Y F, Li W. Methane emissions from natural and drained peatlands in the Zoigê, eastern Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Forestry Research*, 2017, 28(3): 539-547.
- [12] Sun L, Song C C, Lafleur P M, Miao Y Q, Wang X W, Gong C, Qiao T H, Yu X Y, Tan W W. Wetland-atmosphere methane exchange in Northeast China: a comparison of permafrost peatland and freshwater wetlands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 249: 239-249.
- [13] Zhang H, Yao Z S, Ma L, Zheng X H, Wang R, Wang K, Liu C Y, Zhang W, Zhu B, Tang X Y, Hu Z H, Han S H. Annual methane emissions from degraded alpine wetlands in the eastern Tibetan Plateau. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 1323-1333.
- [14] Wang H J, Lu J W, Wang W D, Yang L Y, Yin C Q. Methane fluxes from the littoral zone of hypereutrophic Taihu Lake, China. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(D17): D17109.
- [15] 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.
- [16] Tong C, Wang W Q, Zeng C S, Marrs R. Methane (CH₄) emission from a tidal marsh in the Min River Estuary, Southeast China. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2010, 45(4): 506-516.
- [17] Hu Q W, Cai J Y, Yao B, Wu Q, Wang Y Q, Xu X L. Plant-mediated methane and nitrous oxide fluxes from a *carex* meadow in Poyang Lake during drawdown periods. *Plant and Soil*, 2016, 400(1/2): 367-380.
- [18] Shao X X, Sheng X C, Mu M, Wu H, Ning X. Influencing factors of methane emission dynamics at different water depths in Hangzhou Bay Reed Wetland, China. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 2017, 36(5): 1301-1307.
- [19] Yang P, Wang M H, Lai D Y F, Chun K P, Huang J F, Wan S A, Bastviken D, Tong C. Methane dynamics in an estuarine brackish *Cyperus malaccensis* marsh: production and porewater concentration in soils, and net emissions to the atmosphere over five years. *Geoderma*, 2019, 337: 132-142.
- [20] 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(CH₄)排放研究. *生态学报*, 2001, 21(9): 1494-1497.
- [21] 马安娜, 陆健健. 芦苇在微咸水河口湿地甲烷排放中的作用. *生态学报*, 2011, 31(8): 2245-2252.
- [22] Wang X Y, Siciliano S, Helgason B, Bedard-Haughn A. Responses of a mountain peatland to increasing temperature: a microcosm study of greenhouse gas emissions and microbial community dynamics. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 110: 22-33.
- [23] 官少飞, 郎青, 张本. 鄱阳湖水生植被. *水生生物学报*, 1987, 11(1): 9-21.
- [24] 简敏菲, 简美锋, 李玲玉, 汪斯琛, 余厚平, 余冠军. 鄱阳湖典型湿地沉水植物的分布格局及其水环境影响因子. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(5): 765-772.
- [25] 聂兰琴, 付姗, 吴琴, 胡启武. 鄱阳湖典型沉水植物分布区 CO₂、CH₄释放日变化特征. *江西师范大学学报: 自然科学版*, 2014, 38(4):

- 429-433.
- [26] Leroy F, Gogo S, Guimbaud C, Bernard-Jannin L, Hu Z, Laggoun-Défarge F. Vegetation composition controls temperature sensitivity of CO₂ and CH₄ emissions and DOC concentration in peatlands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 107: 164-167.
- [27] Keller J K, White J R, Bridgham S D, Pastor J. Climate change effects on carbon and nitrogen mineralization in peatlands through changes in soil quality. *Global Change Biology*, 2004, 10(7): 1053-1064.
- [28] Xu X, Zhou Y, Ruan H H, Luo Y Q, Wang J S. Temperature sensitivity increases with soil organic carbon recalcitrance along an elevational gradient in the Wuyi Mountains, China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(10): 1811-1815.
- [29] Fissore C, Giardina C P, Kolka R K, Trettin C C. Soil organic carbon quality in forested mineral wetlands at different mean annual temperature. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(3): 458-466.
- [30] Inglett K S, Inglett P W, Reddy K R, Osborne T Z. Temperature sensitivity of greenhouse gas production in wetland soils of different vegetation. *Biogeochemistry*, 2012, 108(1/3): 77-90.
- [31] 丁维新, 蔡祖聪. 温度对甲烷产生和氧化的影响. *应用生态学报*, 2003, 14(4): 604-608.
- [32] Yvon-Durocher G, Allen A P, Bastviken D, Conrad R, Gudasz C, St-Pierre A, Thanh-Duc N, Del Giorgio P A. Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scales. *Nature*, 2014, 507(7493): 488-491.
- [33] Freeman C, Nevison G B, Kang H, Hughes S, Reynolds B, Hudson J A. Contrasted effects of simulated drought on the production and oxidation of methane in a mid-Wales wetland. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(1): 61-67.
- [34] Avery G B, Shannon R D, White J R, Martens C S, Alperin M J. Controls on methane production in a tidal freshwater estuary and a peatland: methane production via acetate fermentation and CO₂ reduction. *Biogeochemistry*, 2003, 62(1): 19-37.
- [35] Ding W X, Cai Z C, Wang D X. Preliminary budget of methane emissions from natural wetlands in China. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(5): 751-759.
- [36] Høj L, Olsen R A, Torsvik V L. Effects of temperature on the diversity and community structure of known methanogenic groups and other archaea in high Arctic peat. *The Isme Journal*, 2008, 2(1): 37-48.
- [37] Haugwitz M S, Bergmark L, Priemé A, Christensen S, Beier C, Michelsen A. Soil microorganisms respond to five years of climate change manipulations and elevated atmospheric CO₂ in a temperate heath ecosystem. *Plant and Soil*, 2014, 374(1/2): 211-222.
- [38] 何念鹏, 刘远, 徐丽, 温学发, 于贵瑞, 孙晓敏. 土壤有机质分解的温度敏感性: 培养与测定模式. *生态学报*, 2018, 38(11): 4045-4051.
- [39] Segers R. Methane production and methane consumption: a review of processes underlying wetland methane fluxes. *Biogeochemistry*, 1998, 41(1): 23-51.
- [40] 全川, 王维奇, 雷波, 林璐莹, 曾从盛. 闽江河口潮汐湿地甲烷排放通量温度敏感性特征. *湿地科学*, 2010, 8(3): 240-248.
- [41] 丁维新, 蔡祖聪. 沼泽甲烷排放及其主要影响因素. *地理科学*, 2002, 22(5): 619-625.
- [42] Shang Q Y, Yang X X, Gao C M, Wu P P, Liu J J, Xu Y C, Shen Q R, Zou J W, Guo S W. Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice-cropping systems: a 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments. *Global Change Biology*, 2011, 17(6): 2196-2210.
- [43] Bansal S, Tangen B, Finocchiaro R. Temperature and hydrology affect methane emissions from prairie pothole wetlands. *Wetlands*, 2016, 36(S2): 371-381.
- [44] 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. *生态学报*, 2002, 22(10): 1672-1679.
- [45] Henneberg A, Brix H, Sorrell B K. The interactive effect of *Juncus effusus* and water table position on mesocosm methanogenesis and methane emissions. *Plant Soil*, 2016, 400(1-2): 45-54.
- [46] 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.
- [47] Mander Ü, Maddison M, Soosaar K, Koger H, Teemusk A, Truu J, Well R, Sebilo M. The impact of a pulsing water table on wastewater purification and greenhouse gas emission in a horizontal subsurface flow constructed wetland. *Ecological Engineering*, 2015, 80: 69-78.
- [48] 孙志高, 刘景双. 三江平原典型草甸小叶章湿地土壤水分扩散率研究. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(2): 152-156.
- [49] McKenzie C, Schiff S, Aravena R, Kelly C, Louis V S. Effect of temperature on production of CH₄ and CO₂ from Peat in a Natural and Flooded Boreal Forest Wetland. *Climatic Change*, 1998, 40(2): 247-266.
- [50] 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.
- [51] Sutton-Grier A E, Magonigal J P. Plant species traits regulate methane production in freshwater wetland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(2): 413-420.
- [52] Vizza C, West W E, Jones S E, Hart J A, Lamberti G A. Regulators of coastal wetland methane production and responses to simulated global

- change. *Biogeosciences*, 2017, 14(2): 431-446.
- [53] Tong C, Wang W Q, Huang J F, Gauci V, Zhang L H, Zeng C S. Invasive alien plants increase CH₄ emissions from a subtropical tidal estuarine wetland. *Biogeochemistry*, 2012, 111(1/3): 677-693.
- [54] Wang J Y, Song C C, Wang X W, Song Y Y. Changes in labile soil organic carbon fractions in wetland ecosystems along a latitudinal gradient in Northeast China. *CATENA*, 2012, 96: 83-89.
- [55] 田应兵, 熊明彪, 熊晓山, 宋光煜. 若尔盖高原湿地土壤-植物系统有机碳的分布与流动. *植物生态学报*, 2003, 27(4): 490-495.
- [56] 高俊琴, 徐兴良, 张锋, 王春梅. 水分梯度对若尔盖高寒湿地土壤活性有机碳分布的影响. *水土保持学报*, 2008, 22(3): 126-131.
- [57] 张文敏, 吴明, 王蒙, 邵学新, 姜小三, 周斌. 杭州湾湿地不同植被类型下土壤有机碳及其组分分布特征. *土壤学报*, 2014, 51(6): 1351-1360.
- [58] 彭佩钦, 张文菊, 童成立, 仇少君, 张文超. 洞庭湖湿地土壤碳、氮、磷及其与土壤物理性状的关系. *应用生态学报*, 2005, 16(10): 1872-1878.
- [59] 高灯州, 曾从盛, 章文龙, 陈美田, 张新中. 闽江口湿地土壤有机碳及其活性组分沿水文梯度分布特征. *水土保持学报*, 2014, 28(6): 216-221, 227-227.
- [60] Liu D Y, Ding W X, Jia Z J, Cai Z C. The impact of dissolved organic carbon on the spatial variability of methanogenic archaea communities in natural wetland ecosystems across China. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2012, 96(1): 253-263.
- [61] Bhullar G S, Irvani M, Edwards P J, Olde Venterink H. Methane transport and emissions from soil as affected by water table and vascular plants. *BMC Ecology*, 2013, 13(1): 32.
- [62] 金奇, 吴琴, 钟欣孜, 胡佳, 胡启武. 鄱阳湖湿地水位梯度下不同植物群落类型土壤有机碳组分特征. *生态学杂志*, 2017, 36(5): 1180-1187.
- [63] Van den Pol-van Dasselaar A, Oenema O. Methane production and carbon mineralisation of size and density fractions of peat soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(6): 877-886.
- [64] 王洁, 袁俊吉, 刘德燕, 项剑, 丁维新, 蒋先军. 滨海湿地甲烷产生途径和产甲烷菌研究进展. *应用生态学报*, 2016, 27(3): 993-1001.
- [65] 金奇. 鄱阳湖典型湿地土壤微生物群落特征及对环境变化的响应研究[D]. 南昌: 江西师范大学, 2017.
- [66] 王维奇, 曾从盛, 仝川. 湿地甲烷氧化测定方法及主要控制因子研究综述. *亚热带资源与环境学报*, 2007, 2(3): 55-62.
- [67] 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.
- [68] 姜欢欢, 孙志高, 王玲玲, 孙万龙, 孙文广, 宋红丽. 黄河口潮滩湿地土壤甲烷产生潜力及其对有机物和氮输入响应的初步研究. *湿地科学*, 2012, 10(4): 451-458.