

复合稻田生态系统温室气体交换及其综合增温潜势

展 茗, 曹凑贵*, 汪金平, 蔡明历, 袁伟玲

(华中农业大学作物生理生态与栽培研究中心, 武汉 430070)

摘要: 研究稻田 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等温室气体的综合增温潜势, 有助于科学评价复合稻田生态系统在减少温室气体排放和减缓全球变暖方面的作用, 为稻鸭、稻鱼复合种养模式的发展提供依据。2006 年采用静态箱法研究了养鸭稻田 (RD)、养鱼稻田 (RF) 和常规淹水稻田 (CK) 的 CH_4 、 N_2O 的排放量。水稻整个生育期间, RD、CK 和 RF 的 CH_4 排放量分别是 19.11 、 26.71 g/m^2 和 25.01 g/m^2 ; N_2O 排放量分别是 0.237 、 0.229 、 0.237 g/m^2 。采用干物质积累法测得, 水稻整个生长期内 RD 处理地上稻株对 CO_2 的净固定量为 2766.4 g/m^2 , RF 为 2759.59 g/m^2 , CK 为 2533.9 g/m^2 。采用土壤有机碳库的变化估算土壤 CO_2 净交换通量, 水稻整个生育期间, 三类稻田土壤亚系统均表现为对 CO_2 的净固定, 相当于固定 CO_2 量分别为 RD 675.55 g/m^2 、CK 575.43 g/m^2 、RF 562.62 g/m^2 。三类稻田温室气体的交换均表现为 CO_2 的净吸收、 CH_4 、 N_2O 的净排放, 综合增温潜势以 RD 为最低。稻田养鸭能显著减少甲烷排放, 降低增温潜势, 其减缓综合温室效应的潜力是常规淹水稻田的 1.6 倍左右。

关键词: 稻田; 复合生态系统; CH_4 ; CO_2 ; N_2O ; 综合增温潜势

文章编号: 1000-0933(2008)11-5461-08 中图分类号: S511, X511 文献标识码: A

Greenhouse gases exchange of integrated paddy field and their comprehensive global warming potentials

ZHAN Ming, CAO Cou-Gui*, WANG Jin-Ping, CAI Ming-Li, YUAN Wei-Ling

Crop Physiology and Production Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan Hubei 430070, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(11): 5461 ~ 5468.

Abstract: Research on comprehensive global warming potentials (GWPs) of CO_2 , CH_4 , N_2O helps evaluating reasonably contribution of integrated paddy ecosystem to mitigating greenhouse gases emission and provides some evidence to develop integrated rice-duck and rice-fish production. By adopting the closed chamber technique, emissions of CH_4 and N_2O were measured from paddy field of integrated rice-duck eco-system (RD), integrated rice-fish eco-system (RF) and conventional flooded paddy eco-system (CK). During the whole rice growing stages, emission of CH_4 & N_2O came up to 19.11 g/m^2 & 0.237 g/m^2 for rice-duck field; 26.71 g/m^2 & 0.229 g/m^2 for conventional paddy field and 25.01 g/m^2 & 0.237 g/m^2 for rice-fish field, respectively. By using dry matter accumulation analysis, net fixation of CO_2 by rice plant above ground was 2766.4 g/m^2 of rice-duck field, 2533.9 g/m^2 of conventional paddy field and 2759.59 g/m^2 of rice-fish field. By analyzing the change of soil carbon pool, during the whole rice growing stage, paddy soil of every three treatments sequestered equivalently CO_2 -C of 675.55 g/m^2 by rice-duck field, 575.43 g/m^2 by conventional paddy field and 562.62 g/m^2 by rice-fish field. The result of greenhouse exchange of the three types of the paddy fields were net fixation of CO_2 and emission of

基金项目: 国家重大科技专项资助项目 (2004BA520A02)

收稿日期: 2008-01-09; 修订日期: 2008-09-02

作者简介: 展茗 (1973 ~), 女, 河南周口人, 博士生, 主要从事农田生态研究. E-Mail: zhanming@mail.hzau.edu.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ccgui@mail.hzau.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Foundation of Key Science of China (No. 2004BA520A02)

Received date: 2008-01-09; **Accepted date:** 2008-09-02

Biography: ZHAN Ming, Ph. D. candidate, mainly engaged in agricultural ecology. E-Mail: zhanming@mail.hzau.edu.cn

CH₄, N₂O. Comprehensive global warming potentials of rice-duck treatment were the lowest among the three. Feeding ducks in paddy field was proved to reduce CH₄ emission significantly, thus may decrease global warming potential by 1.6 times contrasted to that of conventional paddy field.

Key Words: paddy field; integrated ecosystem; CH₄; CO₂; N₂O; comprehensive global warming potentials

CO₂、CH₄、N₂O 是重要的温室气体,农业生产对温室气体排放的总贡献为 20% 左右,其中占甲烷人为排放量的 45% ~ 50%,占 N₂O 人为排放量的 20% ~ 70%^[1]。水稻是世界主要的粮食作物之一,占粮食作物面积的 1/3,其生产过程中伴随着 CO₂、CH₄、N₂O 等温室气体的产生,稻田在全球温室气体的预算中具有重要作用^[2],尤其是甲烷排放的重要人工源之一,平均每年甲烷的排放量为 60 Tg,占甲烷总排放量的 17% 左右^[3]。稻田温室气体的交换在很大程度上受稻田管理措施和稻田环境的影响。土壤氧化还原电位的变化是影响稻田温室气体排放的直接条件,Kewei 研究认为当土壤氧化还原电位在 180 ~ -150 mV 之间时,其产生的温室气体引起的综合温室效应最小^[4]。稻田水分管理影响稻田温室气体的交换,间歇灌溉的稻田,排水期 CO₂ 的净固定量低于淹水期^[5],甲烷的排放量比长期淹水稻田减少 15%^[6],但 N₂O 的排放量则明显增加^[7]。稻田甲烷的排放还受施肥类型、施肥技术、水稻品种、轮作方式的影响^[8~11]。可见通过改善稻田管理措施可减少稻田温室气体的排放^[12]。

21 世纪以来,由于其良好的生态环境效应,及市场对绿色安全稻米的需求,稻田种养复合生态系统的应用范围不断扩大,模式也多种多样,在我国南方地区主要以稻田养鸭、稻田养鱼、稻田养虾为主^[13,14]。同时对稻田种养复合生态系统的机理及其效应也进行了较为广泛的研究。稻田种养后改变了稻田温室气体的交换模式,稻田养鸭后能明显减少甲烷的排放^[15,16];Frei 等研究认为稻田养鲤鱼和罗非鱼后导致稻田甲烷排放量的增加^[17]。而对于复合稻田生态系统 3 种温室气体的综合效应的研究报道却很少。而稻田 3 种温室气体的交换是相互影响的过程,因此不同稻田生态系统的环境效应评价应考虑 3 种温室气体的综合效应。本文旨在研究不同复合稻田生态系统 CO₂、CH₄、N₂O 的排放及其综合温室效应,为寻求具有良好经济和生态综合效益的稻田复合种养模式的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于 2006 年在华中农业大学试验农场进行。土壤为第四纪黄土沉积物发育的水稻土,耕层土壤厚 20cm,下为 10cm 厚的犁底层。2006 年水稻移栽前测定的土壤基本肥力性质为全 N 1.09g·kg⁻¹,全 P 1.17 g/kg,有机质 16.76g/kg,pH 值为 6.8。前茬为油菜。油菜收获后,机械粉碎翻压还田。

1.2 试验材料

中稻品种为两优培九 (*Oryza sativa* L.),鸭为本地麻鸭 (*Tadorna*),鱼为长江流域常见的鲤鱼 (Cyprinidae)。

1.3 试验设计

试验设 3 个处理:(1)养鸭(RD)(每个小区 6 只);(2)养鱼(RF)(每小区放入鱼苗 200 尾);(3)不放鸭鱼(CK)。各小区随机区组设计,3 次重复。小区面积为 140m²。

1.4 田间管理

养鸭处理田间开挖围沟深 30cm、宽 40cm,以便鸭子嬉水。小区之间用泥巴砌成田埂,覆上地膜,防止水肥串流。以 4 指规格尼纶丝网沿田埂围隔,围网高度以 0.6 ~ 0.8 m,以防鸭逃走。养鱼处理田间挖两条交叉的十字形沟,沟深 30cm,供鲤鱼栖息。水稻种植方式以宽窄行栽插,各小区均实行淹灌(无沟处水深 10cm)。2006 年 4 月 20 日播种,5 月 27 日移栽,6 月 10 日放入鸭、鱼,至 8 月 15 日水稻齐穗期收鸭和鱼。鸭放养期间,根据田间饵料情况酌情补饲料,在水稻全生育期不进行化学除草治虫、不施肥。3 个处理在整个生育期间

其它的管理保证一致。

1.5 CH₄ 和 N₂O 的取样和测定方法

CH₄ 和 N₂O 的采样采用常用的静态箱法,采样箱由透明的有机玻璃制成,箱高 100cm,底面尺寸 60 cm × 60 cm,箱顶有一采样孔,观测时密封。箱壁安装两个小电扇,以使箱内的空气充分混合。采样时先用蓄电池接通电扇电源,使电扇工作 2min,以保证箱内气体混合均匀。之后用 50ml 注射器采集 20ml 气样放入真空密闭的玻璃瓶内。采样时间间隔设为 0、10、20、30min。目前一般选择 9:00 ~ 12:00 作为当日采样时间,并假定此测定值能代表当日交换通量。本试验选择 9:00 ~ 11:00 采气,放鸭、鱼前、放鸭、鱼后每 15d 采样 1 次。

CH₄ 浓度的分析用 Varian CP-3800 型气相色谱仪测定,其测定条件为:色谱柱温度为 75℃;检测器(FID)温度 180℃;载气 N₂(>99.999 %),流速 2ml/min;燃气 H₂(>99.99 %),流速 30ml/min;助燃气为空气,流速 300ml/min;进样量 1ml,流速为 40ml/min。CH₄ 标准样品由国家标准物质中心提供,含量为 4.82ml/m³。

N₂O 浓度的分析用岛津气相色谱仪(Shimadzu GC-14B)测定,其测定条件为:色谱柱温度为 65℃;检测器(ECD)温度 300℃;进样器的温度 100℃;载气氩甲烷(95% 氩气 + 5% 甲烷),流速 40ml/min;进样量 1ml,流速为 40ml/min。N₂O 标准样品由国家标准物质中心提供,含量为 303 × 10⁻⁹ mol/mol。

依据下列公式计算 CH₄(N₂O)的排放通量(F)^[18]:

$$F = dc/dt \times (h \times Mw \times Tst) / (Mv \times (Tst + T))$$

式中, dc/dt 为箱内 CH₄(N₂O)的浓度随时间的变化速率; h 为采样箱顶距田面的距离; Mw 为 CH₄(N₂O)的摩尔质量; Mv 为 CH₄(N₂O)的摩尔体积; T 为采样箱内温度; $Tst = 273.2k$; F 为 CH₄(N₂O)排放通量(mg/(m² h))。

根据水稻不同生育时期的 CH₄(N₂O)排放通量,计算不同生育阶段 CH₄(N₂O)排放量。CH₄(N₂O)排放总量为水稻各生育期排放量的总和。

1.6 稻田生态系统 CO₂净通量的估算

整个稻田生态系统 CO₂的净通量为土壤呼吸排放量与地上植株的净吸收量之差,即:

$$F_{CO_2} = f_{SR} - f_{RC}$$

式中, F_{CO_2} 为稻田系统在整个生育期间净通量(g/m²); f_{SR} 为土壤呼吸排放通量; f_{RC} 为地上植株净吸收量。

地上亚系统稻株 CO₂的净通量的估算采用植株碳含量法,即在水稻移栽后每隔 15d 采样,测定水稻干物质生产量,利用重铬酸钾氧化法测定稻株各部位的碳含量,然后换算出固定的 CO₂量。

本研究对地下亚系统 CO₂净交换量的估算采用了间接的方法,即利用土壤有机碳库的变化估算不同时期土壤呼吸排放的 CO₂-C, 依据如下公式进行估算:

$$f_{SR} = - (SOC_i - SOC_{i-1}) \times c \times h \times 1000 \times 44/12$$

式中, f_{SR} 指在某一时间段内土壤呼吸释放的 CO₂ 量(g/m²); SOC_i 指第 i 时刻测定的土壤有机碳含量(g/kg 干土); SOC_{i-1} 为第 i 时刻之前一次测定的土壤有机碳含量(g/kg 干土); c 指土壤容重(g/cm³); h 为耕作层厚度(m)。

1.7 综合增温潜势(GWP)的计算

GWP 是用于定量衡量不同温室气体对全球变暖的相对影响。以 20a 影响尺度为计,1kg 的 CH₄的增温效应是 1kg 的 CO₂的 63 倍,而 1kg 的 N₂O 的增温效应是 1kg 的 CO₂的 270 倍^[19]。稻田生态系统不仅吸收固定 CO₂,而且排放 CH₄、N₂O、CO₂。本研究用全球增温潜势(GWP)来表示不同稻田生态系统 3 种温室气体的综合作用。其 GWP 的计算如下:

$$GWP = f_{CO_2} \times 1 + f_{CH_4} \times 63 + f_{N_2O} \times 270$$

式中, f 为不同稻田生态系统在水稻全生育期间内不同温室气体的排放量。

2 结果与分析

2.1 不同稻田生态系统 CH₄ 排放量

由图 1 看出, 水稻的整个生育期间, 养鸭(RD)、对照(CK)和养鱼(RF)处理的 CH₄ 排放量分别是 $(19.11 \pm 1.26) \text{ g/m}^2$ 、 $(26.71 \pm 3.10) \text{ g/m}^2$ 和 $(25.01 \pm 2.27) \text{ g/m}^2$ 。RD 处理的 CH₄ 排放总量比 CK 减少 28.4%, 差异达到显著水平($p < 0.05$)。而 RF 处理的甲烷排放总量比对照减少 6.4%, 差异不显著。RD 的甲烷排放总量与 RF 差异不显著。

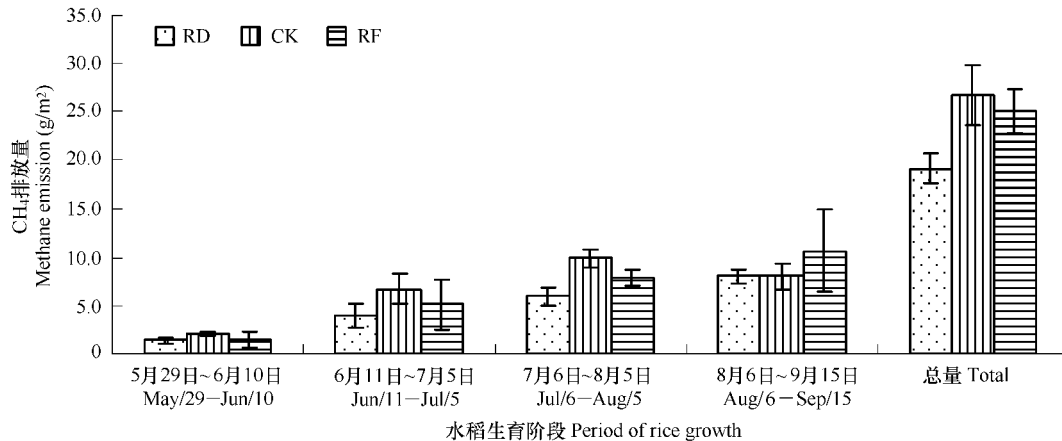


图 1 水稻不同生育阶段甲烷排放量

Fig. 1 Amount of methane emission during different growth stages of rice

3 类稻田生态系统甲烷排放量的季节动态也有所不同。与 CK 相比, RD、RF 稻田的甲烷排放量以灌浆成熟期(8 月 6 日~9 月 15 日)甲烷排放量最多。CK 的甲烷排放量在孕穗期(7 月 6 日~8 月 5 日)最多。在孕穗期(7 月 6 日~8 月 5 日)3 处理的甲烷排放量差异显著($p < 0.05$), 其它阶段差异不显著。从 6 月 11 日至 8 月 5 日 RD 的甲烷排放量显著低于 CK($p < 0.05$), 可见由于鸭子的活动能减少甲烷的排放量。

2.2 不同稻田生态系统 N₂O 排放量

由图 2 知, 从放鸭始(6 月 10 日)至分蘖末(7 月 10 日), 及孕穗期(7 月 6 日至 8 月 5 日), N₂O 的排放量均以养鸭稻田最多, 其次是对照稻田, 养鱼稻田的排放量最少, 3 处理之间差异达到了显著水平。可见由于鸭子的搅动, 土壤通气状况改善, 为土壤的硝化和反硝化过程提供了条件, 增加了 N₂O 的排放。从齐穗期—水稻收获(8 月 6 日~9 月 15 日), 养鱼稻田的 N₂O 排放量增加, 高于对照和养鸭稻田, 这于 8 月底水稻成熟后

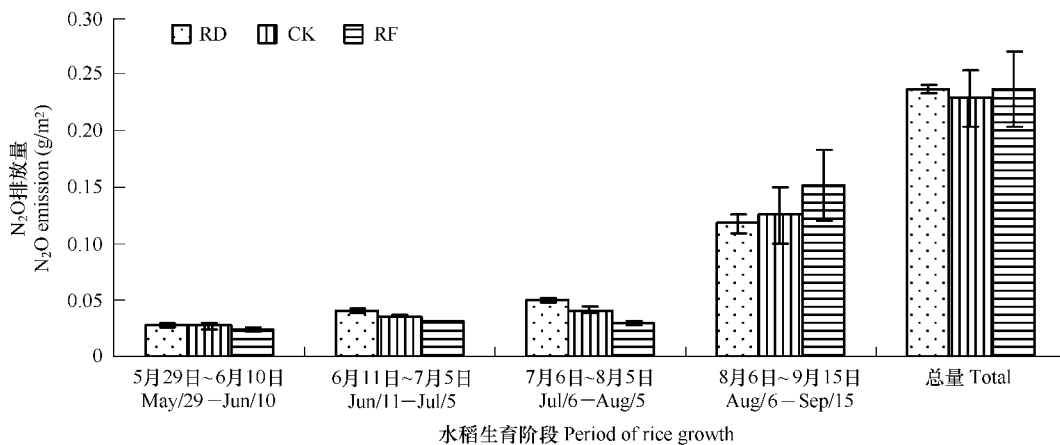


图 2 水稻不同生育阶段 N₂O 排放量

Fig. 2 Amount of nitrous oxide emission during different growth stages of rice

期的干田有关,养鱼和对照稻田的通气状况突然改善,增强了反硝化过程,导致其 N_2O 的排放量增加。在水稻的整个生育期间, RD、CK 和 RF 稻田的 N_2O 排放量分别达到 $(0.237 \pm 0.004) \text{ g/m}^2$ 、 $(0.229 \pm 0.025) \text{ g/m}^2$ 、 $(0.237 \pm 0.033) \text{ g/m}^2$ 。RD 和 RF 处理的 N_2O 排放量比对照(CK)多了 3.3%,但 3 个处理之间差异不显著。

2.3 不同稻田生态系统的 CO_2 净通量

由图 3 知,整个生育期间 RD 处理稻田水稻植株 CO_2 净交换量最大,为 $(2766.4 \pm 267.09) \text{ g/m}^2$,其次是 RF 为 $(2759.59 \pm 30.79) \text{ g/m}^2$,最少的是 CK 为 $(2533.9 \pm 288.21) \text{ g/m}^2$ 。3 类稻田生态系统 CO_2 净固定高峰期均出现在孕穗期(7 月 6 日~8 月 5 日),在灌浆成熟期 3 类稻田对 CO_2 净固定均在下降。各时期不同稻田 CO_2 的净固定量差异不显著。

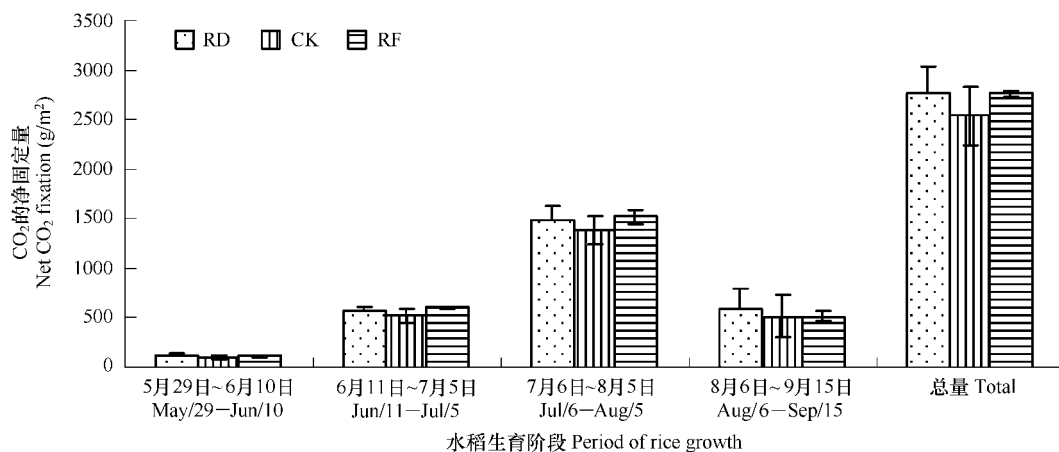


图 3 不同生育阶段水稻植株对 CO_2 的净固定量(地上部分)

Fig. 3 Net carbon dioxide fixation by rice plant above ground during different rice growth stage

本文主要研究了 20cm 耕作层的土壤 CO_2 净交换量。由图 4 知, RD、RF 和 CK 处理稻田的土壤 CO_2 净交换量表现出比较一致“高、低、高”的规律。从移栽至分蘖期(5 月 29 日~7 月 5 日)土壤有机碳库增加,但增加速率变慢,表现为土壤对 CO_2 的净固定。此期来自水稻提供的有机碳很少,其土壤有机碳的增加,与前茬油菜杆的还田有关,随着其降解,表现为 CO_2 净收入减少。孕穗期(7 月 6 日~8 月 5 日),水稻根系发育达到最

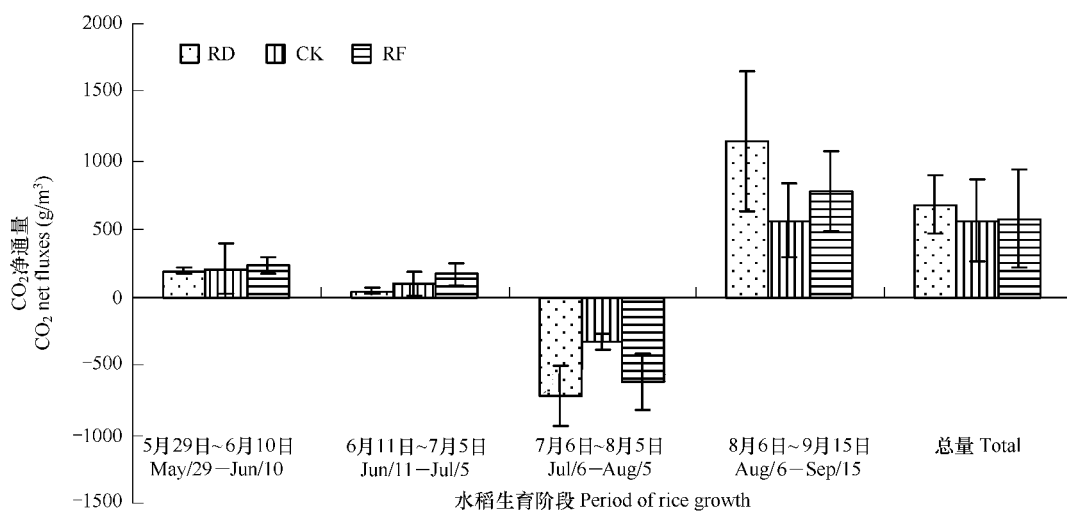


图 4 水稻不同生育阶段土壤碳库($\text{CO}_2\text{-C}$)的变化

Fig. 4 Change of soil carbon pool during different rice growth stage

旺盛期,土壤呼吸作用增强,土壤有机碳库减少,表现为 CO_2 的净支出。由于鸭子的活动,改善了土壤通气状况,使土壤呼吸作用增大,因此从放鸭始至 8 月 6 日,养鸭稻田的土壤有机碳库减少较快。齐穗期—水稻收获(8 月 6 日~9 月 15 日)期间,由于枯叶的凋落和根系的衰老,三类型稻田的土壤有机碳库均增加,其中以养鸭稻田增加最多,这可能与养鸭处理的干物质生产量高有关。从水稻整个生育期看, RD、RF 和 CK 的土壤有机碳库表现为增加,相当于净固定 CO_2 分别为 $(675.55 \pm 209.62) \text{ g/m}^2$ 、 $(575.43 \pm 355.82) \text{ g/m}^2$ 、 $(562.62 \pm 304.62) \text{ g/m}^2$ 。不同处理各时期土壤的净交换通量差异不显著。

从图 5 知, 3 类稻田整个系统 CO_2 净交换量均表现为对 CO_2 的固定,以养鸭稻田的最高,整个生育期可固定 CO_2 达 $(3441.95 \pm 392.74) \text{ g/m}^2$,其次养鱼稻田为 $(3335.03 \pm 326.13) \text{ g/m}^2$,对照稻田为 $(3096.51 \pm 567.93) \text{ g/m}^2$ 。3 处理之间差异不显著。从季节变化看, RD 和 RF 处理 CO_2 的净固定在灌浆成熟期多,而 CK 在孕穗期多。

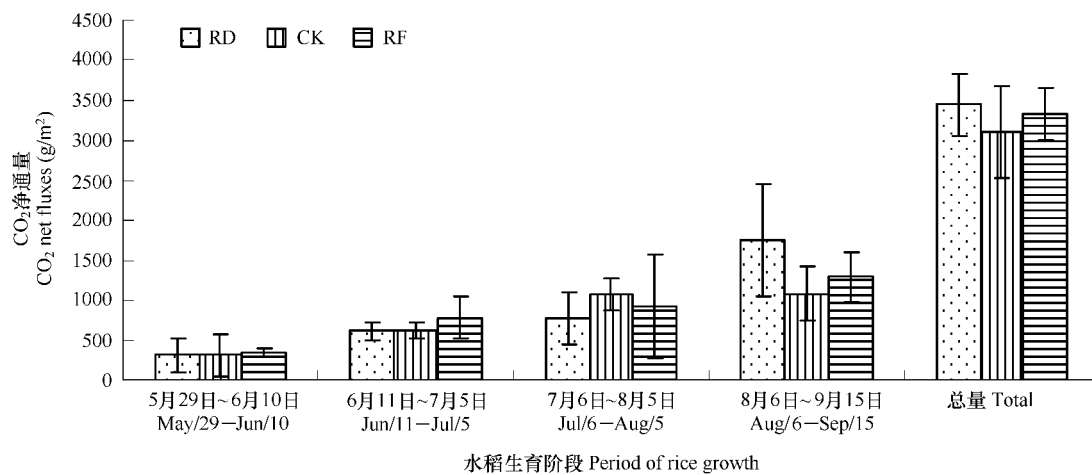


图 5 水稻不同生育阶段全稻田系统 CO_2 净通量

Fig. 5 CO_2 net fluxes of the whole system during different rice growth stage

2.4 不同稻田生态系统综合增温潜势比较

水稻在其生产过程中,必然有 CH_4 、 N_2O 的释放以及 CO_2 的固定和排放。不同稻田生态系统结构及管理措施的不同会导致这 3 种温室气体的产生、排放的变化。因此评价稻田生态系统的环境生态效应时,需要统筹考虑 3 种温室气体的综合效应。由表 1 知,在 20a 的时间尺度上,3 类稻田系统在其全生育期间均表现出降低温室气体增温潜势的趋势, RD、CK 和 RF 处理稻田的综合增温潜势分别为 -2173.84 、 -1351.67 、和 -1695.54 ,表明养鸭稻田(RD)由于 CO_2 固定的增多,甲烷排放减少,其未来减缓增温的潜力越大。相对而言以常规淹水(CK)、养鱼(RF)的增温潜势较大。与常规淹水稻田比,稻田养鸭后减缓综合温室效应的潜力是常规淹水稻田的 1.6 倍左右。

表 1 不同稻田生态系统综合增温潜势

Table 1 Comprehensive Global Warming Potential (GWP) of different paddy ecosystem

处理 Treatment		D	CK	F
CH_4 (g/m^2)	排放量 emission	19.11 b	26.71 a	25.01 ab
	增温潜势 GWP	1204.18 b	1682.94 a	1575.41 ab
N_2O (g/m^2)	排放量 emission	0.24 a	0.23 a	0.24 a
	增温潜势 GWP	63.92 a	61.91 a	64.07 a
CO_2 (g/m^2)	净通量 net flux	-3441.95 a	-3096.51 a	-3335.03 a
	增温潜势 GWP	-3441.95 a	-3096.51 a	-3335.03 a
综合增温潜势 Comprehensive GWPs		-2173.84 b	-1351.67 a	-1695.54 ab

同一行不同小写字母表示在 5% 水平上的显著差异 Values in the same row that do not contain the same small letters are significantly different at the 5% level

3 讨论

与常规淹水稻田相比,稻田养鸭能有效减少甲烷排放,证实了已有的研究^[16,20]。稻田甲烷的产生要求严格的厌氧条件,当土壤氧化还原电位低于 -150mv 时产生较多甲烷。在稻-鸭复合生态系统中,由于鸭子的活动,加快了稻田土壤气体的交换;鸭子觅食大量田间浮游生物,减少了水体溶氧的消耗,使水体、土壤溶解氧增加,土壤氧化还原电位升高,产甲烷细菌数量减少,减少了甲烷的产生,促使土壤产生的 CH_4 被较快地氧化,从而降低 CH_4 的排放量^[15,21]。养鸭稻田 N_2O 排放的研究较少。稻田 N_2O 的产生是硝化和反硝化过程相互作用的结果^[22],与甲烷相比,对土壤条件要求不同,当稻田土壤交替通气时,排放最多。因此由于鸭子的活动改善了土壤的通气条件,造成 N_2O 排放增多。

对于稻田养鱼后温室气体的排放研究较少。本研究中养鱼稻田的甲烷和 N_2O 的排放量与常规淹水稻田差异不显著。但 Frei 等研究认为稻田养鲤鱼后,由于鱼的活动,增强了甲烷通过水体扩散外排的途径;并且鱼消耗水体里的溶解氧及啃食水体的杂草,使水体的溶解氧减少,降低了土壤氧化还原电位,增加了甲烷的排放^[17]。

土壤呼吸是生态系统碳循环向大气释放 CO_2 的主要碳源,估计全球土壤呼吸每年释放到大气的碳通量达到 $68 \sim 75 \text{ PgC}^{[23]}$ 。对于土壤和大气之间的碳交换的估算通常有两种方法:一是测定一定时期内土壤有机碳库的变化;二是测定农田土壤 CO_2 的呼吸排放通量^[24,25]。本研究从整个系统的角度,利用土壤碳库的变化来估算土壤矿化呼吸排放的 CO_2 量。在该估算方法中忽略了稻田土壤有机碳的厌氧矿化排放的甲烷及因下渗和流失丢失的有机碳量,因此估算的数值要比实际值大一些。目前关于水稻生长期土壤有机碳的动态变化研究较少,利用该估算方法,水稻生长期稻田土壤有机碳库表现为先降后升的趋势,从整个生育时期看,稻田土壤表现为 CO_2 的净固定,养鸭稻田土壤固定的 CO_2 比常规淹水和养鱼稻田略高。

在评价稻田生态系统的温室气体排放和对全球增温的影响时,往往注重的是土壤 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 的排放,而忽略了水稻植株对 CO_2 的吸收固定这一重要的汇。目前对 CO_2 的吸收固定量的测定常用涡度相关法、静态箱法和干物质积累法计算^[26]。3 种方法各有利弊,但均可作为稻株对 CO_2 固定量估算的可选方法。稻田生态系统是温室气体的源或汇取决于 3 种温室气体的交换过程和交换强度。本研究中 3 类稻田生态系统在水稻整个生长季节内均表现为温室气体的汇,其汇的大小主要取决于 CH_4 和 CO_2 。这与前人研究的结果比较一致^[19]。且稻田不同种养模式会影响到温室气体的源、汇强度。

4 结论

(1) 稻田养鸭后能显著减少甲烷的排放,水稻整个生育期间排放量为 $(19.11 \pm 1.26) \text{ g/m}^2$,比对照减少 28.4%。稻田养鱼对稻田甲烷的减排效果不明显。

(2) 稻田养鸭、养鱼后对 N_2O 的排放没有造成显著性的影响。

(3) 3 类稻田的土壤亚系统在水稻整个生育期间均表现出由 CO_2 排放向 CO_2 固定的变化,整个水稻生长期综合看土壤亚系统表现为 CO_2 的净固定。稻田养鸭后能略微提高稻田地上部分和地下部分 CO_2 的固定。

(4) 从水稻整个生长季节看,3 类稻田的综合温室效应为负值,表现为减缓温室气体的增温趋势,其大小主要取决于甲烷的排放和 CO_2 的净固定。稻田养鸭后,减少了稻田甲烷的排放,增加了 CO_2 的固定,其减缓综合温室效应的潜力是常规淹水稻田的 1.6 倍左右。

References:

- [1] Verge X P C, Kimp C D, Desjardins R L. Agricultural production, greenhouse gas emissions and mitigation potential. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 142: 255—269.
- [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. *Chemosphere*, 2003, 52: 1295—1305.
- [3] Donald J W, Katharine H. Atmospheric methane and global change. *Earth-Science Reviews*, 2002, 57: 177—210.
- [4] Kewei Y, William H P. Redox window with minimum global warming potential contribution from rice soils. *Soil Sci. Soc. Am.*, 2004, 68: 2086—2091.

- [5] Akira M, Ray L, Owen T D, *et al.* Carbon dioxide and methane fluxes from an intermittently flooded paddy field. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 102: 287–303.
- [6] Adhya T K, Bharati K, Mohanty S R, *et al.* Methane emission from rice fields at Cuttack, India. *Nutr. Cycl. Agroecosys.*, 2000, 58: 95–105.
- [7] Guo J P, Zhou Ch D. Greenhouse gas emissions and mitigation measures in Chinese agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 142: 270–277.
- [8] Schutz H, Seiler W, Conrad R. Processes involved in formation and emissions of methane in rice paddies. *Biogeochemistry*, 1989, 94: 33–53.
- [9] Deborah A. Bossio, William R. Horwath, Randall G. Mittersb, *et al.* Methane pool and flux dynamics in a rice field following straw incorporation. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31: 1313–1322.
- [10] Orapin K. Methane emission in four rice varieties as related to sugars and organic acids of roots and root exudates and biomass yield. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 108: 155–163.
- [11] Lu W S, Liao Z W, Zhang J G, *et al.* Effects of different rice-vegetable rotation systems on CH₄ emission from paddy soil. *Agro-environmental Protection*, 1999, 18(5): 200–202.
- [12] Pathak H, Wassmann R. Introducing greenhouse gas mitigation as a development objective in rice-based agriculture I. Generation of technical coefficients. *Agricultural Systems*, 2007, 94: 807–825.
- [13] Yu S M, Ouyang Y N, Zhang Q Y, *et al.* Effects of rice-duck farming system on *Oryza sativa* growth and its yield. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16: 1252–1256.
- [14] Wang Q S, Huang P S, Zhen R H, *et al.* Effect of rice-duck mutualism on nutrition ecology of paddy field and rice quality. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15: 639–645.
- [15] Huang Y, Wang H, Huang H, *et al.* Characteristics of methane emission from wetland rice duck complex ecosystem. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2005, 105: 181–193.
- [16] Xiang P A, Huang H, Huang M, *et al.* Studies on technique of reducing methane-emission in a rice-duck ecological system and the evaluation of its economic significance. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(5): 968–975.
- [17] Frei M, Becker K. Integrated rice fish production and methane emission under greenhouse conditions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 107: 51–56.
- [18] Wang M X. Methane emission from rice fields in China. *Science Press*, 2001.
- [19] Liu J D, Zhou X J, Yu Q. Numerical analysis of the source-sink alternation of composite global warming potential of the paddy ecosystem in the Yangtze Delta. *Science in China (Ser. D)*, 2003, 33(2): 105–113.
- [20] Gan D X, Huang H, Jiang T G, *et al.* Decrease in CH₄ emission and its mechanism in no-tillage rice-duck complex system. *Rural Eco-Environment*, 2005, 21(2): 1–6.
- [21] Deng X, Liao X L, Huang H. Studies on amount of methanogens in the rice-duck agroecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1695–1699.
- [22] Zheng X H, Wang M X, Wang Y S *et al.* CH₄ and N₂O emissions from rice paddy field in southeast China. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1997, 21(2): 231–237.
- [23] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biochemical Cycles*, 1995, 9: 23–36.
- [24] Lei H J, Li B G, Bai Y L, *et al.* Estimation of soil organic matter mineralization in the plough layer and CO₂ emission under different farming practices in China's Huang-Huai-Hai plain. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(10): 2035–2042.
- [25] Yang X M, Zhang X P, Fang H J. Importance of agricultural soil sequestering carbon to offsetting global warming. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(1): 101–106.
- [26] Zhou W J, Zhu L Z, Hao J J, *et al.* CO₂ emission and fixation in paddy ecosystem during late rice growing season in red soil hilly region. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, 23(1): 7–11.

参考文献:

- [11] 卢维盛, 廖宗文, 张建国, 等. 不同水旱轮作方式对稻田甲烷排放影响的研究. *农业环境保护* 1999, 18(5): 200–202.
- [13] 禹盛苗, 欧阳由男, 张秋英, 等. 稻鸭共育复合系统对水稻生长与产量的影响. *应用生态学报*, 2005, 16: 1252–1256.
- [14] 王强盛, 黄丕生, 甄若宏, 等. 稻鸭共作对稻田营养生态及稻米品质的影响. *应用生态学报*, 2004, 15: 639–645.
- [16] 向平安, 黄璜, 黄梅, 等. 稻-鸭生态种养技术减排甲烷的研究及经济评价. *中国农业科学*, 2006, 39(5): 968–975.
- [18] 王明星. 中国稻田甲烷排放. 北京: 科学出版社, 2001.
- [19] 刘建栋, 周秀骥, 于强. 长江三角洲稻田生态系统综合增温潜势源汇交替的数值分析. *中国科学(D 辑)*, 2003, 33(2): 105–113.
- [20] 甘德欣, 黄璜, 蒋廷杰, 等. 免耕稻-鸭复合系统减少甲烷排放及其机理研究. *农村生态环境*, 2005, 21(2): 1–6.
- [21] 邓晓, 廖晓兰, 黄璜. 稻-鸭复合生态系统产甲烷细菌数量. *生态学报*, 2004, 24(8): 1695–1699.
- [22] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 华东稻田 CH₄ 和 N₂O 排放. *大气科学*, 1997, 21(2): 231–237.
- [24] 雷宏军, 李保国, 白由路, 等. 黄淮海平原区不同农作措施下耕层土壤有机质矿化与 CO₂ 排放估算. *中国农业科学*, 2005, 38(10): 2035–2042.
- [25] 杨学明, 张晓平, 方华军. 农业土壤固碳对缓解全球变暖的意义. *地理科学*, 2003, 23(1): 101–106.
- [26] 周卫军, 朱良枝, 郝金菊, 等. 红壤丘陵区晚稻生长期 CO₂ 的排放与固定规律. *生态与农村环境学报*, 2007, 23(1): 7–11.