

温度和 CO₂ 浓度升高对稻田 CH₄ 排放的影响： T-FACE 平台观测研究

周 超, 刘树伟, 张 令, 张旭辉, 潘根兴, 邹建文*

(江苏省低碳农业与温室气体减排重点实验室, 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘 要:以同步模拟自由大气二氧化碳浓度和温度升高的太湖地区稻田 T-FACE 平台为依托, 采用静态暗箱-气相色谱法原位观测研究了温度(T)和 CO₂ 浓度(C)升高以及温度和 CO₂ 浓度同步升高(CT)对稻田 CH₄ 排放的影响。结果表明: 温度和 CO₂ 浓度升高并未改变稻田 CH₄ 排放的季节动态模式, 但显著增加水稻生长季 CH₄ 的排放量, 且促进效应依次为 C>CT>T。在本底自由大气处理(CK)条件下, 有、无水稻植株参与的稻田生态系统和土壤 CH₄ 季节平均排放通量分别为 1.88、1.08 mg·m⁻²·h⁻¹。有、无水稻植株参与下 C、CT 和 T 处理 CH₄ 季节排放量都较 CK 处理显著提高, 分别增加了 273%、106%、59% 和 317%、142%、79%。温度和 CO₂ 浓度升高显著增加了水稻生物量, 相对于 CK 而言, C、T 和 CT 处理导致水稻的生物量分别增加了 24%、7% 和 16%。无论有、无水稻植株参与, 稻田甲烷排放量与水稻生物量和产量均呈极显著正相关关系。

关键词: CO₂ 浓度升高; CH₄ 排放; 稻田; 水稻生物量

中图分类号: S161.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2013)10-2077-07 doi:10.11654/jaes.2013.10.026

Effect of Elevated CO₂ and Temperature on CH₄ Emissions from Rice Paddy Fields: A T-FACE Experiment

ZHOU Chao, LIU Shu-wei, ZHANG Ling, ZHANG Xu-hui, PAN Gen-xing, ZOU Jian-wen*

(Jiangsu Key Lab of Low Carbon Agriculture and GHGs Mitigation, College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: A field experiment was conducted to examine the effect of elevated atmospheric carbon dioxide (CO₂) and temperature on methane (CH₄) emissions from rice paddies at a T-FACE experimental station in Tai Lake region. Field treatments included the elevated free-air CO₂ concentration (C), increased air temperature (T), elevated CO₂ concentration and temperature (CT) and the ambient air control (CK) plots in the T-FACE field experiment platform. The fluxes of CH₄ emission from rice paddies were measured using static opaque chamber-gas chromatograph techniques. The results indicated that seasonal total CH₄ emissions were increased by elevated CO₂ concentrations and increased temperature, and their stimulating effects on CH₄ fluxes were followed as the order of C>CT>T. Seasonal fluxes of CH₄ from the control plots with or without rice crops involvement averaged 1.88 and 1.08 mg·m⁻²·h⁻¹, respectively, suggesting that rice cropping significantly increased CH₄ emissions from rice paddies. Relative to the control, CH₄ emissions from rice paddies were increased by 273%, 106% and 59% for the C, CT and T plots with rice crops involvement, and they were increased by 317%, 142% and 79% for the plots without rice crops involvement, respectively. Compared with the control, similarly, elevated atmospheric CO₂ and temperature increased rice biomass by 24%, 7% and 16% for the C, CT and T plots, respectively. Seasonal CH₄ emissions were significantly correlated with rice biomass and yield in this study.

Keywords: CO₂; CH₄ emission; rice paddy; rice biomass

收稿日期: 2013-01-11

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费(200903003); 国家杰出青年科学基金(41225003); 教育部优博专项基金(200969)

作者简介: 周 超(1988—), 硕士研究生, 主要从事碳氮循环与全球变化研究。

* 通信作者: 邹建文 E-mail: jwzou21@njau.edu.cn

温室气体引起的全球变暖和臭氧层破坏是当今两大全球环境问题。 CH_4 是仅次于 CO_2 的三大温室气体之一,其浓度由工业化前的 $0.7\ \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加了149%^[1]。水稻是我国主要粮食作物,稻田是大气 CH_4 的重要排放源之一^[2]。据IPCC估算,稻田 CH_4 的年排放量占全球 CH_4 总排放量的5%~19%^[3]。我国稻田 CH_4 排放量为 $6\sim 10\ \text{Tg}\cdot\text{a}^{-1}$,约占全球稻田 CH_4 排放总量的三分之一^[4]。

自20世纪80年代,国内外学者对我国稻田的温室气体排放进行了大量研究,主要涉及到稻田 CH_4 排放过程、驱动机制及水肥管理等农业管理措施对 CH_4 排放的影响^[5-6]。最近10年,模拟未来气候变化对稻田生态系统微量气体排放的影响研究日益受到重视。王大力等^[7]和Ziska等^[8]采用OTC(Open-top-chamber)技术、以及日本学者Inubushi等^[9]、我国学者马红亮等^[10]和郑循华等^[11]利用FACE(Free air carbon-dioxide enrichment)平台相继观测研究了大气 CO_2 浓度升高对稻田 CH_4 排放的影响。此外,众多研究表明温度对 CH_4 的产生和排放有显著的影响^[12-15],实际观测和GCMs模型的预测结果均表明,大气中 CO_2 浓度升高伴随有温度的升高。因此,以往研究仅考虑 CO_2 浓度升高或温度升高对稻田 CH_4 排放的影响,无法揭示 CO_2 浓度和温度同步升高的交互作用对稻田 CH_4 排放的影响。

本研究依托同步模拟自由大气 CO_2 浓度升高和温度升高的T-FACE观测研究平台,以我国太湖地区稻田为研究对象,采用静态暗箱-气相色谱法原位观测不同处理(T、 CO_2 、T+ CO_2)下稻田 CH_4 的排放通量,了解 CO_2 浓度、温度升高及其交互作用对稻田 CH_4 排放的影响规律,为预测未来气候变化情景下稻田 CH_4 排放提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

田间试验于2011年在江苏常熟古里镇的T-FACE试验田中进行,T-FACE观测平台占地 $13\ 334\ \text{m}^2$,2009年建于江苏太湖地区(常熟),用于模拟自由大气 CO_2 浓度升高和温度升高,共11个FACE圈,每个FACE圈直径18 m。FACE圈 CO_2 浓度设置按IPCC第四次评估报告的气候变化最大情景(2050年大气 CO_2 浓度为 $500\ \text{mL}\cdot\text{m}^{-3}$)设置,采用 CO_2 发生器向近冠层空气释放 CO_2 装置,空气 CO_2 浓度由 CO_2 探头控制,监测结果表明FACE圈大气 CO_2 实际浓度范

围为 $(500\pm 26)\ \text{mL}\cdot\text{m}^{-3}$,本底对照 CO_2 浓度为 $(412\pm 21)\ \text{mL}\cdot\text{m}^{-3}$ 。FACE圈升温设置按IPCC第四次评估报告的气候变化最大情景,根据中国气候变化的区域差异设置温度条件,设置升温 $2\ ^\circ\text{C}$ 。采用红外灯辐射促使近地表空气温度升高的方法,监测近冠层空气温度的结果表明实际气温升高范围为 $(2.0\pm 0.4)\ ^\circ\text{C}$ 。FACE圈田间排列根据试验地气候特点,按照国际上普遍采用的方式布置^[16-17],每个FACE圈安装4个红外灯以使圈内近冠层空气温度加热均匀。由于FACE圈没有任何隔离设施,气体可以自由流通,因此系统内部通风、光照、温度、湿度等条件十分接近自然生态环境,在这一微域生态环境条件下进行 CO_2 增加的模拟试验,获得的数据更接近于真实情况。

试验地种植方式长期以稻麦轮作为主。土壤为水稻土(乌栅土),有机碳和全氮含量分别为 $15.21\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.29\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH(液土比2.5:1)为6.7。水稻供试品种为常优5号,2011年6月9日播种,6月24日移栽,10月27日收获,FACE圈内水稻株行距、田间管理措施与圈外一致,按照当地稻田常规管理措施进行。田间试验按照大气 CO_2 浓度升高(记为C)和温度升高(记为T)2因素2水平完全方案设计,试验处理为大气 CO_2 浓度升高(记为C)、温度升高(记为T)、大气 CO_2 浓度和温度同步升高(记为CT)、以及自由大气本底对照处理(记为CK)。C、T和CT每个处理3个重复,CK处理重复2次,共11个试验圈。每个圈内分别设置2个底座用于采样,底座为上下两端无底、高度15 cm的筒状圈,由紫砂盆加工制成。一个底座包含水稻植株参与,用于稻田生态系统 CH_4 排放的测定;另一个底座埋于稻田行间,底座内不包含水稻植株参与,但底座外水稻根系及土壤养分可以进入底座内土壤,代表稻田土壤 CH_4 排放。水稻移栽前3~4 d开始灌溉淹水,淹水期保持到8月,在8月1日烤田一周左右,然后至10月初田间处于干湿交替的间歇灌溉状态,直到水稻收获前一周落干。在水稻生长的全生育期内其他田间管理措施以及病虫害防治与当地普通生产一致。

1.2 气样采集与分析

稻田 CH_4 排放通量采用静态暗箱-气相色谱法进行观测与分析^[18]。采样箱箱体由不锈钢材料制成,规格为 $10\ \text{cm}$ (半径) $\times 100\ \text{cm}$ (高),采样箱材料对 CH_4 为惰性,外包一层海绵和铝箔用以减缓箱内空气的温度变化。于水稻移栽前将与箱体相配套的不锈钢底座固定于土壤中,每次收集气体时,上部采样箱插入下

部底座的底槽内,槽内用水密封。另外,在水稻移栽之前在田间设置栈桥以减少采样过程中对生态系统的人为扰动。采样频率、采样时间等的确定与本课题组近 10 多年的稻田温室气体排放通量观测研究一致^[18]。水稻移栽后即开始采样,采样频率为每周一次,一周烤田期每两天采样一次。水稻生长季采样时间控制在上午 8:00 到 10:00 之间,每个试验圈内采用 2 个箱体平行采样,分别用于测定有无水稻植株参与的稻田生态系统和土壤 CH₄ 排放通量,采样时间分别为关箱后的 0.5、10、15、20 min,每次采集 60 mL 气样。气样采集当天用 Agilent 4890A 气相色谱分析 CH₄ 的排放通量。CH₄ 排放通量用各重复的平均值表示,CH₄ 季节排放总量是将各重复的观测值按时间间隔加权平均后获得。

1.3 水稻生物量及土壤理化性质测定^[19]

水稻生物量分析采用烘干法。采集 0.5 m×0.5 m 面积上的水稻植株,用水冲洗干净,105 ℃杀青后于 80 ℃烘干至恒重称量。土壤样品于 2011 年 10 月 27 日采集,其 pH 用 pH 计测定;有机碳用重铬酸钾容量法-外加热法测定;全氮用半微量开氏法

测定。

1.4 统计分析

采用方差分析和多重比较进行不同处理间 CH₄ 排放量以及作物生物量和产量的差异性分析。采用指数回归分析稻田 CH₄ 排放量与生物量和产量的关系,数据统计分析通过 JMP 7.0 统计软件进行。

2 结果与讨论

2.1 稻田 CH₄ 的季节排放动态

大气 CO₂ 浓度升高和温度升高及其交互处理与对照处理的稻田 CH₄ 季节排放模式一致。如图 1、图 2 所示,无论有无水稻植株的参与,各处理稻田的水稻生长季 CH₄ 排放通量从时间上大致分为两个阶段,第一阶段为水稻移栽后 38 d 以内,第二阶段从插秧后 38 d 左右到水稻收割。前一阶段 CH₄ 排放显著偏高,并在 30 d 左右产生 CH₄ 排放高峰,主要是由于前茬作物收获后部分秸秆残留为产 CH₄ 过程提供了丰富的反应底物,且稳定的淹水状态大大降低了土壤氧化还原电位(Eh),这给产甲烷菌的生长创造了一个有利的环境条件,从而产生并排放出较多 CH₄^[20]。插秧

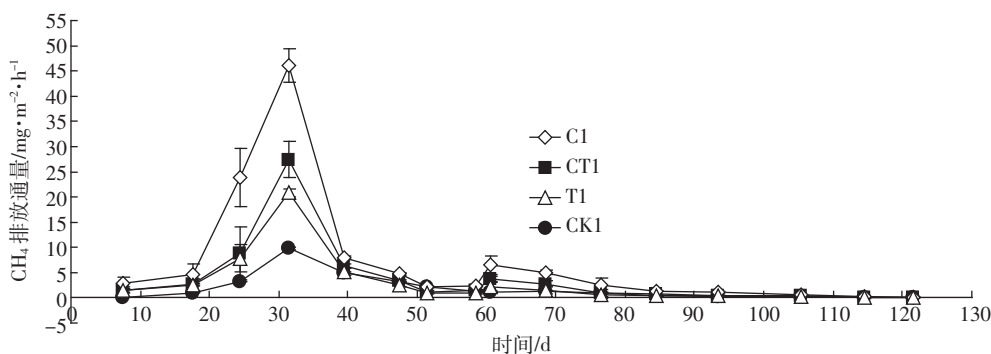


图 1 有水稻栽培条件下水稻生长期 CH₄ 的通量排放动态

Figure 1 Dynamics of CH₄ fluxes from the rice-planted plots

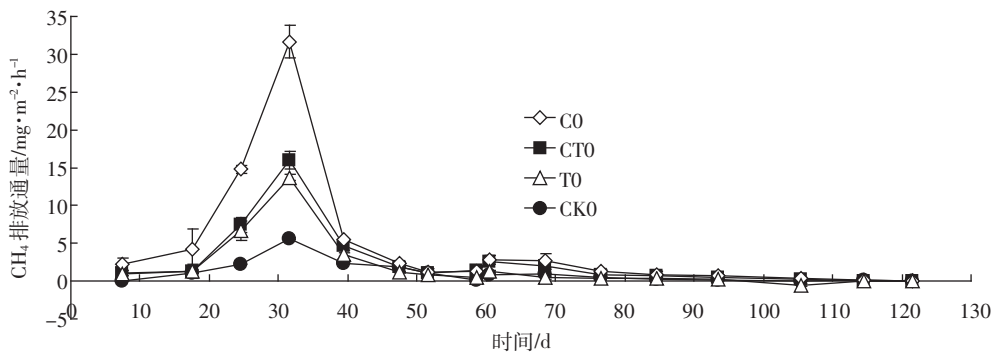


图 2 无水稻栽培条件下水稻生长期 CH₄ 的通量排放动态

Figure 2 Dynamics of CH₄ fluxes from the plots without rice crop involvement

后 38 d 左右开始第一次排水烤田, CH₄ 的排放因烤田而迅速受到抑制, 之后虽有所回升, 但排放强度远不如烤田以前。一方面是由于土壤环境由厌氧变成好氧, 土壤 Eh 大幅度升高, 产甲烷菌数量与活性都受到抑制, 即使重新淹水土壤 Eh 也不可能在短期内降低到适宜甲烷产生的水平^[21]; 另一方面是由于还田秸秆在好氧条件下极易分解, 土壤中有机质急剧减少, 产 CH₄ 的底物浓度降低^[22]。因此, 烤田后土壤甲烷产生速率减小, 甲烷氧化率增加, 从而甲烷排放减少。

2.2 温度和 CO₂ 浓度升高对 CH₄ 排放的影响

如表 1 所示, 有植株参与处理的 CH₄ 排放高于无植株参与处理, 对应的本地自由大气处理(CK)稻田 CH₄ 季节平均排放通量分别为 1.88、1.08 mg·m⁻²·h⁻¹, 水稻种植条件下 C、CT 和 T 处理的 CH₄ 季节平均排放通量分别为 6.99、3.87、2.99 mg·m⁻²·h⁻¹, 无水稻种植条件下各处理的 CH₄ 季节平均排放通量分别为 4.50、2.61、1.94 mg·m⁻²·h⁻¹。相对于无植株参与处理, 水稻植株参与下 C、CT、T 和 CK 处理的 CH₄ 季节总排放量分别增加了 55%、48%、54% 和 74%。从整个水

表 1 不同处理稻田 CH₄ 季节排放总量、水稻产量及生物量
Table 1 Seasonal total of CH₄ emission, rice yield and biomass for different treatments

处理	CH ₄ 季节排放总量/kg·hm ⁻²		增加率/ %	生物量/ t·hm ⁻²	产量/ t·hm ⁻²
	水稻植株参与	无水稻植株参与			
CK	50.39±0.56d	28.99±0.20d	74	15.22±0.06d	3.82±0.05d
C	187.83±14.61a	120.86±4.01a	55	18.83±0.20a	4.47±0.04a
T	80.34±5.48c	52.02±2.43c	54	16.35±0.05c	4.04±0.02c
CT	104.04±10.92b	70.13±5.43b	48	17.70±0.10b	4.20±0.07b

注: CK 为对照处理; C 为 CO₂ 浓度处理; T 为温度处理; CT 为两者交互处理。数据为平均值±标准误。同一列英文小写字母不同表示处理间某指标差异显著 ($P<0.05$)。

稻生长季的 CH₄ 排放强度来看, 本研究结果和之前的一些对于该地区稻田生态系统的研究结果相当^[23-25]。水稻植株显著影响稻田甲烷的产生和排放, 植株根系分泌大量有机物质, 作为甲烷的前体显著促进甲烷的产生; 由于水稻植株内部通气组织发达, 茂密的水稻根系组织分布在稻田土壤中, 能主动汲取溶有甲烷的土壤水, 使甲烷进入通气组织, 极大促进了稻田甲烷从根区向大气环境的传输^[26]。因此, 水稻种植都能增加各处理稻田 CH₄ 季节排放, 且 C>CT>T。

方差分析结果表明, 无论有、无水稻植株参与, 大气 CO₂ 浓度升高、温度升高以及两者的交互效应均显

著影响稻田 CH₄ 的排放(表 2)。相对于 CK 处理, 有、无植株参与的 C、CT 和 T 处理的 CH₄ 季节排放量都显著提高, 分别增加了 273%、106%、59% 和 317%、142%、79%。

表 2 温度和 CO₂ 浓度升高对稻田 CH₄ 季节排放总量、水稻产量及生物量影响的方差分析

Table 2 A two-way ANOVA for effects of elevated temperature and CO₂ on seasonal CH₄ emission, rice yield and biomass

因子	DF	CH ₄ 季节排放总量				生物量		产量	
		水稻植株参与		无水稻植株参与					
		SS	F	SS	F	SS	F	SS	F
C	1	17 313	166.9**	8063	549.1**	16.5	997.4**	0.46	178.8**
T	1	1932	18.6**	511	34.8**	0.001	0.03	0.001	0.4
C×T	1	8625	83.2**	3626	246.9**	3.5	209.6**	0.17	67.5**
Model	3	28 022	90.1**	12 066	273.9**	18.9	6.3**	0.59	77.5**
Error	7	726		103		0.1		0.02	

注: ** $P<0.001$ 。

以往我国稻麦轮作系统 FACE 试验结果表明, CO₂ 浓度增加导致稻田 CH₄ 排放量增加 30%~200%^[27]。在我国和日本的稻田生态系统进行的 FACE 试验都表明, 大气 CO₂ 浓度增加促进稻田 CH₄ 排放, 主要是由于 CO₂ 增加导致水稻根系生长和根系分泌功能增强, 增加了水稻根际产甲烷菌的有效底物, 从而促进产甲烷菌的代谢活性^[28-29]。但也有学者持不同的观点, Cotrufo 等^[30-31]认为, 高浓度 CO₂ 下生长形成的植物有机质 C/N 比增大, 有机质分解时微生物 N 营养相对不足, 分解速率下降。因此, 虽然由于 CO₂ 增加导致水稻根系生物量和分泌物增加, 但由于根系脱落组织、衰老根系以及分泌物的可降解性减弱, 导致 CH₄ 排放的变化不明显。温度对 CH₄ 的产生和排放有明显的影响, Thomas 等^[32]发现 CH₄ 排放量取决于温度的高低, 水稻土 CH₄ 排放量当温度由 20℃ 上升到 25℃ 时可以增加 1 倍^[33]。日本和美国水稻土在不同温度下培养试验结果表明, CH₄ 排放与温度之间存在显著的相关性^[34], 35℃ 时的产 CH₄ 量显著高于 25℃。蔡祖聪等^[35]的田间试验发现下午温度比上午高, 田间 CH₄ 排放量也显著升高。

2.3 水稻生长对 CH₄ 排放的影响

从表 1 和表 2 可以看出, 温度升高对水稻产量和生物量的影响不显著, CO₂ 浓度升高显著增加了水稻的生物量和产量, 而 CO₂ 对水稻产量和生物量的施肥效应因温度升高而有所降低。相对于 CK 而言, C、CT 和 T 处理水稻生物量分别增加了 24%、16% 和 7%。以

往研究表明,FACE 处理使水稻生物量显著增加,平均比对照增加 13%^[36],主要是因为穗数和结实率的增加所致^[37],与 Mark 和 Kim 等^[38-39]的 FACE 试验结果类似。然而,Kimball 和 David 等^[40-41]发现 CO₂ 浓度升高对作物的影响并不十分明显,当前研究结果高估了大气 CO₂ 浓度升高对作物生长的影响。模型预测表明,伴随大气中 CO₂ 浓度上升,全球平均气温将上升 1.1~6.4 °C,而温度升高缩短了作物生育期从而导致作物减产^[42]。最新的研究认为温度对某些作物生长影响是非线性的,当温度高于关键温度后其生物量会迅速下降^[43]。本实验中温度升高得到增产的结果,可能是白天气温增高使 CO₂ 浓度上升对作物光合作用的促进作用增强^[44],与朱大威等^[45]的模型结果类似,他发现未来气候对作物影响时,温度对水稻生长起促进作用。然而,Michael^[46]认为,温度升高 2 °C 将导致全球作物产量降低。Lal^[47]等利用 CERES 水稻模型预测日平均上升 2 °C 将抵消 CO₂ 浓度升高对水稻产量的肥料效应,与本试验的研究结果相一致。另外,由于 T-FACE 田间观测病虫害试验研究的需要,水稻生长后期对田间病虫害药剂防治次数进行了适当控制,可能是导致本试验水稻产量较低的重要原因之一。

以往许多研究表明稻田 CH₄ 排放量与水稻生长状况有关^[48]。本研究亦发现温度和 CO₂ 浓度升高条件下 CH₄ 排放量的增加与水稻生物量和产量的增加紧密相关。从图 3 可以看出,无论有、无水稲植株参与,稻田甲烷排放量与水稻生物量和产量均呈现极显著相关关系,通过有、无水稲植株参与的稻田甲烷排放量与水稻生物量和产量的拟合关系可以看出,温度和 CO₂ 浓度升高各处理下甲烷排放量的增加很大程度上归因于水稻的生物量和产量的增加,为 CH₄ 产生提供了大量有机碳底物。

3 结论

(1)大气 CO₂ 浓度升高和温度升高及其交互作用各处理稻田 CH₄ 排放的季节动态一致,主要受稻田水分管理模式控制。

(2)温度和 CO₂ 浓度升高都能增加稻田 CH₄ 季节排放,且尤以 CO₂ 浓度升高的增加效应最为显著。与无水稲植株参与相比,水稻植株参与导致稻田 CH₄ 排放量增加。

(3)CO₂ 浓度升高导致水稻的生物量和产量显著增加,温度升高对水稻产量和生物量的影响不显著。水稻生物量和产量与稻田甲烷排放量具有极显著的

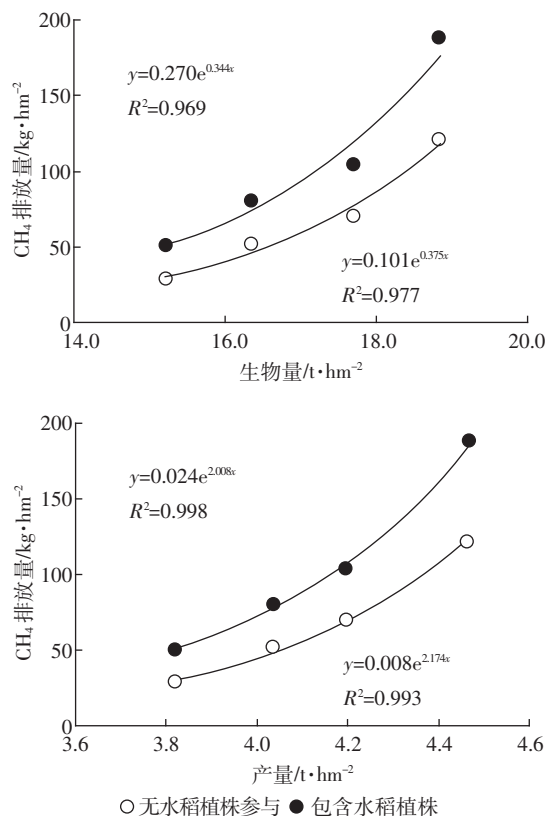


图 3 稻田甲烷排放量与生物量和产量的回归关系

Figure 3 Correlation of seasonal CH₄ emission with rice biomass and yield

正相关关系。

参考文献:

- [1] 陈书涛. 管理措施对农田生态系统土壤呼吸、N₂O 和 CH₄ 排放的影响[D]. 南京:南京农业大学, 2007.
Chen Shu-tao. Effect of management regime on soil respiration, N₂O and CH₄ emissions from agroecosystems[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007.
- [2] Yang S S, Liu C M, Lai C M, et al. Estimation of methane and nitrous oxide emission from paddy fields and uplands during 1990—2000 in Taiwan[J]. *Chemosphere*, 2003, 52: 1295–1305.
- [3] IPCC. Agriculture[C]//Climate Change 2007: Mitigation, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [4] Yan X Y, Cai Z C, Ohara T, et al. Methane emission from rice fields in mainland China: Amount and seasonal and spatial distribution[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D16): 4505.
- [5] Zou J W, Huang Y, Jiang J Y, et al. A 3-year field measurement of methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in China: Effects of water regime, crop residue, and fertilizer application[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19, GB2021, doi: 10.1029/2004GB002401.
- [6] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 等. 不同施肥处理稻田甲烷和氧化亚氮排

- 放特征[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 143-148.
- QIN Xiao-bo, LI Yu-e, LIU Ke-ying, et al. Methane and nitrous oxide emission from paddy field under different fertilization treatments [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(7): 143-148.
- [7] 王大力, 朱立民. CO₂ 倍增对稻田 CH₄ 排放的影响[J]. 植物生态学报, 1999, 23(5): 451-457.
- WANG Da-li, ZHU Li-min. Effects of CO₂ enrichment on CH₄ emission from rice paddies[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, 23(5): 451-457.
- [8] Ziska L H, Moya T B, Wassmann R, et al. Long-term growth at elevated carbon dioxide stimulates methane emission in tropical paddy rice[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(6): 657-665.
- [9] Inubushi K, Cheng W G, Aonuma S, et al. Effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on CH₄ emission from a rice paddy field[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(10): 1458-1464.
- [10] 马红亮, 朱建国, 谢祖彬, 等. 自由大气 CO₂ 浓度升高对稻田 CH₄ 排放的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(6): 1217-1224.
- MA Hong-liang, ZHU Jian-guo, XIE Zu-bin, et al. The effects of elevated atmospheric [CO₂] on emission of CH₄ from rice paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(6): 1217-1224.
- [11] Zheng X H, Zhou Z X, Wang Y S, et al. Nitrogen-regulated effects of free-air CO₂ enrichment on methane emissions from paddy rice fields [J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(9): 1717-1732.
- [12] 上官行健, 王明星, 陈德章, 等. 稻田土壤中的甲烷产生[J]. 地球科学进展, 1993, 8: 1-12.
- SHANGGUAN Xing-jian, WANG Ming-xing, CHEN De-zhang, et al. Methane production in rice paddy fields[J]. *Advance in Earth Science*, 1993, 8: 1-12.
- [13] Sass R L, Fisher F M, Turner F T, et al. Methane emission from rice fields as influenced by solar radiation, temperature, and straw incorporation[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1991, 5: 335-350.
- [14] Wassmann R H U, Neue C Bueno, Lantin R S, et al. Methane production capacities of different rice soils derived from inherent and exogenous substrates[J]. *Plant and Soil*, 1998, 203: 227-237.
- [15] 郭建平, 高素华. 高温、高 CO₂ 对农作物影响的试验研究[J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(1): 17-20.
- GUO Jian-ping, GAO Su-hua. The experimental study on impacts of high temperature and high CO₂ concentration on crops[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2002, 10(1): 17-20.
- [16] 刘 钢, 韩 勇, 朱建国, 等. 稻麦轮作 FACE 系统平台 I. 系统结构与控制应用[J]. 应用生态学报, 2002, 13(10): 1253-1258.
- LIU Gang, HAN Yong, ZHU Jian-guo, et al. Rice-wheat rotational FACE platform: I. System structure and control[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(10): 1253-1258.
- [17] Ainsworth E Beier, C Calfapietra, C Ceulemans, et al. Next generation of elevated [CO₂] experiments with crops: A critical investment for feeding the future world[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2008, 31(9): 1317-1324.
- [18] 邹建文, 黄 耀, 宗良纲, 等. 稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2003, 23(6): 758-764.
- ZOU Jian-wen, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. A field study on CO₂, CH₄ and N₂O emissions from rice paddy and impact factors[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(6): 758-764.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO Shi-dan. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [20] 赵 英, 钱泽澍. 水稻田中占优势的产甲烷菌[J]. 中国沼气, 1993, 11(4): 6-10.
- ZHAO Ying, QIAN Ze-shu. The predominant methanogens in paddy soils[J]. *China Biogas*, 1993, 11(4): 6-10.
- [21] 徐 华, 蔡祖聪, 李小平. 烤田对种稻土壤甲烷排放的影响[J]. 土壤学报, 2000, 37(1): 69-76.
- XU Hua, CAI Zu-cong, LI Xiao-ping. Effect of soil during on CH₄ flux from rice paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(1): 69-76.
- [22] 徐仲均, 郑循华, 王跃思, 等. 开放式空气 CO₂ 增高对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(10): 1245-1248.
- XU Zhong-jun, ZHENG Xun-hua, WANG Yue-si, et al. Effects of elevated atmospheric CO₂ on CH₄ and N₂O emissions from paddy fields[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(10): 1245-1248.
- [23] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 华东稻田 N₂O 和 CH₄ 排放[J]. 大气科学, 1997, 21(2): 231-237.
- ZHENG Xun-hua, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. CH₄ and N₂O emissions from rice paddy fields in Southeast China[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1997, 21(2): 231-237.
- [24] 李香兰, 马 静, 徐 华, 等. 水分管理对水稻生长期 CH₄ 和 N₂O 排放季节变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 535-541.
- LI Xiang-lan, MA Jing, XU Hua, et al. Effect of water management on seasonal variations of methane and nitrous oxide emissions during rice growing period[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2): 535-541.
- [25] Minami K, Neue H U. Rice paddies as a methane source[J]. *Climatic Change*, 1994, 27: 13-26.
- [26] 贾仲君, 蔡祖聪. 水稻植株对稻田甲烷排放的影响 [J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 2049-2053.
- JIA Zhong-jun, CAI Zu-cong. Effects of rice plants on methane emission from paddy fields[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 2049-2053.
- [27] Xu Z J, Zheng X H, Wang Y S, et al. Effects of elevated CO₂ and N fertilization on CH₄ emissions from paddy rice fields[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(3): 1-9.
- [28] Megonigal J P, Schlesinger W H. Enhanced CH₄ emissions from a wetland soil exposed to elevated CO₂[J]. *Biogeochemistry*, 1997, 37(1): 77-88.
- [29] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 华东稻麦轮作生态系统的 N₂O 排放研究[J]. 应用生态学报, 1997, 8(5): 495-499.
- ZHENG Xun-hua, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. N₂O emission from rice wheat ecosystem in Southeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(5): 495-499.
- [30] Cotrufo M F, Ineson P. Elevated CO₂ reduces field decomposition rates of *Betula pendula* (Roth) leaf litter[J]. *Oecologia*, 1996, 106(4): 525-530.

- [31] Cotrufo M F, Briones M J I, Ineson P. Elevated CO₂ affects field decomposition rate and palatability of tree leaf litter: Importance of changes in substrate quality[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(12): 1565–1571.
- [32] Thomas K L, Benstead J, Davies K L, et al. Role of wetland plants in the diurnal control of CH₄ and CO₂ fluxes in peat[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28: 17–23.
- [33] Holzapfel-Pschorn A, Conrad R, Seiler W. Effects of vegetation on the emission of methane from submerged paddy soil[J]. *Plant and Soil*, 1986, 92: 223–233.
- [34] Yagi K, Minami K. Effect of organic matter applications on methane emission from some Japanese paddy fields[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1990, 36(4): 599–610.
- [35] 蔡祖聪, 沈光裕, 颜晓元, 等. 土壤质地、温度和 Eh 对稻田甲烷排放的影响[J]. 土壤学报, 1998, 35(2): 145–153.
CAI Zu-cong, SHEN Guang-yu, YAN Xiao-yuan, et al. Effects of soil texture, soil temperature and Eh on methane emissions from rice paddy fields[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(2): 145–153.
- [36] Long S P, Ainsworth E A, Leakey A D B, et al. Food for thought: Lower-than expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentration[J]. *Science*, 2006, 312: 1918–1921.
- [37] 王春乙, 潘亚茹, 白月明, 等. CO₂ 浓度倍增对中国主要作物影响的试验研究[J]. 气象学报, 1997, 55(1): 86–94.
WANG Chun-yi, PAN Ya-ru, BAI Yue-ming, et al. The experiment study of effects doubled CO₂ concentration on several main crops in China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1997, 55(1): 86–94.
- [38] Mark L, Han-Yong K, Kazuhiko K, et al. The impact of elevated CO₂ on the elemental concentration of field-growth rice grain[J]. *Field Crops Research*, 2004, 88(2/3): 279–286.
- [39] Kim H Y, Lieffering M, Kobayashi K, et al. Seasonal changes in the effects of elevated CO₂ on rice at three levels of nitrogen supply: A free air CO₂ enrichment (FACE) experiment[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(6): 826–837.
- [40] Kimball B A, Kobayashi K, Bindi M. Responses of agriculture crops to free-air CO₂ enrichment[J]. *Advances in Agronomy*, 2002, 77: 293–368.
- [41] David S. Climate change and crop yields: Beyond Cassandra[J]. *Science*, 2006, 312: 1889–1890.
- [42] Erda I, Wei X, Hui J, et al. Climate change impacts on crop yield and quality with CO₂ fertilization in China[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2005, 360: 2149–2154.
- [43] Sclenker W, Roberts M J. Nonlinear effect of weather on corn yields[J]. *Review of Agricultural Economics*, 2006, 28: 391–398.
- [44] Long S P. Modification of the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric CO₂ concentration: Has its importance been underestimated? [J]. *Plant, Cell & Environment*, 1991, 14: 729–739.
- [45] 朱大威, 金之庆. 气候及其变率变化对东北地区粮食生产的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(9): 1588–1597.
ZHU Da-wei, JIN Zhi-qing. Impacts of changes in both climate and its variability on food production in Northeast China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(9): 1588–1597.
- [46] Michael H. Climate takes aim[J]. *Nature*, 2007, 446: 706–707.
- [47] Lal M, Singh K K, Rathore L S, et al. Vulnerability of rice and wheat yields in NW India to future changes in climate[J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 1998, 89: 101–114.
- [48] Shang Q Y, Yang X X, Gao C M, et al. 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[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(6): 2196–2210.