

延边地区稻田 CO₂ 排放对种植年限和施肥类型的响应

傅民杰*,吴明根,刘春海,吴凤日

(延边大学农学院, 延吉 133000)

摘要: 本文研究了延边地区不同开垦年限及施肥类型下稻田生长季 CO₂ 的排放特征, 研究表明, 不同开垦年限稻田 CO₂ 排放能力差异明显, 开垦年限较长的稻田(80 - 120a)比年限较短(60a)的稻田土壤促进了 CO₂ 排放。稻田 CO₂ 排放季节特征受肥料类型的影响较大, 单施有机肥促进了水稻分蘖期及成熟期稻田 CO₂ 排放速率, 而单施化肥在水稻分蘖期、孕穗末期及成熟期均表现出较强的 CO₂ 排放能力, 化肥与有机肥配施措施促进了分蘖—拔节期 CO₂ 排放速率。全生长季单施有机肥、有机肥配施化肥和单施化肥处理的 CO₂ 月排放量均值分别为 229.60 g m⁻²、209.49 g m⁻² 和 137.14 g m⁻², 施用有机肥可以明显促进稻田 CO₂ 的排放。

关键词: CO₂ 排放; 稻田; 种植年限; 施肥类型

中图分类号: S154.1

文献标识码: A

文章编号:

The responses of CO₂ emission to cultivation periods and fertilizer types in Yanbian paddy

FU Minjie, WU Minggen, LIU Chunhai, WU Fengri

(College of Agronomy, Yanbian University, Yanji 133000, China)

Abstract: The CO₂ emissions under different cultivation periods and fertilizer types in paddy in Yanbian of China were investigated in this paper. The results show that the emissions of CO₂ are different in different reclamation times' paddy. The CO₂ emissions in 80a or 120a paddy (longer reclamation times) was higher than that in 60a paddy (shorter reclamation times). The season character of CO₂ emissions were effected by the fertilizer types applied into the paddy. The organic fertilizer can improve the rate of CO₂ emission at the tillering stage and mature stage of rice in paddy. The chemical fertilizer can improve the rate of CO₂ emission at the tillering stage, ending of booting stage and mature stage of rice in paddy, and the application of organic fertilizer with chemical fertilizer can improve the rate of CO₂ emission at tillering - jointing stage of rice in paddy. The mean emissions of CO₂ per month were 229.60 g m⁻² for organic fertilizer, 209.49 g m⁻² for organic with chemical fertilizer and 137.14 g m⁻² for chemical fertilizer in paddy, respectively. The organic fertilizer can promote obviously emission of CO₂ in Yanbian paddy.

农业生产是 CO₂ 等温室气体重要的排放源^[1]。中国拥有 1.21 亿 hm² 的耕地, 其中水稻种植面积占作物总种植面积的 30% 左右。稻田系统排放 CO₂ 量占农业温室气体排放总量的 9%^[2], 占据重要的影响地位。稻田土壤 CO₂ 的排放受诸多因素的影响, 包括肥料、作物类型、土壤温度等^[3-5]。其中, 施肥是 CO₂ 排放的重要农业措施。研究发现, 长期施用有机肥在增加土壤有机质积累量同时, 提高了土壤 CO₂ 的排放量, 特别是有机肥与化肥的混合使用能显著增加土壤呼吸释放的 CO₂^[6,7]。Das^[8] 等人研究表明有机肥对比单施化肥增加了 CO₂ 的排放。但也有研究发现, 淹水稻田 CO₂ 的排放速率与肥料的施用无显著关系^[9]。谢义琴^[10] 等发现, 有机物质投入促进了稻田土壤 CO₂ 的排放, 但各处理稻田土壤 CO₂ 的总排放通量均无显著性差异。可见, 稻田 CO₂ 排放在不同立地条件和种植模式下, 存在明显的差异, 有必要对不同代表性区域稻田

*收稿日期: 2016-06-23

基金项目: 国家自然科学基金(31160103); 吉林省科技厅重点攻关资助项目(20140204045SF); 国家自然科学基金资助项目(31560202); 延边大学科技发展计划项目(延大科合字(2011)第 32 号)

作者简介: 傅民杰(1972-), 男, 博士, 副教授, 现主要从事农田土壤物质营养与循环等研究工作。E-mail: fuminjie@163.com.

生态系统 CO₂ 排放做深入的调查。延边地区是中国北方最早的稻区，一年一熟制及较长的冻融过程使其土壤呼吸过程和水稻生产过程区别南方稻区。研究其不同开垦年限稻田在不同施肥条件下的 CO₂ 排放特征对深入了解稻田生态系统对温室效应的影响有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本次试验分别选取开垦约 60a、80a 和 120a 的三种类型延边稻田。各类型稻田区均位于吉林省延边朝鲜族自治州境内，分别位于龙井市开山屯镇(120a 稻区)、龙井市农学院(约 80a 稻区)和图们市凉水镇(约 60a 稻区)。所有试验地基本信息，见表 1。

表 1. 试验地基本信息

处理代号	LCOF	LOF	LCF	KCF	NCF
试验地点	图们凉水镇	图们凉水镇	图们凉水镇	龙井开山屯镇	龙井农学院
开垦年限(yrs)	60	60	60	120	80
施肥类型	化肥+有机肥	有机肥	化肥	化肥	化肥
施肥量(kg.hm ⁻²)	N: 80-90		N: 160-180	N: 160-180	N: 160-180
	P ₂ O ₅ : 50-60	有机肥:18000-20000	P ₂ O ₅ : 80-100	P ₂ O ₅ : 80-100	P ₂ O ₅ : 80-100
	K ₂ O: 60-70		K ₂ O: 110-130	K ₂ O: 110-130	K ₂ O: 110-130
	有机肥:6500-9000				
pH	6.39	6.64	6.83	6.54	6.66
有机质(g.kg ⁻¹)	37.18	23.91	28.94	36.20	36.14
碱解氮(mg.kg ⁻¹)	46.20	47.65	28.56	41.91	46.98
速效磷(mg.kg ⁻¹)	67.01	64.68	57.26	45.01	58.79
速效钾(mg.kg ⁻¹)	241.96	280.73	140.97	267.40	208.85
全磷(g.kg ⁻¹)	0.47	0.47	0.35	0.97	0.42
全钾(g.kg ⁻¹)	13.21	12.55	7.74	10.27	12.16
全氮(g.kg ⁻¹)	1.59	1.32	1.13	1.39	1.40

1.2 试验设计

稻田 CO₂ 排放与肥料种类相关试验设置于凉水镇稻区。试验设置 3 种施肥类型(处理)，分别为“化肥与有机肥配施”(记为 LCOF)、“单施有机肥”(LOF)和“单施化肥”(LCF)。具体施肥类型和施肥量等见表 1。稻

田 CO₂ 排放与肥料种类相关试验分别选择开垦 60a(凉水镇)、80a(农学院)和 120a 左右(开山屯镇)的三种稻田。以 60a 稻田单施化肥量为基准施肥量, 调查在相同化肥施用条件下, 不同开垦年限稻田生态系统 CO₂ 排放的差异性。其中, 开垦 60a 左右的稻田处理记为“LCF”, 开垦 80a 左右的稻田处理记为“NCF”, 开垦 120a 左右稻田处理记为“KCF”。具体信息见表 1。试验从 2013 年 6 月开始到 11 月结束。整个调查期每 15 d 采样 1 次, 每种处理设 3 次重复。CO₂ 采集与测定采用静态暗箱—GC 法。静态箱规格为长×宽×高=50×40×50cm³。箱体安装数显温度计、直流电风扇和采气阀。在稻田生长中后期, 静态暗箱高度增加 1 倍, 长、宽不变, 以确保采气箱不影响稻株正常生长。采样时间定为上午 9:00~11:30 之间, 每次采样每时, 每个暗箱在 30min 时间完成 4 次样品采集工作。每个气体样品 50ml, 注入气体采集袋密封待测。同时, 测定箱温度、水温和土壤温度(地下 5cm, T₅)。气体样品测定采用的气相色谱仪为岛津 2010 型 (SHIMADZU, Japan)。

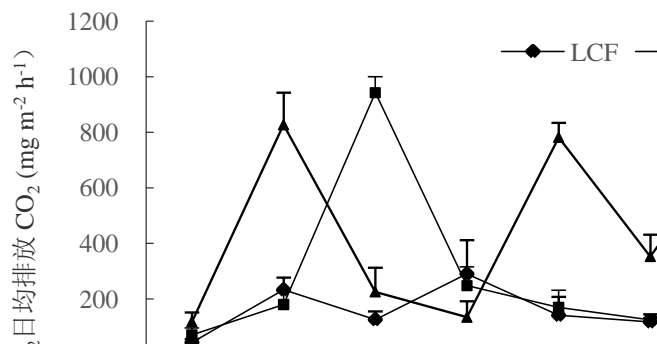
1.4 数据处理与绘图

数据应用 Microsoft office 2003 作图。施肥类型间、开垦年限间和全生长季间的 CO₂ 通量差异显著性检验分析采用 SPSS14.0 软件包, 多重比较采用 Duncan 法。

2 结果与分析

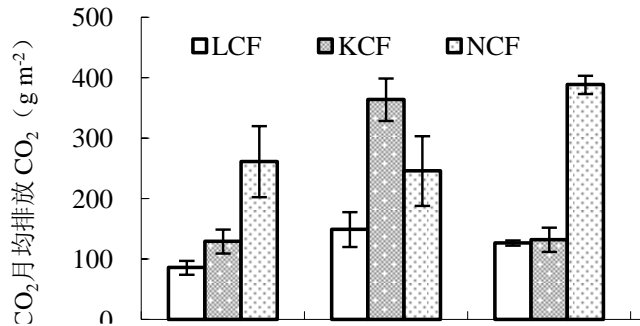
2.1 不同开垦年限稻田生长季 CO₂ 日均通量

由图 1 可知, 3 种开垦年限的稻田生长季 CO₂ 日均排放通量均表现为明显的净排放特征, 且每种开垦年限各测定时期 CO₂ 日均通量间差异显著($p < 0.05$), 表明各开垦年限稻田 CO₂ 排放存在明显的季节变化特征, 但 3 种开垦年限的 CO₂ 日均通量的季节变化格局表现各异, 且各开垦年限的 CO₂ 日均通量峰值出现的时期不同。其中, LCF 处理整个生长季 CO₂ 日均排放通量介于 42.94 ~ 290.05 mg m⁻² h⁻¹ 之间, 在水稻拔节期(7 月 25 日)达到整个生长季的最大值(290.05 ± 122.04 mg m⁻² h⁻¹)。KCF 处理全生长季 CO₂ 排放呈双峰曲线模式, 在拔节期(7 月 10 日)达到生长季首个 CO₂ 通量高峰 942.51 ± 57.30 mg m⁻² h⁻¹, 在水稻成熟期(9 月 27 日)达到第二个 CO₂ 通量高峰(345.84 ± 61.49 mg m⁻² h⁻¹), 两次排放高峰期 CO₂ 排放量间差异显著($p < 0.05$)。NCF 处理呈现多峰排放模式, 分别在拔节期(7 月 10 日)、抽穗开花期(8 月 13 日)、蜡熟期(9 月 13 日)出现较强的 CO₂ 排放量(图 1)。



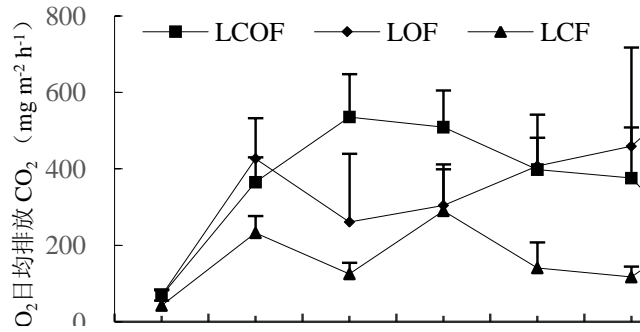
2.2 不同开垦年限稻田 CO₂ 月累积通量

从 CO₂ 的月累积排放通量来看, 3 种开垦年限处理的季节排放通量变化趋势各异。3 种处理 CO₂ 排放最小值与最大值出现在不同的月份(图 2)。KCF(开垦 120a)处理在整个生长季最大值出现于 7 月份($363.84 \pm 35.14 \text{ g m}^{-2}$), 最小值出现在 6 月份($129.04 \pm 19.68 \text{ g m}^{-2}$); NCF(开垦 80a)最大值和最小值分别出现于 8 月份($388.30 \pm 15.08 \text{ g m}^{-2}$)和 10 月份($76.15 \pm 19.93 \text{ g m}^{-2}$); LCF(开垦 60a)处理 6~9 月份呈现上升趋势, 并在 9 月份达到生长季的最大值($168.45 \pm 10.32 \text{ g m}^{-2}$), 其次为 10 月份, 最小值出现于 6 月份($85.68 \pm 11.51 \text{ g m}^{-2}$)。NCF、KCF 和 LCF 3 种开垦年限处理的生长季月平均 CO₂ 排放量分别为 263.60 g m^{-2} 、 209.15 g m^{-2} 和 137.14 g m^{-2} (图 2)。3 种开垦年限处理 CO₂ 生长季积累量依大小分别为 NCF(1.32 kg m^{-2})>KCF(1.05 kg m^{-2})>LCF(0.69 kg m^{-2}), NCF 与 KCF 较 LCF 增加了 91.3% 和 52.1%。表明开垦年限较长的稻田(80 - 120a)比年限较短(60a)的稻田土壤促进了 CO₂ 排放(图 2)。



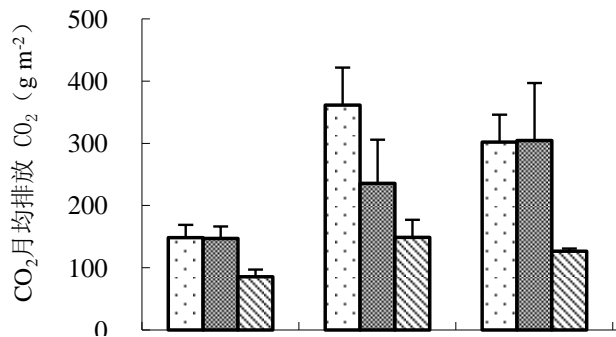
2.3 不同施肥类型稻田 CO₂ 日均通量

由图 3 可知, 3 种施肥处理(LCOF、LOF 和 LCF)的 CO₂ 日均通量的季节动态变化趋势不同。其中 LCOF(有机肥+化肥)处理生长季 CO₂ 日均通量呈现单峰曲线变化, 即分蘖期(6 月 10 日)至水稻拔节期(7 月 10 日)CO₂ 排放量呈上升趋势, 之后则逐渐降低(图 3)。LOF(单施有机肥)处理呈现双峰曲线变化, 即在分蘖期的 6 月 25 日达到整个生长季高峰, 在水稻成熟期(9 月 13 日)达到整个生长季的第二个排放高峰, 并且在该时期 LOF 处理显著高于其他 2 种施肥处理(图 3)。LCF 呈现多峰曲线变化动态模式, 分别在水稻分蘖期(6 月 25 日)和孕穗末期(7 月 25 日)和水稻成熟期(9 月 13 日)达到生长季排放高峰(图 3)。3 种施肥处理在水稻收割后期(10 月 17 日)的 CO₂ 日均排放通量相近, 三者间无显著差异(图 3)。



2.4 不同施肥类型稻田 CO₂月累积通量

从 CO₂ 的月累积通量来看，3 种施肥处理的季节排放通量变化格局表现不一(图 4)。LCOF(有机肥+化肥)处理与 LOF(单施有机肥)处理均呈现单峰曲线变化，LCOF 处理 CO₂ 的月排放通量在 7 月份(拔节-孕穗期)达到整个生长季的最大积累量($361.45 \pm 105.22 \text{ g m}^{-2}$)，抽穗-成熟期间逐渐下降；LOF 处理 CO₂ 的月均排放通量 6~9 份呈现上升趋势，在 9 月份达到整个生长季的最大积累量($346.49 \pm 65.84 \text{ g m}^{-2}$)，LOF 处理整个生长季 CO₂ 的月均排放通量最大值出现时间比 LCOF 处理晚 2 个月；而 LCF 处理呈现双峰曲线模式，分别在 7 月份和 9 月份达到生长季的峰值。3 种处理 10 月份的 CO₂ 月累积排放量相近(图 4)。全生长季 LOF、LCOF 和 LCF 3 种施肥处理的 CO₂ 月排放量均值分别为 $229.60 \text{ g m}^{-2} > 209.49 \text{ g m}^{-2} > 137.14 \text{ g m}^{-2}$ ，LCOF 与 LOF 处理的 CO₂ 月均排放量相对 LCF 施肥处理分别增加了 52.76% 和 67.42%，说明施用有机肥可以明显促进 CO₂ 的排放(图 4)。



3 讨论

一般认为在水稻移栽初期，由于植物呼吸较弱，稻田 CO₂ 的排放量不高；随着水稻的生长，当水稻进入抽穗-灌浆期，水稻生长处于旺盛期，稻田生态系统呼吸作用加强，同时部分稻田处于烤田期，此时气温较高，导致稻田在此时出现 CO₂ 较高的排放量。大多研究者对水稻生长季土壤 CO₂ 的排放均得出相同的规律^[11-13]。本研究的 3 种不同施肥管理在 7-9 月份均出现较高的排放量，研究结果与上述的结论基本一致。施肥是稻田生态系统中 CO₂ 的排放的一个重要的影响因子。赵峰^[14]等研究发现，施肥管理能显著增加稻田生态系统 CO₂ 的排放，但不同类型的肥料处理稻田生长季 CO₂ 排放差异不显著。然而本次研究中，全生长季不同施肥类型处理间 CO₂ 排放间存在明显的差异，有机肥与化肥配施与单施有机肥处理的 CO₂ 月均排放量相对于单施化肥处理分别增加了 52.76% 和 67.42%，单施有机肥明显增加了稻田生态系统的 CO₂ 排放量。分析认为，单独施用有机肥可以提高土壤微生物活性和稻株生长活力，有机肥在增加了土壤碳源的同时，也

促进了土壤有效氮素的增加，合适的土壤碳氮比既保证了土壤微生物活性，也促进了水稻植株的旺盛生长，由此增强了土壤和植株群体呼吸作用，促进了稻田CO₂的排放。需指出的是，本试验所用的暗箱采样测定方法，因暗箱遮光，采样期间植株光合作用停止，所获得的CO₂通量代表的是采样期间的水稻群体和土壤呼吸的总强度，而非稻田生态系统CO₂净通量，这与侯玉兰等^[15]和宋涛^[16]等采用明箱或涡度相关技术测定的稻田生态系统CO₂净通量结论有明显的区别。此外，稻田CO₂排放高峰出现时期受稻田植株与土壤水分条件综合决定，本研究中的稻田在6~8月份期间始终处于淹水状态，自收获前期的9月10日前后开始自然断水。第一次CO₂排放高峰与水稻抽穗开花期对应，而第二次排放高峰与水稻成熟、稻田晒田期相对应，可见水稻植株群体生长与呼吸决定了第一次CO₂排放高峰，而土壤呼吸决定了第二次CO₂排放高峰的产生，这也是本研究结果与许多在稻田生长季存在烤田或间歇灌溉的相关研究结果不同的主要原因^[14,16]。李平^[17]等研究表明，黑土CO₂排放量随开垦年限的增加而降低，开垦30a和100a土壤的CO₂排放量与荒地土壤差异显著。本研究发现，开垦年限较长的稻田(80 - 120a)比年限较短(60a)的稻田土壤促进了CO₂排放，开垦年限80a和120a比开垦60a增加了91.3%和52.1%的CO₂排放量，这与上述结论有所不同。分析认为，长期单施化肥及淹水过程会对土壤微生物群体结构、土壤C/N产生明显影响，二者长期作用下，可能导致土壤中好氮、厌养型微生物类型成为主导，而开垦年限的增加，无疑会促进该微生物类群的富集，进而促进土壤CO₂的排放过程。

4 结论

(1)开垦年限对CO₂排放量具有明显影响，开垦年限较长的稻田(80 - 120a)比年限较短(60a)的稻田土壤促进了CO₂排放。

(2)施肥类型对CO₂日均通量影响不同，单施有机肥促进了水稻分蘖期及成熟期稻田CO₂排放速率，而单施化肥在水稻分蘖期、孕穗末期及成熟期均表现出较强的CO₂排放能力，化肥与有机肥配施措施促进了分蘖一拔节期CO₂排放速率。

(3)单施有机肥与有机肥化肥配施措施比单施化肥处理促进了稻田CO₂排放量，施用有机肥可以明显促进CO₂的排放。

参考文献

[1] IPCC. Climate Change 2007-Impacts, Adaptation and Vulnerability [M]. Cambridge: UK and New York: Cambridge University Press. 2007:750-752.

[2] 谭秋成. 中国农业温室气体排放:现状及挑战[J]. 中国人口 资源与环境, 2011, 21(10):69-75.

[3] 孙文娟, 黄耀, 陈书涛, 等. 作物生长和氮含量对土壤-作物系统 CO₂ 排放的影响[J]. 环境科学, 2004, 25(3):1-6.

[4] 李琳, 张海林, 陈阜, 等. 不同耕作措施下冬小麦生长季农田二氧化碳排放通量及其与土壤温度的关系[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12):2765-2770.

- [5]郭树芳, 齐玉春, 董云社,等. 滴灌对农田土壤 CO₂ 和 N₂O 产生与排放的影响研究进展[J]. 中国环境科学, 2014, 34(11):2757-2763.
- [6] Li C, Mosier A, Wassmann R, et al. Modeling greenhouse gas emissions from rice-based production systems: Sensitivity and upscaling[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2004, 18(1):523-538.
- [7] 李波. 不同有机无机肥配施对水稻生长及稻田温室气体排放的影响研究[D]. 湖南农业大学, 2013.
- [8] Das S, Adhya T K. Effect of combine application of organic manure and inorganic fertilizer on methane and nitrous oxide emissions from a tropical flooded soil planted to rice [J]. Geoderma, 2014, 213(1):185-192.
- [9] 武文明, 杨光明, 沙丽清. 西双版纳地区稻田 CO₂ 排放通量[J]. 生态学报, 2009, 29(9):4983-4992.
- [10] 谢义琴, 张建峰, 姜慧敏,等. 不同施肥措施对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015(3):578-584.
- [11] 李梦雅. 长期施肥下红壤温室气体排放特征及影响因素的研究[D]. 中国农业科学院, 2009.
- [12]沈仕洲, 王风, 薛长亮,等. 施用有机肥对农田温室气体排放影响研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2015(6):1-8.
- [13]朱小红, 马友华, 杨书运,等. 施肥对农田温室气体排放的影响研究[J]. 农业环境与发展, 2011, 28(5):42-46.
- [14] 赵峥, 岳玉波, 张翼, 等. 不同施肥条件对稻田温室气体排放特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11): 2273-2278.
- [15]侯玉兰, 王军, 陈振楼, 等. 崇明岛稻麦轮作系统稻田温室气体排放研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(9): 1862-1867.
- [16] 宋涛, 王跃思, 宋长春, 等. 三江平原稻田 CO₂ 通量及其环境响应特征[J]. 中国环境科学, 2006, 26(6): 657-661.
- [17]李平, 郎漫, 徐向华,等. 不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究[J]. 环境科学, 2014(11):4321-4328.

作者简介:

傅民杰, 男, 1972年生, 博士, 副教授, 吉林省柳河县人。就职于延边大学农学院农学系, 主要从事作物栽培学与农田土壤物质营养与循环等研究, 主要参加完成了中韩合作项目“中国北方地区旱直播栽培技术与品种筛选研究”、国家教委项目“ALS 与 ACCase 抑制剂相互作用机理研究”、中韩合作项目“韩国农作物品种在中国北方地区适应性验证”、吉林省世界银行贷款项目“吉林省稻田抗药性杂草灾情预警与安全防控技术集成示范”等 4 项水稻高产栽培与品种筛选等内容研究。目前主持国家自然科学基金“延边地区稻田土壤有机氮转化机理及氮碳耦合效应研究”和吉林省科技厅重点攻关项目“吉林省耕地土壤墒情和温度遥感监测系统的构建及其应用”等研究项目。先后在国内外核心期刊上发表论文 40 多篇。