

刘银涛, 王晓东, 曹凑贵, 等. 稻-鸭-虾模式对稻田生态系统碳排放及碳固定的影响研究[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(3): 38-44.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.03.005

稻-鸭-虾模式对稻田生态系统碳排放及碳固定的影响研究

刘银涛¹, 王晓东¹, 曹凑贵², 汪金平^{1,2}, 顾泽茂^{2,3}, 刘娟¹, 江洋^{1,2}

1. 华中农业大学植物科学技术学院, 武汉 430070; 2. 华中农业大学双水双绿研究院, 武汉 430070;
3. 华中农业大水产学院, 武汉 430070

摘要 为探究不同稻-鸭-虾种养模式与水稻单作模式和传统稻-虾种养模式的碳排放及碳固定特征差异, 于湖北省荆州市华中农业大学双水双绿研究基地开展大田试验, 以水稻品种华墨香5号、克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)、肉鸭武禽10号为试验材料, 研究水稻单作(monoculture, CK1)模式、稻-虾种植(rice-crayfish coculture, CK2)、稻-鸭-虾单元格投放(rice-duck-crayfish unit release model, CRXD)、稻-鸭-虾“游牧鸭”(rice-duck-crayfish “nomadic duck” model, NRXD)、稻-鸭-虾大田块(rice-duck-crayfish large field block model, BRXD)共5种种养模式下稻田甲烷(methane, CH₄)、氧化亚氮(nitrous oxide, N₂O)排放、全球增温潜势(global warming potential, GWP)、温室气体排放强度(greenhouse gas emission intensity, GHGI)以及碳固定潜力。结果显示, 相比传统水稻单作模式, 稻-鸭-虾模式降低了稻田CH₄排放、GWP、GHGI, 碳中和效应显著增加。与水稻单作相比, 稻-鸭-虾模式CH₄的排放量降低了28.1%~32.1%, GWP降低了27.0%~30.7%, GHGI降低了23.0%~26.7%, 碳固定增加了2 089~2 569 kg/hm²。与稻-虾种养相比, 稻-鸭-虾模式的CH₄排放量降低了18.6%~23.1%, GWP降低了17.9%~22.2%, GHGI下降18.7%~22.0%, 碳固定增加了616~1 096 kg/hm²。结果表明, 稻-鸭-虾模式可以降低稻田碳排放量, 提高稻田碳中和潜力, 其中稻-鸭-虾大田块模式固碳减排效果最佳。

关键词 稻-鸭-虾模式; 稻田种养; 碳排放; 碳固定; CH₄排放; N₂O排放

中图分类号 S181; S511; S966.12; S834 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)03-0038-07

水稻(*Oryza sativa* L.)是全球主要粮食作物之一, 更是我国第一大粮食作物。随着全球变暖的影响日趋严重, 极端气候出现愈加频繁, 稻田作为温室气体排放的最重要来源之一, 其排放量约占我国农业温室气体排放总量的42%^[1]。其中, 直接碳排放约占碳总排放量的50%~80%, 而农业生产中投入的能源和农资所导致的间接碳排放约占碳总排放量的38%~58%^[2]。在直接碳排放中又以CH₄和N₂O为主要排放形式, 约占直接碳排放量的70%以上^[2]。因此, 稻田减排的新模式研究是实现水稻生产可持续发展的重要基础, 同时也是农业发展中研究的热点。已有研究表明, 稻田综合种养模式在提高稻田经济效益、减少化肥和农药的使用、改善土壤结构和肥力等方面具有显著优势^[3-4]。在稻-鸭-虾种养和稻-鸭种养模式中虾和鸭的活动会促进土壤气体交

换, 增加水体中的含氧量, 从而影响甲烷细菌和硝化与反硝化细菌的活性, 降低温室气体的排放量^[5-7]。稻-鸭-虾综合种养模式有机地整合了稻-鸭共作与稻-虾轮作模式, 该模式的应用进一步提高了稻田综合经济效益, 然而, 关于该模式对农田生态系统的固碳减排特征尚缺乏系统评估。本研究以稻-鸭-虾模式为主要研究对象, 对比传统稻作和稻-虾模式, 探究不同稻-鸭-虾模式的碳排放及碳固定特征变化, 旨在为稻-鸭-虾模式种养的生态效益评估提供参考, 为促进稻-鸭-虾模式的推广应用提供支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地及材料

试验于2022年3月至2022年11月在湖北省荆州市监利市横台村华中农业大学双水双绿研究基地

收稿日期: 2024-09-20

基金项目: 湖北洪山实验室重大项目(2021HSZD002); 国家重点研发计划项目(2022YFD2400700); 湖北省自然科学基金项目(2023AFB789); 武汉市科技特派员产学研专项(2023110201030656)

刘银涛, E-mail: liuyintao@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 江洋, E-mail: jiangyang@mail.hzau.edu.cn; 刘娟, E-mail: LiuJuan@mail.hzau.edu.cn

开展。供试水稻品种为华墨香5号,供试虾为克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*),供试鸭品种为武禽10号。

1.2 试验设计

试验共设5个处理,水稻单作和稻-虾模式为对照组,稻-鸭-虾模式有单元格模式、游牧鸭模式和大田块模式3种处理,每种模式设置3次重复。试验具体设置如下:水稻单作模式(monoculture, CK1):传统农户种植模式,种植密度 $16\text{ cm} \times 30\text{ cm}$,每穴4株。水稻施氮量 150 kg/hm^2 ,基肥追肥质量比7:3。灌溉方式为当地传统灌溉模式,除了晒田和收获期田间自然晒干且不灌水外,其余时期田面水均保持 10 cm 。稻-虾模式(rice-crayfish coculture, CK2):小区周围开挖围沟,种植密度 $14\text{ cm} \times 30\text{ cm}$,每穴4株。水稻移栽前不施用基肥,移栽后于6月30日和7月16日分别施用尿素45和 22.5 kg/hm^2 ,整个生育期内不施用农药,其余田间管理措施同水稻单作一致。稻-鸭-虾单元投放模式(rice-duck-crayfish unit release model, CRXD):采用单元模式,每单元开挖围沟,稻田四周用尼龙网搭建围栏,各田块留有单独鸭棚,供鸭休憩、喂食用。各单元设置独立的进水口和出水口,保证试验田水环境一致且又相互独立,在水稻移栽14 d后将雏鸭以 180 只/hm^2 的密度放入稻田实行鸭稻共作。稻-鸭-虾“游牧鸭”模式(rice-duck-crayfish “nomadic duck” model, NRXD):在相邻2两块田间设置鸭棚且留有通道,在水稻插秧后10 d左右将雏鸭以 90 只/hm^2 的密度放入稻田实行鸭稻共作,通过人工赶鸭的方式控制鸭活动区域。稻-鸭-虾大田块模式(rice-duck-crayfish large field block model, BRXD):在水稻移栽14 d后将雏鸭以 180 只/hm^2 的密度放入稻田,田块面积 1.6 hm^2 ,鸭在田间自由活动。其余田间管理与稻-虾模式(CK2)一致。

1.3 CH_4 、 N_2O 排放通量的测定

采用静态箱-气相色谱法^[8]测定 CH_4 、 N_2O 浓度,每批样品在14 d内测定。检测条件:在 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度下,使用氢火焰离子化检测器(FID)分析 CH_4 浓度,通过电子捕获检测器(ECD)检测 N_2O 浓度。载气为流速 300 mL/min 的高纯氮气,燃气为流速 50 mL/min 的氢气,助燃气为流速 300 mL/min 的空气。 CH_4 和 N_2O 的排放通量根据公式(1)计算^[9]:

$$F = \rho \times h \times \frac{dC}{dt} \times \frac{273}{273 + t} \quad (1)$$

式(1)中, F 为气体通量, $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; ρ 为标准状态下气体密度, kg/m^3 ; h 为采样箱顶部距离水面的高

度, m ; dC/dt 是采样箱内气体浓度变化率, t 为采样过程中采样箱内的平均温度, $^\circ\text{C}$ 。

水稻生育期 N_2O 和 CH_4 的累积排放量,采用2个相邻的采样时期的均值与采样时间间隔的乘积累加得到^[10]:

$$F_c = \frac{\sum_{i=1}^n (F_i + F_{i+1})}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \quad (2)$$

式(2)中, F_c 为 N_2O 和 CH_4 的累积排放量, kg/hm^2 ; $(F_i + F_{i+1})$ 是两次相邻采样气体通量, $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; $(t_{i+1} - t_i)$ 是两次相邻采样时间间隔, h ; n 表示采样次数。

1.4 全球增温潜势和温室气体排放强度的测定

全球增温潜势(global warming potential, GWP)按照Bayer等^[11]方法进行计算;温室气体排放强度(greenhouse gas emission intensity, GHGI)按照Mohanthy等^[12]方法计算,公式如下:

$$P_{\text{GWP}} = 30 \times E_{\text{CH}_4} + 268 \times E_{\text{N}_2\text{O}} \quad (3)$$

式(3)中, P_{GWP} 是GWP的测算量, $\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{hm}^2$,表示 CH_4 与 N_2O 排放量折算为等温室效应的 CO_2 排放量的增温潜势; E_{CH_4} 是 CH_4 的增温潜势, $E_{\text{N}_2\text{O}}$ 是 N_2O 的增温潜势。温室气体排放强度由式(4)得到:

$$I_{\text{GHGI}} = \frac{P_{\text{GWP}}}{Q} \quad (4)$$

式(4)中, I_{GHGI} 是GHGI的测算量, $\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{kg}$,表示单位产量的 CO_2 当量; Q 是水稻产量, kg/hm^2 。

1.5 碳固定和碳中和效应测定

碳中和效应参考陈松文等^[13]方法计算。

$$G_c = G_s - G_e \quad (5)$$

式(5)中, G_c 、 G_s 、 G_e 分别代表碳中和量、碳固定量、碳排放量, kg/hm^2 。其中:

$$G_s = B_{\text{st}} \times C_{\text{st}} + B_r \times C_r + \Delta_o \times \rho \times d \times 0.37 \quad (6)$$

式(6)中, B_{st} 是秸秆生物量, kg/hm^2 ; C_{st} 是秸秆含碳量, $\%$; B_r 是根系生物量, kg/hm^2 ; C_r 是根系含碳量, $\%$; Δ_o 是土壤有机质变化量, kg/hm^2 ; ρ 是土壤容重, $1.15\text{ g}/\text{cm}^3$; d 是耕作层厚度, 20 cm ;修正系数取值为0.37。

$$G_e = G_D + G_I \quad (7)$$

$$G_D = (C_{\text{CH}_4} \times 25 + C_{\text{N}_2\text{O}} \times 298) \times 0.273 \quad (8)$$

$$G_I = \sum (q_i q_j \times \epsilon_j) \quad (9)$$

式(7)~(9)中, G_D 为直接排放量、 G_I 为间接排放量、 C_{CH_4} 为 CH_4 排放量、 $C_{\text{N}_2\text{O}}$ 为 N_2O 排放量、 q_i 是农资投入量, kg/hm^2 ; ϵ_j 是温室气体排放系数^[14]。

1.6 水稻产量及产量构成因素测定

在水稻成熟期取样,每个小区取5 m²用于实际产量测定。人工收割和脱粒后,用尼龙网袋装袋晾晒后风选称质量,测定稻谷质量和含水量。待稻谷含水量约为14%时,计算实际产量。同时,在每个小区内随机取样5点,每点区域面积为1 m²,用于计算单位面积水稻有效穗,水稻样品去根后,带回室内使用考种机器[YTS-5D(S)考系列]进行考种分析。

1.7 数据处理与分析

采用IBM SPSS Statistics 26、Excel 2019对数据进行处理和统计分析,对同一年每个处理的平均值用LSD分析法进行多重比较,试验结果用3个重复的平均值表示。采用Origin 2024b软件绘图,平均值的标准差在图中用误差线表示。

2 结果与分析

2.1 产量及产量构成因素

由表1可见,CK1的实际产量最高,为4 980 kg/hm²,BRXD和CK2分别比CK1低6.51%、6.40%,各处理的实际产量仅CK1与CRXD、NRXD、BRXD之间存在显著差异,CK2、CRXD、NRXD、BRXD之间均未达到显著差异。除NRXD外,各模式穗粒数均显著高于CK2,CRXD、NRXD与CK1穗粒数均无显著差异。各处理千粒重无显著差异,CRXD、NRXD、BRXD的结实率均显著高于CK1、CK2 ($P<0.05$),分别相较CK1高出12.98%、10.60%、13.13%,相较CK2高出8.92%、6.62%、9.06%;CRXD、NRXD、BRXD的有效穗数均显著低于CK1、CK2。

表1 不同模式下产量及产量构成因素

Table 1 Yields and constituent factors under different models

处理 Treatments	穗粒数 Grain number per panicle	千粒重/g Thousand grain weight	有效穗/(万穗/hm ²) Effective panicle number	结实率/% Grain filling percentage	实际产量/(kg/hm ²) Grain yield	理论产量/(kg/hm ²) Theoretical yield
CK1	114±2a	24.8±0.4a	273±4a	67.0±0.8c	4 980±66a	5 263±171a
CK2	106±3b	25.4±0.5a	274±1a	69.5±2.7b	4 661±88b	5 083±155b
CRXD	114±2a	26.0±0.3a	219±9c	75.7±2.7a	4 708±108b	4 912±132b
NRXD	106±2b	25.8±0.7a	250±4b	74.1±1.6a	4 720±51b	5 078±185b
BRXD	114±2a	25.7±0.7a	241±14b	75.8±1.7a	4 656±167b	5 159±413ab

注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。Note: Different lowercase letters indicate significant difference between treatments at 0.05 level. The same as follows.

2.2 CH₄和N₂O的排放量

由表2可见,整个生育阶段CK1的CH₄排放量最高,BRXD的CH₄排放量最低,BRXD、NRXD、CRXD相较CK1、CK2显著降低,CRXD、NRXD、BRXD的CH₄排放量相较CK1、CK2分别降低28%和19%、30%和21%、32%和23%;整个生育阶段BRXD的N₂O排放量最高,CK1的N₂O排放量最低,BRXD、NRXD、CRXD相较CK1、CK2显著增加,CRXD、NRXD、BRXD的N₂O排放量相较CK1、CK2分别增加29%和14%、34%和18%、50%和33%。6月21日至7月2日鸭未放养入田,仅BRXD的N₂O排放高于其他处理模式,其余各处理之间CH₄和N₂O之间无显著差异;7月2日至9月1日,将鸭投放入田后CRXD、NRXD、BRXD的CH₄排放量和N₂O排放量与CK1、CK2之间均有显著差异,CRXD、NRXD、BRXD处理CH₄排放量相较CK1、CK2显著降低,CRXD、NRXD、BRXD处理N₂O排放量相较CK1、CK2则显著增加;9月1日至10月14日,鸭收获

后仅CK1的CH₄排放量与其余处理有显著差异,CRXD、NRXD、BRXD处理CH₄排放量相较CK1显著降低,各处理N₂O排放量之间无显著差异。

2.3 全球增温潜势GWP和温室气体排放强度GHGI

由图1可见,稻-鸭-虾模式(CRXD、NRXD、BRXD)全球增温潜势显著低于CK1和CK2,CK1的全球增温潜势最高,BRXD的全球增温潜势最低。不同处理全球增温潜势表现为CK1>CK2>CRXD>NRXD>BRXD,CRXD、NRXD、BRXD相较CK1分别降低27.3%、29.3%、31.0%,相较CK2分别降低18.0%、20.2%、22.2%;CH₄的增温潜势也有着类似的规律,CRXD、NRXD、BRXD相较CK1、CK2分别降低28.1%和18.6%、30.2%和20.1%、32.1%和23.1%;各处理N₂O的增温潜势的规律则与CH₄相反,CK1、CK2与CRXD、NRXD、BRXD之间存在显著差异,3种种养模式之间没有显著差异,表现为BRXD>NRXD>CRXD>CK2>CK1。

表 2 不同时段CH ₄ 和N ₂ O的排放量								
Table 2 Total emissions of CH ₄ and N ₂ O during different period								kg/hm ²
种养模式 Farming modelss	6月21日至7月2日 From June 21 to July 2		7月2日至9月1日 From July 2 to Sept.1		9月1日至10月14日 From Sept.1 to Oct.14		总排放量 Total emissions	
	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O
CK1	14.4±0.7a	0.11±0.01b	506±5a	0.71±0.02d	110.4±5.7a	0.22±0.10a	628±12a	1.04±0.13b
CK2	14.9±0.5a	0.11±0.01b	463±4b	0.80±0.06c	76.6±5.9b	0.27±0.06a	555±10b	1.18±0.13b
CRXD	15.0±0.6a	0.11±0.01b	371±9c	0.96±0.01b	65.4±5.1b	0.28±0.06a	452±14c	1.34±0.08a
NRXD	14.6±0.3a	0.11±0.01b	361±5c	1.04±0.04a	62.9±3.7b	0.24±0.11a	439±9c	1.39±0.20a
BRXD	15.2±0.5a	0.13±0.01a	356±11c	1.20±0.01a	55.4±6.3b	0.24±0.05a	427±17c	1.57±0.07a

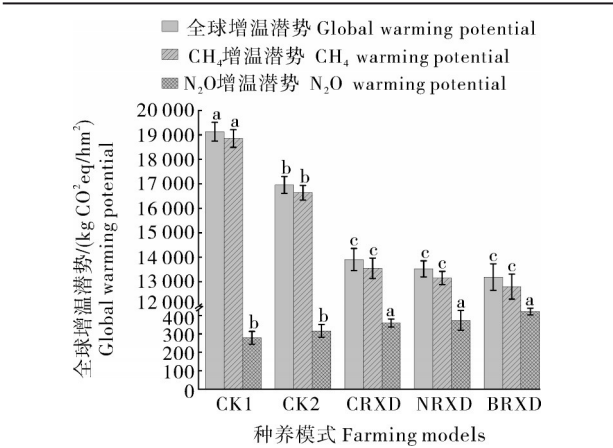


图 1 不同模式全球增温潜势 GWP

Fig. 1 GWP of different models

由图 2 可见,CK1 的温室气体排放强度最高, BRXD 的温室气体排放强度最低,CK1、CK2 与 CRXD、NRXD、BEXD 之间存在显著差异。CRXD、NRXD、BRXD 的温室气体排放强度均低于 CK1, 分别降低 23.2%、25.3% 和 26.3%; CRXD、NRXD、BRXD 的温室气体排放强度相较 CK2 分别降低 18.7%、20.9% 和 21.7%。

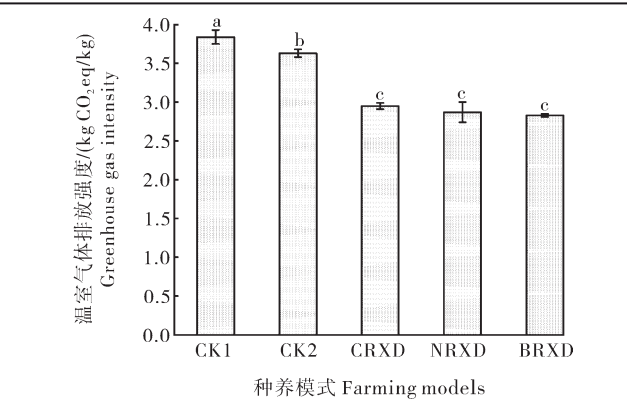


图 2 不同模式温室气体排放强度 GHGI

Fig.2 GHGI of different models

2.4 碳固定潜力

生物量被用来评估水稻的固碳能力,如表 3 所示, BRXD 生物量与其他处理有显著差异, BRXD 的生物量均大于其他处理,固碳能力更强;除 BRXD 外其余模式间地上部生物量与根系生物量间无显著差异。不同模式的土壤固碳量存在显著差异,表现为 NRXD>CK2>BRXD>CK1>CRXD。

表 3 不同模式的碳固定					
Table 3 Carbon sequestration of different models					
种养模式 Farming models	地上部生物量/(kg/hm ²) Aboveground biomass	地上部碳含量/% Aboveground carbon content	根系生物量/(kg/hm ²) Root biomass	根系含碳量/% Carbon content of roots	土壤固碳量/(kg/hm ²) Soil carbon sequestration
CK1	8192b	41.4	1438b	34.6	4.80d
CK2	8216b	41.4	1526b	34.6	10.62b
CRXD	8048b	41.4	1530b	34.6	3.78d
NRXD	8059b	41.4	1498b	34.6	12.07a
BRXD	8720a	41.4	1664a	34.6	8.66c

由表 4 可见,CK1 的间接碳排放量最高,与其他模式间存在显著差异。稻-鸭-虾模式总碳排放量均显著低于 CK1、CK2,相较 CK1 平均降低 37.4%,相较 CK2 降低 17.3%;BRXD 的固碳能力最强,相较 CK1 增加 301 kg/hm²,其余模式与 CK1、CK2 相比差异均不显著。碳中和效应最高, BRXD 相比 CK1 高 2 569 kg/hm²,表现为 BRXD>NRXD>CRXD>CK2>CK1,碳中和效应显著增加($P<0.05$)。

表4 不同模式碳中和效应

Table 4 Carbon neutrality effects of different models

kg/hm²

种养模式 Farming models	间接碳排放量 Indirect carbon emissions	直接碳排放量 Direct carbon emissions	总碳排放量 Carbon emissions	碳固定量 Carbon sequestration	碳中和 Carbon neutral
CK1	1 494a	4 371a	5 865a	3 893b	-1 972d
CK2	555b	3 884b	4 439b	3 940b	-499c
CRXD	555b	3 193c	3 748c	3 865b	117b
NRXD	555b	3 109c	3 664c	3 866b	202b
BRXD	555b	3 042c	3 597c	4 194a	597a

3 讨 论

已有研究表明,稻-鸭共育对水稻产量具有显著影响。其机制主要源于鸭在田间的活动:一方面通过物理扰动有效抑制杂草生长,另一方面促进稻田土壤-水界面的气体交换,从而优化水稻根系微环境,改变养分吸收效率,最终导致产量构成要素的差异化表现^[15-16]。本研究中,稻-鸭-虾综合种养模式的水稻产量相较水稻单作有所降低,这与前人研究^[17]中稻田种养模式中水稻产量下降的趋势相符。然而也有一些研究^[18]认为稻-鸭和稻-虾模式会增产,主要是种养模式能促进水稻的养分吸收,减少病虫害草害的发生,进而影响水稻的产量形成,促进水稻增产。本研究结果表明,稻-鸭-虾模式可显著提高水稻生物量及结实率但有效穗降低,产量有所下降,可能的主要原因是本研究中稻-虾模式和稻-鸭-虾模式的施肥量低于常规模式进而影响产量。

研究表明,稻田综合种养、改变肥料施用类型及干湿交替的节水灌溉模式均有助于显著降低稻田CH₄和N₂O的排放^[19-23]。本研究中稻-鸭-虾模式下CH₄排放量较水稻单作平均下降30%,最高下降32%,且在稻-鸭共育期间CH₄降低最为明显,这与前人研究^[22-23]一致。稻田种养模式显著提升了稻田的生态系统服务功能,鸭的活动抑制CH₄排放^[24-26]。

本研究结果显示,在稻-鸭共育期间,稻-鸭-虾模式显著增加稻田N₂O排放量,这与李成芳等^[27]在稻-鸭稻-鱼模式中的研究结果一致。稻田中N₂O主要由微生物在田间的厌氧硝化作用与好氧反硝化作用下产生,其排放与土壤氮源、含氧量、团聚体等因素有关。本试验中稻-鸭-虾模式下N₂O排放量显著增加,可能原因包括:(1)鸭和虾的活动改善稻田氧化还原条件,促进微生物代谢;(2)鸭与虾的排泄物以及饲料均能为微生物进行硝化与反硝化提供充足的氮源^[28]。

全球增温潜势和温室气体排放强度是用于衡量稻田碳排放和碳固定能力的重要指标^[29],本研究发现,与传统水稻单作相比,稻-鸭-虾模式全球增温潜

势、温室气体排放强度显著降低,这与刘小燕等^[30]在稻-鸭-鱼中的研究结果一致。

本试验结果显示,稻-鸭-虾模式在固碳减排潜力方面显著优于水稻单作和稻-虾模式。稻-虾模式和稻-鸭-虾模式农资投入的减少降低了间接碳排放量,稻-鸭-虾模式直接碳排放量也显著低于水稻单作和稻-虾模式。此外,稻-鸭-虾模式与传统模式碳固定量无显著差异,其中稻-鸭-虾大田块模式碳固定量要显著高于传统模式,这主要是因为大田块模式的水稻总生物量更高,植株固碳更多。这表明稻-鸭-虾模式具有良好的固碳减排潜力。

综上,稻-鸭-虾模式显著降低了稻田碳排放量,有效缓解CH₄排放,尤其是大田块模式在固碳减排潜力上表现优异,具有良好的生态效益。

参考文献 References

- [1] 田云,张俊飏,李波. 中国农业碳排放研究:测算、时空比较及脱钩效应[J]. 资源科学, 2012, 34(11): 2097-2105. TIAN Y, ZHANG J B, LI B. Agricultural carbon emissions in China: calculation, spatial-temporal comparison and decoupling effects [J]. Resources science, 2012, 34(11): 2097-2105 (in Chinese with English abstract).
- [2] 段华平,张悦,赵建波,等. 中国农田生态系统的碳足迹分析[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 203-208. DUAN H P, ZHANG Y, ZHAO J B, et al. Carbon footprint analysis of farmland ecosystem in China [J]. Journal of soil and water conservation, 2011, 25(5): 203-208 (in Chinese with English abstract).
- [3] 曹凑贵,李成芳,展茗,等. 稻田管理措施对土壤碳排放的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(1): 93-98. CAO C G, LI C F, ZHAN M, et al. Effects of agricultural management practices on carbon emissions in paddy fields [J]. Journal of integrative agriculture, 2011, 44(1): 93-98 (in Chinese with English abstract).
- [4] 展茗,曹凑贵,汪金平,等. 复合稻田生态系统温室气体交换及其综合增温潜势[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5461-5468. ZHAN M, CAO C G, WANG J P, et al. Greenhouse gases exchange of integrated paddy field and their comprehensive global warming potentials [J]. Acta ecologica sinica, 2008, 28(11): 5461-5468 (in Chinese with English abstract).

- [5] 汤薇. 鸭行为刺激对稻田甲烷排放的影响及机制[D]. 广州: 华南农业大学, 2018. TANG W. The impact and mechanism of duck behavior stimulation on methane emissions from paddy fields [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2018(in Chinese with English abstract).
- [6] 李成芳, 曹凑贵, 徐拥华, 等. 稻鸭与稻鱼生态系统土壤微生物量N和土壤酶活性动态[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3905-3912. LI C F, CAO C G, XU Y H, et al. Dynamics of soil microbial biomass N and soil enzymes activities in rice-duck and rice-fish ecosystems [J]. Acta ecologica sinica, 2008, 28(8): 3905-3912 (in Chinese with English abstract).
- [7] 温婷, 赵本良, 章家恩. 稻鸭共作中CH₄和N₂O排放规律及影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1442-1450. WEN T, ZHAO B L, ZHANG J E. Emission pathways and influencing factors for CH₄ and N₂O from rice-duck farming [J]. Journal of agro-environment science, 2020, 39(7): 1442-1450 (in Chinese with English abstract).
- [8] NOUCHI I, MARIKO S, AOKI K. Mechanism of methane transport from the rhizosphere to the atmosphere through rice plants[J]. Plant physiology, 1990, 94(1): 59-66.
- [9] ZHENG X H, WANG M X, WANG Y S, et al. Comparison of manual and automatic methods for measurement of methane emission from rice paddy fields [J]. Advances in atmospheric sciences, 1998, 15(4): 569-579.
- [10] SINGH J S, SINGH S, RAGHUBANSHI A S, et al. Methane flux from rice/wheat agroecosystem as affected by crop phenology, fertilization and water level [J]. Plant and soil, 1996, 183(2): 323-327.
- [11] BAYER C, DE SOUZA COSTA F, PEDROSO G M, et al. Yield-scaled greenhouse gas emissions from flood irrigated rice under long-term conventional tillage and no-till systems in a humid subtropical climate [J]. Field crops research, 2014, 162: 60-69.
- [12] MOHANTY S, NAYAK A K, SWAIN C K, et al. Impact of integrated nutrient management options on GHG emission, N loss and N use efficiency of low land rice [J/OL]. Soil and tillage research, 2020, 200: 104616 [2024-09-20]. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104616>.
- [13] 陈松文, 刘天奇, 曹凑贵, 等. 水稻生产碳中和现状及低碳稻作技术策略[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(3): 3-12. CHEN S W, LIU T Q, CAO C G, et al. Situation of carbon neutrality in rice production and techniques for low-carbon rice farming [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(3): 3-12 (in Chinese with English abstract).
- [14] XIA L L, TI C P, LI B L, et al. Greenhouse gas emissions and reactive nitrogen releases during the life-cycles of staple food production in China and their mitigation potential [J]. Science of the total environment, 2016, 556: 116-125.
- [15] 禹盛苗, 朱练峰, 欧阳由男, 等. 稻鸭种养模式对稻田土壤理化性状、肥力因素及水稻产量的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 151-156. YU S M, ZHU L F, OUYANG Y N, et al. Influence of rice-duck farming system on soil physical properties, fertility factors and yield in paddy fields [J]. Chinese journal of soil science, 2014, 45(1): 151-156 (in Chinese with English abstract).
- [16] 石世杰, 李纯杰, 曹凑贵, 等. 稻虾共作模式下不同播期对水稻产量和品质的影响[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(2): 25-32. SHI S J, LI C J, CAO C G, et al. Effects of different sowing date on yield and quality of high quality rice in rice-crayfish ecosystem [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(2): 25-32 (in Chinese with English abstract).
- [17] 车阳, 程爽, 田晋钰, 等. 不同稻田综合种养模式下水稻产量形成特点及其稻米品质 and 经济效益差异[J]. 作物学报, 2021, 47(10): 1953-1965. CHE Y, CHENG S, TIAN J Y, et al. Characteristics and differences of rice yield, quality, and economic benefits under different modes of comprehensive planting-breeding in paddy fields [J]. Acta agronomica sinica, 2021, 47(10): 1953-1965 (in Chinese with English abstract).
- [18] 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[J]. 应用生态学报, 2005, 16(7): 1252-1256. YU S M, OUYANG Y N, ZHANG Q Y, et al. Effects of rice-duck farming system on *Oryza sativa* growth and its yield [J]. Chinese journal of applied ecology, 2005, 16(7): 1252-1256 (in Chinese with English abstract).
- [19] LI C F, CAO C G, WANG J P, et al. Nitrogen losses from integrated rice-duck and rice-fish ecosystems in Southern China [J]. Plant and soil, 2008, 307(1): 207-217.
- [20] XU X Y, ZHANG M M, PENG C L, et al. Effect of rice-crayfish co-culture on greenhouse gases emission in straw-puddled paddy fields [J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2017, 25(11): 1591-1603.
- [21] LAN T, LI M X, HAN Y, et al. How are annual CH₄, N₂O, and NO emissions from rice-wheat system affected by nitrogen fertilizer rate and type? [J/OL]. Applied soil ecology, 2020, 150: 103469 [2024-09-20]. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103469>.
- [22] 于海洋, 宋开付, 黄琼, 等. 水稻产量、稻田CH₄和N₂O排放对长期大气CO₂浓度升高的响应[J]. 环境科学, 2021, 42(10): 5021-5029. YU H Y, SONG K F, HUANG Q, et al. Response of yield, CH₄, and N₂O emissions from paddy fields to long-term elevated CO₂ concentrations [J]. Environmental science, 2021, 42(10): 5021-5029 (in Chinese with English abstract).
- [23] 戴然欣, 赵璐峰, 唐建军, 等. 稻渔系统碳固持与甲烷排放特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(4): 616-629. DAI R X, ZHAO L F, TANG J J, et al. Characteristics of carbon sequestration and methane emission in rice-fish system [J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2022, 30(4): 616-629 (in Chinese with English abstract).
- [24] 梁玉刚, 张文斗, 谭长龙, 等. 稻田养鸭对直播水稻根系生长性状的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(6): 154-160. LIANG Y G, ZHANG W D, TAN C L, et al. Effect of duck-raising in paddy fields on the crop root growth character [J]. Acta agriculturae boreali-sinica, 2017, 32(6): 154-160 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- [25] 汪金平,曹凑贵,李成芳,等.稻鸭共育稻田水体藻类动态变化[J].生态学报,2009,29(8):4353-4360.WANG J P, CAO C G, LI C F, et al. Elgal change in paddy water under rice-duck complex ecosystem[J]. Acta ecologica sinica, 2009, 29(8):4353-4360 (in Chinese with English abstract).
- [26] 曹凑贵,汪金平,金晖,等.稻鸭共育对稻田水体藻类群落的影响[J].水生生物学报,2007,31(1):146-148.CAO C G, WANG J P, JIN H, et al. Effect of rice-duck farming on algal community in paddy field[J]. Acta hydrobiologica sinica, 2007, 31(1):146-148(in Chinese with English abstract).
- [27] 李成芳,曹凑贵,汪金平,等.稻鸭稻鱼共作生态系统N素平衡的研究[J].农业环境科学学报,2008,27(4):1326-1334. LI C F, CAO C G, WANG J P, et al. Studies on nitrogen cycling in integrated rice- duck, rice-fish ecosystems[J]. Journal of agro-environment science, 2008, 27(4):1326-1334(in Chinese with English abstract).
- [28] 沈晓昆.稻鸭共作:无公害有机稻米生产新技术[M].北京:中国农业科学技术出版社,2003.SHEN X K. Rice and duck work; a new technology of pollution-free organic rice production[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2003(in Chinese).
- [29] 程振博,张洪宇,金璟.我国农业碳排放基本现状及影响因素研究[J].云南农业大学学报(社会科学),2024,18(4):149-155.CHENG Z B, ZHANG H Y, JIN J. Study on the basic situation and influencing factors of agricultural carbon emissions in China[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (social science), 2024, 18(4):149-155(in Chinese with English abstract).
- [30] 刘小燕,黄璜,杨治平,等.稻鸭鱼共栖生态系统CH₄排放规律研究[J].生态环境,2006,15(2):265-269. LIU X Y, HUANG H, YANG Z P, et al. Methane emission from rice-duck-fish complex ecosystem[J]. Ecology and environment, 2006, 15(2):265-269 (in Chinese with English abstract).

Effects of farming models of rice-duck-crayfish on carbon emissions and carbon sequestration in rice paddy ecosystems

LIU Yintao¹, WANG Xiaodong¹, CAO Cougui², WANG Jinping^{1,2}, GU Zemao^{2,3}, LIU Juan¹, JIANG Yang^{1,2}

1. College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Shuangshui Shuanglü Institute, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

3. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract The characteristics of carbon emission and carbon sequestration under different farming models of rice-duck-crayfish were compared with those under the traditional farming model of single rice cropping and rice-crayfish farming. The rice variety Huamoxiang 5, the crayfish (*Procambarus clarkii*), and duck variety Wuqin No.10 were used to conduct a field experiment at the Shuangshui Shuanglü Institute Base of Huazhong Agricultural University in Jingzhou, Hubei Province. The effects of different farming models on the methane (CH₄) emission, nitrous oxide (N₂O) emission, global warming potential (GWP), greenhouse gas emission intensity (GHGI), and carbon sequestration potential in paddy fields were studied. The results showed that the CH₄ emissions, GWP, and GHGI under the farming model of rice-duck-crayfish reduced by 28.1% to 32.1%, 27.0% to 30.7%, 23.0% to 26.7%, while the carbon sequestration increased by 2 089 to 2 569 kg/hm² compared to that under the traditional model of single rice cropping. The CH₄ emissions, GWP, and GHGI under the farming model of rice-duck-crayfish reduced by 18.6% to 23.1%, 17.9% to 22.2%, and 18.7% to 22.0%, while the carbon sequestration increased by 616 to 1 096 kg/hm² compared to that under the rice-crayfish farming model. It is indicated that the farming model of rice-duck-crayfish can reduce carbon emissions and increase the level of carbon neutrality in rice paddy fields, with the farming model of rice-duck-crayfish in large field blocks having the best effects on the reduction of emissions and the sequestration of carbon.

Keywords ecological farming of rice-duck-crayfish; integrated farming in paddy field; carbon emission; carbon sequestration; CH₄ emissions; N₂O emissions

(责任编辑:张志钰)