

自由大气 CO₂ 浓度升高对稻田 CH₄ 排放的影响研究

马红亮¹, 朱建国², 谢祖彬², 刘 钢², 曾 青²

(1. 湿润亚热带生态-地理过程省部共建教育部重点实验室, 福建省亚热带资源与环境重点实验室, 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 中科院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘 要:采用 FACE 田间试验, 对高 CO₂ 浓度影响稻田 CH₄ 排放规律进行了观测分析, 并利用 $\delta^{13}\text{C}$ 技术初步分析了土壤 CH₄ 的排放来源。结果显示, 植株和土壤的 CH₄ 排放速率在高 CO₂ 浓度处理大于对照 18% 以上, 其增加幅度为土壤大于植物, CH₄ 排放速率可能受田间水分条件影响较大。与对照比较, 高 CO₂ 浓度条件下植物和土壤部分 CH₄ 累积排放总量增加, 且变化幅度随生长期而降低, 前期(54 d)常规氮处理(NN)高于低氮处理(LN), 后期 LN 高于 NN; 但是行间裸土 CH₄ 累积排放总量在前期(54 d)增加和之后降低的幅度均为 NN 高于 LN。土壤排放 CH₄ $\delta^{13}\text{C}$ 值从移栽到第 102 d, 高 CO₂ 浓度处理 LN 和 NN 水平下土壤对照(CK)仅分别升高 9.0% 和 8.3%, 种水稻则降低 8.8% 和 8.1%; 但是在对照 CO₂ 浓度条件下土壤对照降低 17.2% 和 112.5% ($P=0.047$), 种水稻降低 40.3% 和 105.9% ($P=0.023$), 表明高 CO₂ 浓度下有更多 C₄ 来源的碳释放, 对照 CO₂ 浓度条件下有更多 C₃ 来源的碳释放。水稻不同生长期与土壤对照比较, 种水稻土壤排放 CH₄ $\delta^{13}\text{C}$ 值降低的幅度总和在高 CO₂ 浓度条件 LN 和 NN 水平下分别为 114.8% 和 72.7%, 对照 CO₂ 浓度条件下分别为 41.9% 和 72.8%, 表明在种有植物的情况下更多当季的碳分解释放, LN 水平下高 CO₂ 浓度促进来源于当季碳的 CH₄ 排放, NN 水平下没有发现 CO₂ 浓度的影响, 可能与作物生物量和它的间接产物(根系分泌物)的影响有关。

关键词:高 CO₂ 浓度; CH₄ 排放; N 水平; C₄ 土壤; ^{13}C

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)06-1217-08

The Effects of Elevated Atmospheric [CO₂] on Emission of CH₄ from Rice Paddy Field

MA Hong-liang¹, ZHU Jian-guo², XIE Zu-bin², LIU Gang², ZENG Qing²

(1. Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Process, Ministry of Education, Fujian Provincial Key Laboratory of Subtropical Resources and Environment, School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: This study was conducted indirectly to analyze the effects of elevated CO₂ on CH₄ emission from different pools in rice paddy field based on the ^{13}C isotope technique. Results showed that in rice season elevated CO₂ increased the CH₄ emission from plant and soil in field more than 18% compared to ambient CO₂, with great degree for soil than plant, which was affected maybe by water content changes. Compared with the control the cumulative CH₄ emissions were increased from plants and soil under conditions of high CO₂ concentrations, and the magnitude of changes lowered with the growing season. Cumulative CH₄ emissions increasing magnitude was higher at NN than at LN before earlier stage (54 days), and higher at LN than at NN in latter growth stage. However, cumulative CH₄ emissions from control without plant (CK) in the earlier period (54 days) to increase and in latter stage to decrease were larger at NN than at LN. From transplanting to the 102 days, soil emission CH₄ $\delta^{13}\text{C}$ values were increased only by 9.0% and 8.3% in control (CK) at LN and NN levels under high CO₂ concentration, decreased by 8.8% and 8.1% in soil with plant, but under the control CO₂ concentration it was decreased by 17.2% and 112.5% ($P=0.047$) in control (CK) and by 40.3% and 105.9% ($P=0.023$) in soil with plant at LN and NN levels, respectively. Results suggested that there are more carbon emissions from C₄ source under elevated CO₂ concentrations and more from C₃ sources under control CO₂ concentration. At different growth stages of rice, compared with the soil control the sum of soil emission CH₄ $\delta^{13}\text{C}$ value reduced under condition with plant growth were 114.8% and 72.7% at LN and NN levels under high CO₂ concentration, were 41.9% and 72.8% under control CO₂ concentration. Results indicated that there are more new carbon decomposed to release under plants growth and, elevated CO₂ concentration promote the CH₄ emissions from new carbon sources at LN, which might be related to biomass and its indirect products (root exudates) related to the impact.

Keywords: elevated CO₂; CH₄ emission; N level; C₄ soil; ^{13}C isotope

收稿日期: 2009-09-08

基金项目:福建省青年科技人才创新项目(2007F3020);福建省自然科学基金(2009J0101);国家自然科学基金(40901115);国家自然科学基金重点项目(40231003);土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放基金(0812000054)

作者简介:马红亮(1978—),男,山西原平人,博士,副教授,主要从事全球变化、土壤碳氮循环与调控方面的研究。E-mail: mhl936@163.com

受大气 CO₂ 浓度升高的影响,除了作物生物量显著增加,根际淀积物(释放细胞、分泌物、粘液以及通过根系进入土壤的其他化合物)也大幅度增加^[1-3],改变地上和地下部分物质和能量的分配;植物通过间接的作用,使 20%~50%的光合同化碳转移到地下,使根际土壤的物理、化学及生物特性发生显著变化^[4-5],影响到生态系统中 CH₄ 气体的排放^[6-7]。CH₄ 是水蒸气和 CO₂ 之后第三大重要的温室气体,在 100 a 尺度内它的全球增温潜能(Global Warming Potential, GWP)是 CO₂ 的 25 倍^[8]。水稻是世界上最重要的粮食作物之一。由于水稻在特定的生长阶段需要淹水,稻田生态系统也成为大气温室气体 CH₄ 的重要来源^[9],因此有必要就大气 CO₂ 浓度升高对 CH₄ 排放的影响展开研究。

高 CO₂ 浓度条件下水稻生物量的增加^[10-11]将影响 CH₄ 排放,CH₄ 气体的产生与有机质的分解密切相关^[12]。由于土壤中碳的分解矿化存在差异,利用碳同位素技术和方法可以很好地解决生态系统碳平衡计算、土壤 CH₄ 排放、分解动态等方面的难题^[13-14]。本试验将利用在 C₄ 土壤上种植水稻,研究高 CO₂ 浓度对稻田 CH₄ 排放通量及不同来源的影响。

1 材料与方法

1.1 试验地区概况

2005 年 6 月到 11 月在建于江苏省江都市小纪镇(119°42' 0''E, 32°35' 5''N)的稻麦轮作 FACE 系统平台^[15]上开展研究工作。试验区土壤基本性质为:砂粒(2~0.02 mm)578 g·kg⁻¹,粉砂粒(0.02~0.002 mm)285 g·kg⁻¹,粘粒(<0.002 mm)137 g·kg⁻¹,0~15 cm 容重 1.16 g·cm⁻³。1995—2000 年平均降水量 918 mm,同期实测年平均蒸发量 1 194.3 mm,年平均气温 14~16℃,无霜期 220 d。6—9 月降水较多,平均汛期雨量占年平均雨量 60%。区内田面真高 2.7~4.0 m 之间。累年平均总热量(≥0℃积温)为 5 456.6℃(1959—1988)。

1.2 研究方案

1.2.1 大田试验设置

FACE 田间试验采用裂区设计。水稻供试品种为武香粳 14 号、汕优 63 和两优培九。大田早育秧,5 月 20 日播种,6 月 14 日(武香粳 14 号)和 15 日(汕优 63 和两优培九)人工移栽,行距为 25 cm,株距为 16.7 cm,24 穴·m⁻²,3 苗·穴⁻¹(武香粳 14 号)或 1 苗·穴⁻¹(汕优 63 和两优培九)。大气 CO₂ 浓度设对照(A:370 μL·L⁻¹)3 个和 FACE 处理(F:570 μL·L⁻¹)3 个,每个 CO₂ 浓度下施 N 量设低氮(125 kg·hm⁻², LN)和常规氮(250 kg·hm⁻², NN)2 个水平,施 P、K 量均设 70 kg·hm⁻²(NP)。为了防止串肥,不同 N 处理间用 30 cm 高的 PVC 板隔开(PVC 板入土 10 cm 左右)。施氮时间和施氮量:6 月 13 日施基肥,6 月 19 日施分蘖肥,7 月 30 日施穗肥,其中基肥占总计施 N 量的 60%,穗肥占总计施 N 量的 40%。P、K 肥均作为基肥施用。水分管理为 6 月 15 日—7 月 10 日保持浅水层(约 5 cm),7 月 11 日—8 月 4 日进行多次轻搁田,从 8 月 5 日至收割前 7 d 进行间隙灌溉。适时进行病虫草害防治。

试验地土壤长期种植水稻和小麦,是 C₃ 土壤,在水稻季灌水之前,每个 N 水平下放置 5 个 PVC 框(长×宽×高=20 cm×16 cm×20 cm),分别记作 CK、S1、S2、S3、S4,每个里面放有 C₄ 土壤(来自东北中层黑土,长期种植玉米,4 mm)6 kg,全碳和全氮分别是 1.06%和 0.11%。在种有水稻的处理中(图 1),框子上方设计一个盖子(长×宽×高=21.2 cm×16.2 cm×7.4 cm),盖子中间有洞,用来放置一个空心圆管,两端开口,一端插入土壤中,一端暴露在盖子上方,水稻就种在圆管中,在盖子和框子之间有密封水槽,在抽气的时候用来封闭盖子和框子之间的空间;盖子上另有水槽,用于密封盖子上部,测定水稻地上部分排放的 CH₄。测定时,用另一个较高的方框(前 3 次采样用长×宽×高=15.5 cm×13.6 cm×15 cm;以后采样用长×宽×高=15.0 cm×13.6

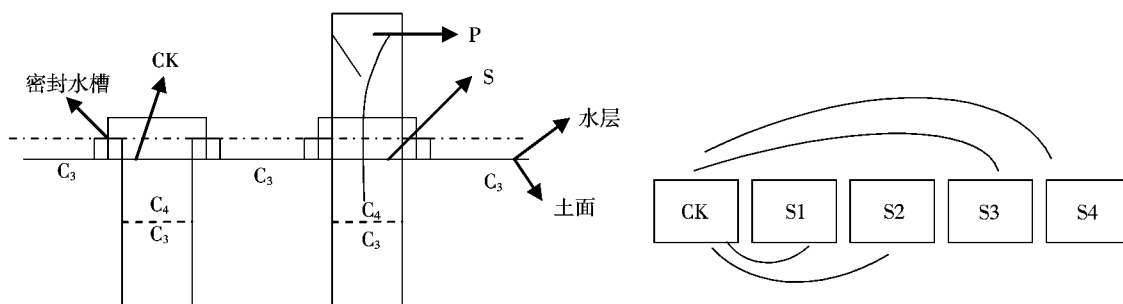


图 1 田间试验安排简图

Figure 1 A crude drawing for experiment layout in field

cm×100 cm)套在植株上与盖子上的密封水槽衔接。水稻生长的圆管和密封盖空隙用牙膏封堵,隔离土壤和植株间气体流动。

在拔节期之前,在CK和S1处理采集气体,间隔5~7 d采1次样品,每次20 mL,分别来自盖子下面种有水稻的土壤排放(S)、盖子上面植株排放(P)和不种水稻的土壤排放(CK)(图1),测定CH₄;采气时在盖子盖上后马上抽气记作第1针(G1),15 min或20 min后采气,记作第2针(G2),2次间隔时间可根据当时的土壤温度调整,采气后拿掉方框,移动盖子使下面土壤与大气相通。到拔节期改用100 mL气袋采气,其中一部分用于常规测定,一部分用来测¹³C同位素值,而后从田间取出此框(S1),收集框内土壤样品;不种水稻(作为对照,CK),一直在田间保留到水稻收割。拔节期到抽穗期在CK和S2处理上采集气体,到抽穗期S2拿出田间;抽穗到成熟期对CK和S3处理采气,到成熟期S3拿出田间;成熟到收割期对CK和S4采气。水稻收割的时候S4和CK框子中的土壤用来测土壤全碳和土壤的δ¹³C值。

1.2.2 计算方法

不同采样时期CH₄的排放速率计算公式为:

$$F = \Delta C \times M / 22.4 \times V / \Delta t / A$$

式中: F 为排放通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; ΔC 为气体浓度差, $\text{mL} \cdot \text{m}^{-3}$; M 为气体分子量; V 为采气箱有效空间体积, m^3 ; Δt 采气间隔时间,h; A 为采气箱覆盖的土壤面积, m^2 。

整个水稻季CH₄累积排放总量计算公式为:

$$M = \sum (F_{t_{i+1}} + F_{t_i}) / 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 24$$

式中: M 为累积排放总量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$; I 为采样次数; t 为采样时间,即水稻移栽后天数,d。

在拔节期、抽穗期、成熟期和收割的时候分别采气(G1和G2)测定气体CH₄的δ¹³C值,土壤排放CH₄的δ¹³C值可用以下公式计算:

$$\text{土壤排放的 } \delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4} = \frac{\delta_2 \times C_2 - \delta_1 \times C_1}{C_2 - C_1}$$

其中 δ_1, C_1 分别是第一针CH₄气体(G1)的δ¹³C值和浓度; δ_2, C_2 分别是第二针CH₄气体(G2)的δ¹³C值和浓度。

1.2.3 统计分析

采用SPSS15.0软件中的Multivariate进行CO₂和氮水平对CH₄累积排放总量影响的主因素和交互作用显著性差异分析,对不同处理下高CO₂浓度的影

响采用one-way ANOVA(LSD方法)对数据进行显著性差异分析。

2 结果与分析

2.1 高CO₂浓度对水稻田CH₄排放速率的影响

图2显示植株和土壤的CH₄排放速率在高CO₂浓度处理大于对照,LNP、LNS、NNP和NNS有80%的数据变化范围分别为22.6%~131.8%、32.7%~1260.7%、18.1%~187.2%和22.9%~726.7%。CH₄排放速率变化受田间水分条件影响较大,在整个生长期,高CO₂浓度处理下CH₄排放速率波动较大;在不同氮水平下植株部分后期变化较大,而土壤部分CH₄排放速率在NN水平下明显高于LN水平。

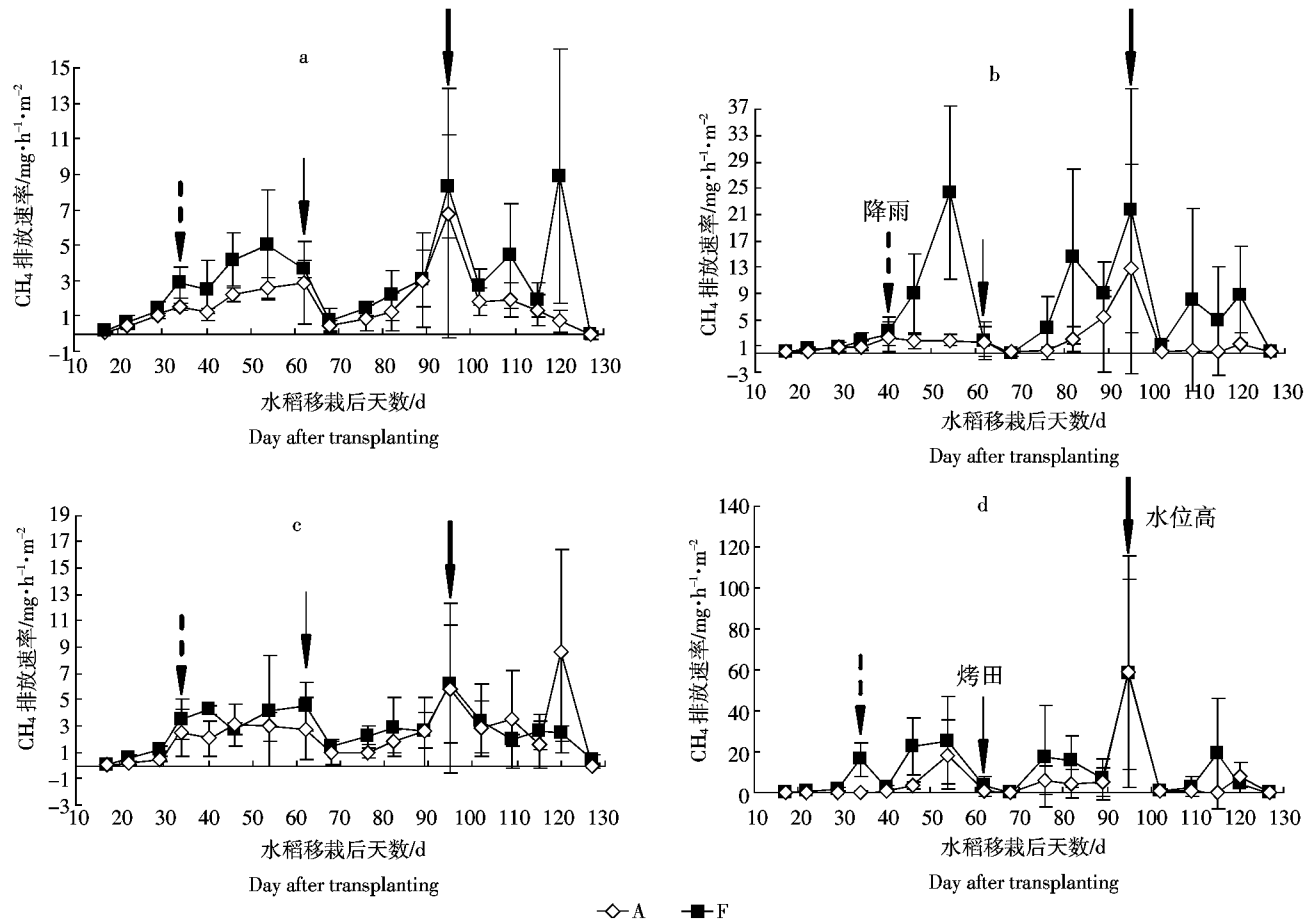
2.2 高CO₂浓度对水稻田CH₄累积排放总量的影响

图3显示地上部分CH₄累积排放总量在高CO₂浓度显著高于对照CO₂浓度处理,增加幅度随生长期而降低(图4)。LN水平增加52%~120%;NN水平40 d以前增加62%~169%,高于LN水平,40~102 d增加31%~62%,低于LN水平,109~127 d增加0.27%~4.5%,远低于LN水平的69%~79%。移栽后30 d左右,CH₄排放总量变化幅度在LN水平下突然降低,NN水平突然升高,可能与降雨有关。

土壤部分(种有水稻),CH₄累积排放总量在高CO₂浓度高于对照CO₂浓度处理(图3),升高幅度远大于地上部分的响应(图4)。LN水平增加57%~449%;NN水平下增加3.2%~1672%,在54 d之前增加幅度是曲线型,先升高后降低,在第34 d达到最大,54 d之后NN水平增加幅度为122%~252%,低于LN水平,且随着水稻的生长增加幅度在降低。

参考空白(行间裸土)数据显示(图3),在移栽后54 d以前,CH₄累积排放总量在高CO₂浓度高于对照CO₂浓度处理(图4),LN水平下增加41%~154%,NN水平下增加38%~335%;但是之后CH₄排放总量在高CO₂浓度低于对照CO₂浓度处理,LN水平下降低3%~55%,到生长末期又升高到130%,NN水平下降低13%~71%。

图4显示高CO₂浓度对CH₄累积排放总量的影响有阶段性变化,比如变化幅度在54 d以前NN高于LN且差异明显,54~102 d之间LN高于NN且比较稳定,102 d后虽然也是LN高于NN,但变化幅度明显拉开,而第54 d和第102 d是水稻拔节期和成熟期,表明高CO₂浓度通过影响水稻生长与CH₄累积排放总量有一定关系。



A: 对照 CO₂ 浓度, F: 高 CO₂ 浓度处理, LN: 低氮, NN: 常规氮, P: 植物部分, S: 土壤部分;
a: LNP, b: LNS, c: NNP, d: NNS, 虚线箭头代表降雨, 细实线箭头代表烤田, 粗实线箭头代表水位高

图 2 水稻不同生长阶段 CH₄ 排放速率变化

Figure 2 Change of methane emission rates at rice different growth stages

表 1 结果显示, 高 CO₂ 浓度对土壤对照(CK)没有显著影响, 对植株也只在拔节期之前观察到有所影响, 而对种水稻土壤影响显著, 表明种植水稻是引起 CH₄ 排放在高 CO₂ 浓度比对照 CO₂ 浓度高的主要原因。

2.3 高 CO₂ 浓度对水稻不同生长阶段土壤排放 CH₄ 来源的影响

表 2 结果显示, 水稻移栽后 2 d, 高 CO₂ 浓度条件

下土壤排放 CH₄δ¹³C 值在 LN 和 NN 水平下分别低于对照 CO₂ 浓度条件 27.8% 和 85.5%。然而到移栽后 102 d, 高 CO₂ 浓度条件下对照(CK)土壤排放 CH₄δ¹³C 值在 LN 和 NN 水平下仅升高 9.0% 和 8.3%, 而在对照 CO₂ 浓度条件下则降低 17.2% 和 112.5% ($P=0.047$); 在 LN 和 NN 水平下高 CO₂ 浓度条件下种水稻土壤排放 CH₄δ¹³C 值降低 8.8% 和 8.1%, 但是在对照 CO₂ 浓

表 1 水稻不同生长阶段高 CO₂ 浓度对 CH₄ 累积排放总量影响的差异显著性统计结果

Table 1 The significantly statistic *P* value for change of methane accumulation emission flux under elevated CO₂ compared to ambient CO₂ at rice different growth stagesa

处理	培养时间/d																	
	17	22	29	34	40	46	54	62	68	76	82	89	95	102	109	115	120	127
LNP	*	**	*	*		**												
LNS		*				*	***	***	***	***	***	***	**	*	**	**	**	*
NNP		*	**	*		*												
NNS			***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	**	*	*	*	*

注: * $P<0.05$, ** $P\leq 0.01$, *** $P\leq 0.001$ 。

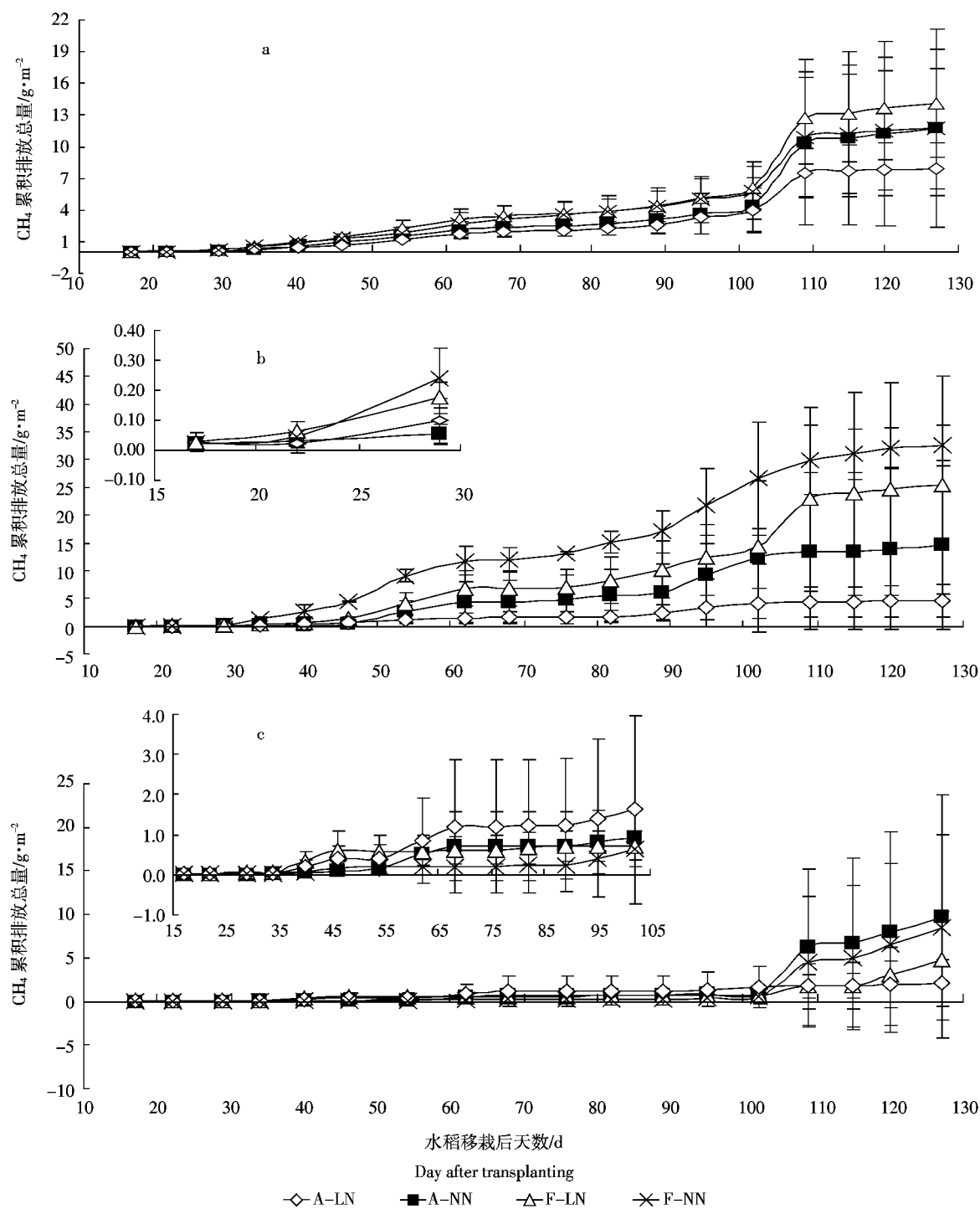
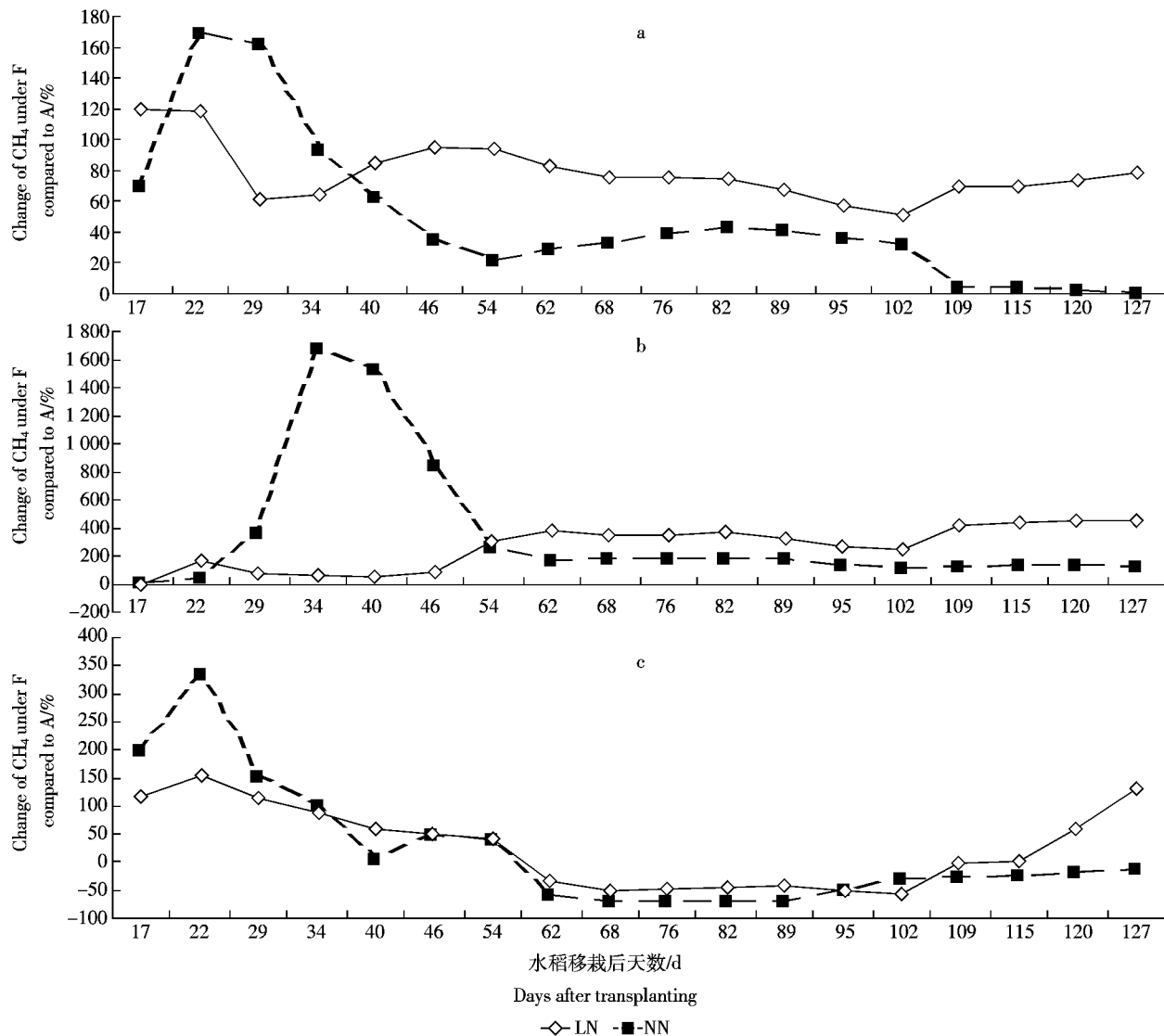
图3 水稻不同生长阶段 CH_4 累积排放总量的变化

Figure 3 Change of methane accumulation emission flux at rice different growth stages

度条件下则降低 40.3%和 105.9% ($P=0.023$)。表明高 CO_2 浓度下有更多 C_4 来源的碳释放, 对照 CO_2 浓度条件下有更多 C_3 来源的碳释放。

在不同水稻生长期, 种水稻的土壤排放 $\text{CH}_4\delta^{13}\text{C}$

值比对照(CK)降低的幅度总和在高 CO_2 浓度条件LN和NN水平下分别为 114.8%和 72.7%, 对照 CO_2 浓度条件下分别为 41.9%和 72.8%。表明在种有植物的情况下更多当季的碳分解释放, LN 水平下高 CO_2 浓度



a:地上部分(plant),b:土壤部分(soil),c:空白(control)

图 4 与对照 CO₂(A)浓度条件比较,高 CO₂(F)浓度条件下 CH₄ 累计排放总量变化

Figure 4 Difference of methane emission between elevated CO₂ and ambient CO₂

表 2 不同水稻生长时期测得土壤排放 CH₄ δ¹³C 值(‰)

Table 2 Value of CH₄ δ¹³C from soil at different rice growth stages(‰)

CO ₂	N	Treats	水稻移栽后天数/d			
			2	46	76	102
F	LN	CK	-44.1(8.9)	-43.1(3.4)	-33.4(7.7)	-40.2(5.0)
		S		-61.1(8.2)	-51.3(15.3)	-48.0(14.2)
	NN	CK	-45.4(16.8)	-46.7(13.1)	-35.4(0.7)	-41.7(1.7)
		S		-47.0(4.9)	-54.6(7.4)	-49.1(10.1)
A	LN	CK	-34.5(9.6)	-39.4(2.2)	-51.8(17.5)	-40.5(4.6)
		S		-46.0(18.9)	-54.8(13.4)	-48.4(7.7)
	NN	CK	-24.5(16.7)	-39.7(7.2)	-44.2(7.2)	-52.0(28.4)
		S		-52.8(7.6)	-63.2(24.0)	-50.4(8.3)

注:CK,S 分别表示裸土(空白处理)和种有水稻处理土壤部分,数据表示为平均值(标准偏差)。

促进来源当季碳的 CH_4 排放, NN 水平下没有发现 CO_2 浓度的影响。

3 讨论

由于受大气 CO_2 浓度升高的影响, 作物生物量显著增加, 改变地上和地下部分物质和能量的分配, 影响到生态系统中土壤呼吸和植物呼吸的响应^[16]。 CO_2 和 CH_4 的排放都受底物碳的影响, 已有的研究显示, 随着水稻的生长, 地上部分 CO_2 的排放速率在减少, 在不同 N 水平下高 CO_2 浓度条件下水稻地上部分 CO_2 累积排放量减少^[17]。所不同的是本研究结果表明高 CO_2 浓度处理促进水稻田 CH_4 的排放, 且与已有的相同试验地的报道相似^[14]。有的报道显示在不种植物的情况下, 高 CO_2 浓度降低 CH_4 排放主要是土壤表面水和表层土壤对它的保存增加了^[18], 由此也可以推断高 CO_2 浓度条件下水稻植株对 CH_4 排放有促进的作用。土壤中生物活动需要的能量主要是通过根系和地上凋落物提供碳源, 大气 CO_2 浓度升高常常导致同化产物以更多根际淀积物(释放细胞、分泌物、粘液以及通过根系进入土壤的其他化合物)的形式出现^[1-3], 在大气 CO_2 浓度升高条件下, 植物通过间接的作用, 将 20%~50% 的光合同化碳转移到地下, 使根际土壤的物理、化学及生物特性发生显著变化^[4-5], 而且正是根系生物量的增加导致了分泌物的增加^[19-20]。这些都将有利于厌氧条件下 CH_4 的产生, 以及土壤与植物 CH_4 的排放^[6, 21-22]。已有研究表明水稻季大田 CO_2 排放受到根系分泌物等的影响较大^[14, 23], 在种有水稻的土壤部分, CO_2 累积排放量在不同 N 水平下高 CO_2 浓度条件下低于对照条件。 CH_4 累积排放总量在高 CO_2 浓度条件较高, 而且随着水稻的生长高出比例越来越大, 表明水稻季通过根系进入土壤的碳成分更多的是在还原条件下以 CH_4 的形式释放, 因此 CO_2 排放减少。在高氮施用水平下, 高 CO_2 浓度将增加 CH_4 的排放^[14, 24], 但是这种作用并不是伴随整个生长期, 本文结果显示高氮(NN)主要促进前期 CH_4 的排放。

对土壤排放 CH_4 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化的研究结果表明, 土壤碳的分解, 包括土壤新老有机质的分解受水稻生长阶段和状态的影响, 在种有水稻处理下高 CO_2 浓度主要促进分蘖期之前新有机质的分解, 且 CH_4 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化不大, 可能与较多的不稳定碳输入有关; 同样在对照 CO_2 浓度条件下随着水稻的生长更多碳的输入使该条件下碳的分解以新输入的分解为主, 后期微生物的激活没有对老有机质的分解产生作用。这与 CO_2 的

排放有所不同^[17]。

大气 CO_2 浓度升高以后对土壤碳的影响主要是间接的进行, 由于土壤碳汇很大, 根系分泌的有机碳不会对土壤碳的长期积累有很大贡献^[25]。但是它可以通过微生物生物量直接和间接地影响土壤碳的变化。大气 CO_2 浓度升高条件下, 由于进入土壤的有机碳增加, 将对土壤碳释放和积累产生影响^[26], 结果很可能是通过促进 CH_4 的排放增加温室效应, 而不是通过保持 CO_2 来降低温室效应。

4 结论

(1) 通过对水稻行间(CK), 水稻植株和种水稻土壤在不同 CO_2 浓度处理下, 不同氮水平下 CH_4 排放规律的研究, 并结合 $\delta^{13}\text{C}$ 技术初步分析了土壤 CH_4 的排放来源。在高 CO_2 浓度处理下植株和土壤的 CH_4 排放速率高于对照 18% 以上, 土壤增加幅度大于植物, 田间水分变化对 CH_4 排放速率可能影响较大。

(2) 与对照比较, 高 CO_2 浓度条件下植物和土壤部分的 CH_4 累积排放总量增加, 且变化幅度随生长期而降低, 前期(54 d) NN 高于 LN, 后期 LN 高于 NN; 但是行间裸土 CH_4 累积排放总量只在前期(54 d) 增加, 变化幅度 NN 高于 LN。

(3) 土壤排放 CH_4 $\delta^{13}\text{C}$ 值从移栽到第 102 d, 高 CO_2 浓度处理下土壤对照(CK)略有升高, 种水稻则略有降低; 但是在对照 CO_2 浓度条件下均降低, 表明高 CO_2 浓度促进 C_4 土壤有机碳释放。水稻不同生长期, 与土壤对照比较, 种水稻土壤排放 CH_4 $\delta^{13}\text{C}$ 值在高 CO_2 浓度 LN 水平下降低的幅度总和为 114.8%, 在对照 CO_2 浓度条件下为 41.9%, 表明种水稻有利于当季的碳分解释放, LN 水平下高 CO_2 浓度促进当季碳的 CH_4 排放更为明显。

参考文献:

- [1] Rouhier H, Billes G, El Kohen A, et al. Effect of elevated CO_2 on carbon and nitrogen distribution within a tree-soil system: ^{14}C studies on sweet chestnut trees (*Castanea sativa* Mill.) [J]. *Plant and Soil*, 1994, 162: 281-292.
- [2] Paterson E, Hall J M, Rattray E A S, et al. Effect of elevated CO_2 on rhizosphere carbon flow and soil microbial processes [J]. *Global Change Biology*, 1997, 3: 363-377.
- [3] Zak D R, Pregitaer K S, Curtis P S, et al. Elevated atmospheric CO_2 and feedback between carbon and nitrogen cycles [J]. *Plant and Soil*, 1993, 151: 105-117.
- [4] Chander K, Brookes P C. Plant inputs of carbon to metal-contaminated soil and effects on the soil microbial biomass [J]. *Soil Biology Biochemistry*,

- 1991, 23:1169–1177.
- [5] Van Ginkel J H, Gorissin A, Van veen J A. Carbon and nitrogen allocation in lolium perenne in response to elevated atmospheric CO₂ with emphasis on soil carbon dynamics[J]. *Plant and Soil*, 1997, 188:299–308.
- [6] 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, 4:657–665.
- [7] Cheng W G, Sakai H, Hartley A, et al. Increased night temperature reduces the stimulatory effect of elevated carbon dioxide concentration on methane emission from rice paddy soil[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(3):644–656.
- [8] Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, et al. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing//Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change edited by: Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- [9] 蔡祖聪, 徐 华, 马 静. 稻田生态系统 CH₄ 和 N₂O 排放[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- CAI Zu-cong, XU Hua, MA Jing. CH₄ and N₂O emissions from paddy ecosystem[M]. Hefei: China Science and Technology University Press, 2009.
- [10] 谢祖彬, 朱建国, 张雅丽, 等. 水稻生长及其体内 C、N、P 组成对开放式空气 CO₂ 浓度增高和 N、P 施肥的响应[J]. 应用生态学报, 2002, 13(10):1223–1230.
- XIE Zu-bin, ZHU Jian-guo, ZHANG Ya-li, et al. Responses of rice (*Oryza sativa*) growth and its C, N and P composition to FACE (Free-air Carbon Dioxide Enrichment) and N, P fertilization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(10):1223–1230.
- [11] 马红亮, 朱建国, 谢祖彬, 等. 开放式空气 CO₂ 浓度升高对水稻生物量和 C、N 吸收分配的影响[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(3):38–41.
- MA Hong-liang, ZHU Jian-guo, XIE Zu-bin, et al. Effects of CO₂ enrichment on the allocation of biomass and C, N uptake in rice organs[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(3):38–41.
- [12] Kimura M, Murase J, Lu Y. Carbon cycling in rice field ecosystems in the context of input, decomposition and translocation of organic materials and the fates of their end products (CO₂ and CH₄) [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36:1399–1416.
- [13] Keppler F, Hamilton J T G, Braß M, et al. Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions[J]. *Nature*, 2006, 439:187–191.
- [14] 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, Vol. 18, GB3009, doi:10. 1029/2004GB002233.
- [15] 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[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.
- [16] Norby R J, Wullschlegel S D, Gunderson C A, et al. Tree responses to rising CO₂ in field experiments: Implications for the future forest [J]. *Plant Cell and Environment*, 1999, 22:683–714.
- [17] 马红亮, 朱建国, 谢祖彬, 等. 高 CO₂ 浓度对稻田 CO₂ 排放影响的初步分析[J]. 中国农学通报, 2007, 23(1):176–184.
- MA Hong-liang, ZHU Jian-guo, XIE Zu-bin, et al. Primary analysis in the effects of elevated [CO₂] on emission of CO₂ from rice paddy field[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(1):176–184.
- [18] Cheng W, Chander K, Inubushi K. Effects of elevated CO₂ and temperature on methane production and emission from submerged soil microcosm[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58:339–347.
- [19] Norby R J. Nodulation and nitrogenase activity in nitrogen-fixing woody plants stimulated by CO₂ enrichment of the atmosphere[J]. *Physiologia Plantarum*, 1987, 71:77–82.
- [20] 马红亮, 朱建国, 谢祖彬, 等. 开放式空气 CO₂ 浓度升高对水稻土壤可溶性 C、N 和 P 的影响[J]. 土壤, 2004, 36(4):392–397.
- MA Hong-liang, ZHU Jian-guo, XIE Zu-bin, et al. Effect of FACE (Free Air Carbon-dioxide Enrichment) on available C, N and P in soil during rice growing[J]. *Soil*, 2004, 36(4):392–397.
- [21] Allen L H Jr, Albrecht S L, Colón-Guasp W, et al. Methane emissions of rice increased by elevated carbon dioxide and temperature[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32:1978–1991.
- [22] Cheng W G, Yagi K, Sakai H, et al. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations on CH₄ and N₂O emission from rice soil: An experiment in controlled-environment chambers[J]. *Biogeochemistry*, 2006, 77(3):351–373.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Uselman S M, Qualls R G, Thomas R B. Effects of increased atmospheric CO₂, temperature and soil N availability on root exudation of dissolved organic carbon by a N-fixing tree (*Robinia Pseudoacacia* L.) [J]. *Plant and Soil*, 2000, 222:191–202.
- [26] Cheng W G, Inubushi K, Hoque Md M, et al. Effect of elevated [CO₂] on soil bubble and CH₄ emission from a rice paddy: A test by ¹³C pulse-labeling under free-air CO₂ enrichment [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2008, 25:396–403.