

doi:10.3969/j.issn.1001-4616.2025.05.008

氮肥减施与养殖密度协同调控对稻虾共作模式 水稻生长及土壤生态的影响

翁艺华¹,朱熙晴¹,童秋语¹,熊媛媛¹,丁静¹,
张杨¹,寇祥明²,张家宏²,戴传超¹

(1.南京师范大学生命科学学院,江苏省微生物资源产业化工程技术研究中心,
江苏省微生物与功能基因组学重点实验室,江苏南京 210023)
(2.江苏里下河地区农业科学研究所,江苏扬州 225007)

[摘要] “稻虾共作”,即水稻与克氏原螯虾(小龙虾)共作,已成为我国稻田综合种养的第一大模式,然而,该模式目前的推广面积仅占预估适宜种养总面积的 37.11%。为了稻虾共作模式的可持续发展,本研究旨在通过调控施氮量和养殖密度“两步法”提出最优的稻田土壤管理方案。结果表明,长期稻虾共作的土壤在一定程度上进行氮肥减施处理不仅不会降低水稻产量,反而有利于水稻生长,当减施氮肥 40%时,产量显著增加 9.47%。随着施氮量增加,水稻生物量和产量均呈现“先升高后降低”的趋势,产量上,常规养殖显著高于高密度养殖。田间验证试验结果表明,氮肥减施 40%条件下,搭配适宜养殖密度(即虾苗投放量 15 kg/亩)水稻增产 35.94%,同时提高了稻田土壤固氮菌和总细菌,减少土壤真菌,优化稻田土壤微生物生态。因此,本研究提出的氮肥减施搭配适宜养殖密度的种养方案,不仅为保障我国水稻粮食食品安全提供参考依据,更为稻虾共作模式的节能增效提供了理论和技术支持,对于我国稻田绿色种养的可持续发展具有重要意义。

[关键词] 稻虾共作模式,氮肥减施,养殖密度,水稻产量,土壤生态

[中图分类号]S143.1 [文献标志码]A [文章编号]1001-4616(2025)05-0066-09

Synergistic Effects of Nitrogen Fertilizer Reduction and Stocking Density Regulation on Rice Growth and Soil Ecology in Rice-Crayfish Cocropping System

Weng Yihua¹, Zhu Xiqing¹, Tong Qiuyu¹, Xiong Yuanyuan¹, Ding Jing¹,
Zhang Yang¹, Kou Xiangming², Zhang Jiahong², Dai Chuanchao¹

(1.School of Life Sciences, Nanjing Normal University, Jiangsu Key Laboratory for Microbes and Functional Genomics,
Jiangsu Engineering and Technology Research Center for Industrialization of Microbial Resources, Nanjing 210023, China)
(2.Jiangsu Lixiahe District Institute of Agricultural Sciences, Yangzhou 225007, China)

Abstract: Rice-crayfish cocropping, integrating rice cultivation with *Procambarus clarkii* (crayfish), is the largest integrated rice field farming model in China. However, its current adoption area is only 37.11% of the estimated suitable zone. This study proposes an optimal soil management strategy for rice fields using a "two-step method" involving nitrogen application regulation and stocking density adjustment. Long-term rice-crayfish cocropping benefits rice growth without yield reduction under 40% nitrogen fertilizer reduction, achieving a 9.47% yield increase. Rice growth shows a "first increase then decrease" trend with increasing nitrogen application rates. Conventional stocking density outperforms high-density practices in terms of yield. Field validation experiments confirm that combining 40% nitrogen reduction with moderate stocking density (15 kg crayfish seedlings per mu) increases rice yield by 35.94%, while enhancing the number of azotobacter and bacteria in the soil, inhibiting the growth of fungi, and optimizing soil microbial ecology. Therefore, this

收稿日期:2025-04-21.

基金项目:国家自然科学基金青年项目(32001210)、江苏省高校自然科学基金面上项目(22KJB180003)、江苏省农业农村污染防治技术与装备工程研究中心开放课题项目(GCZXBY2402)、国家级大学生创新创业训练项目(202410319086Z).

通讯作者:张杨,博士,副教授,研究方向:土壤微生物生态. E-mail:yangzhang@nnu.edu.cn

integrated approach of nitrogen reduction and density optimization provides a scientific basis for safeguarding China's rice food security and advances theoretical and technical frameworks for energy-efficient, high-yield rice-crayfish cocropping. These findings are significant for promoting sustainable agricultural practices in Chinese rice fields.

Key words: rice-crayfish cocropping, nitrogen fertilizer reduction, stocking density, rice yield, soil ecology

“稻虾共作”,即水稻与克氏原螯虾(小龙虾)共作,是一种稻田种养结合的生态农业模式,即在水稻种植期间,小龙虾与水稻在稻田中互利共生,有效提高稻田资源利用率,增加单位面积的经济效益。相比于稻鱼、稻蟹等共作模式,小龙虾繁殖能力较强,养殖技术较易,管理成本较低,广受农民追捧。自2014年以来,稻虾共作面积以年平均14%的增长速率在全国范围内迅速发展。截至2023年,其种养面积达2530万亩,占全国稻渔综合种养的56.37%,稳居第一^[1]。据统计,全国现有水稻耕作田总面积为45450万亩,按适宜稻虾综合种养的稻田面积占比为15%计算^[2],目前全国适合稻虾综合种养的水稻面积高达6817.5万亩。可见,该模式不再是地域性小规模增产增收的方式,其在全国范围内具有不容忽视的巨大发展潜力。相比于水稻单作,稻虾共作模式由于养殖小龙虾采用的田面水层管控、施肥、投饵等一系列措施对水稻生长的影响不容忽视。然而,关注该模式下水稻健康以及稻田土壤生态的研究还远远不够。

氮素含量是影响水稻生长的主要因素之一,稻虾共作模式往往因不科学施肥、饵料残余、小龙虾排泄物、持续淹水使得系统养分过剩,利用效率低,大量的氮素累积不仅增加土壤酸化、水体富营养化和温室气体排放等生态环境风险^[3-4],而且易导致水稻开花延迟、贪青晚熟,产量下降^[5]。此外,小龙虾具有比水稻更高的经济效益,在农户对经济利润的追求下,田面小龙虾普遍存在过密度养殖现象,而高密度水产养殖,导致水体溶氧量下降,水稻有效分蘖数和产量降低^[6]。我国以占世界7%的耕地,养活了占世界22%的人口,这主要得益于水稻的高产。但是,随着稻田综合种养模式的推广和发展,“与粮争地”导致的潜在粮食食品安全问题尚未引起广泛关注。农户为追求高产盲目增施化肥农药,扩大虾沟面积^[2,7]。稻田土壤理化性质和生态环境恶化,严重制约稻田的土地生产潜力以及稻田综合种养产业的健康、快速发展。如何制定科学的种养规范,是全面实施稻虾共作乃至稻田综合种养生态模式绿色发展亟待解决的重要问题。

此前,在稻虾共作研究领域,多聚焦于经济效益与养殖技术推广,仅有的几项关于环境生态效应的研究也尚未形成一致的定论^[8-10],更是缺乏该模式下如何精准调控施肥量与养殖密度两个制约水稻生长的关键因素的可行性研究。本研究基于对稻虾共作模式实际生产中多年调研经验,针对现阶段普遍存在的不科学种养管理现象,采用盆栽模拟和田间验证相结合方式,从水稻生长量到土壤微生物多维度评估,探究氮肥减施搭配合理养殖密度对水稻生长环境的优化。为保障我国稻米生产安全,稻虾共作模式的可持续发展,以及稻田综合种养系统的节能增效提供理论依据。

1 材料与方方法

1.1 试验材料

供试水稻(*Oryza sativa* L.)品种为徽两优007,购于江苏省农科院,水稻育苗基质购自淮安柴米河农业科技股份有限公司。供试克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)苗购自柯云水产有限责任公司龙庆湖养殖基地,约4g/尾。虾饵料购自通威股份公司,主要原料为鱼粉,总磷含量 $\geq 1\%$,粗蛋白含量 $\geq 39\%$,粗脂肪含量 $\geq 4\%$ 。试验所用肥料为尿素、过磷酸钙和硫酸钾。

1.2 盆栽和田间试验布置

1.2.1 探究长期稻虾共作土壤氮肥减施潜力的盆栽试验

盆栽试验于2022年6月—10月在南京师范大学植物园开展,试验土壤取自江苏盱眙稻虾共作示范基地大田,取样时已连续种养7年。盆栽箱体大小为35×30×25cm,每盆装27kg干土,水稻育苗参考Zhang等^[11]的方法,从育苗盆选取长势一致的水稻秧苗进行移栽,每盆6株。采用随机区组设计,试验设置5个处理:(1)常规施氮(N_{100});(2)氮肥减施30%(N_{70});(3)氮肥减施40%(N_{60});(4)氮肥减施50%(N_{50});(5)不施氮肥(N_0),每个处理6盆重复。依据田间施肥计划,常规氮肥处理施用尿素34.78kg/亩,其他养分按每公顷土水稻常规需肥量施加,过磷酸钙66.67kg/亩,硫酸钾37.04kg/亩。

1.2.2 长期稻虾共作土壤氮肥减施与养殖密度双因素调控盆栽试验

盆栽试验于2023年6月—10月在南京师范大学植物园开展,试验装置为课题组前期建立的“稻虾共作”

模式模拟装置体系,如图 1 所示. 盆栽箱体大小为 50×45×45 cm,每盆装 46 kg 干土. 试验土壤和水稻育苗、移栽方法同(1.2.1). 采用随机区组设计,试验设置 12 个处理:(1) 常规施氮+高密度(HN₁₀₀);(2) 常规施氮+常规密度(CN₁₀₀);(3) 氮肥减施 20%+高密度(HN₈₀);(4) 氮肥减施 20%+常规密度(CN₈₀);(5) 氮肥减施 30%+高密度(HN₇₀);(6) 氮肥减施 30%+常规密度(CN₇₀);(7) 氮肥减施 40%+高密度(HN₆₀);(8) 氮肥减施 40%+常规密度(CN₆₀);(9) 氮肥减施 50%+高密度(HN₅₀);(10) 氮肥减施 50%+常规密度(CN₅₀);(11) 不施氮肥+高密度(HN₀);(12) 不施氮肥+常规密度(CN₀),每个处理设置 6 盆重复. 依据田间管理计划,高密度投放虾苗 5 尾/盆,常规密度投放虾苗 2 尾/盆. 虾饵料每日投喂一次,高密度处理每次投喂 0.06 kg/盆;常规密度处理每次投喂 0.024 kg/盆. 依据田间施肥计划,常规氮肥处理施用尿素 34.78 kg/亩,其他养分按每公顷土水稻常规需肥量施加,过磷酸钙 66.67 kg/亩,硫酸钾 37.04 kg/亩. 待水稻分蘖期后投放虾苗,日常管理水位高于土层约 10~15 cm.

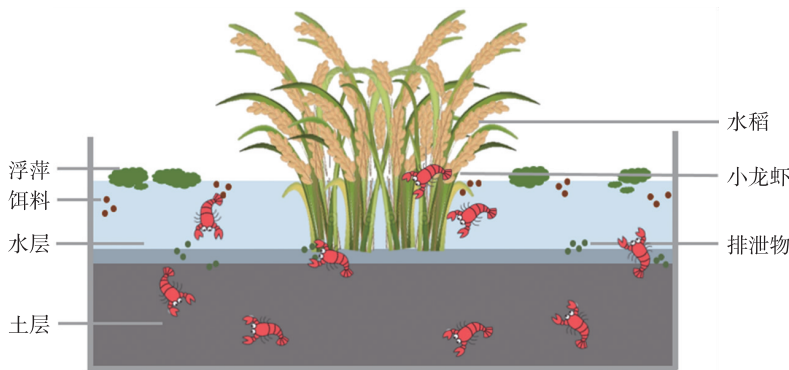


图 1 “稻虾共作”模式模拟盆栽装置图

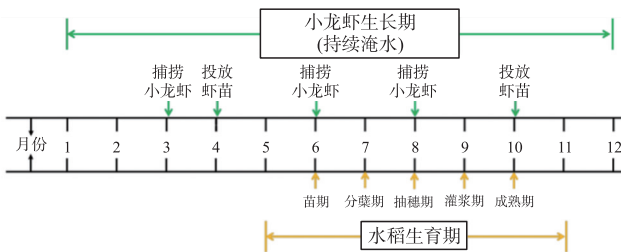
Fig. 1 Schematic diagram of the simulated pot experiment for RC

1.2.3 长期稻虾共作土壤氮肥减施与养殖密度搭配调控田间验证试验

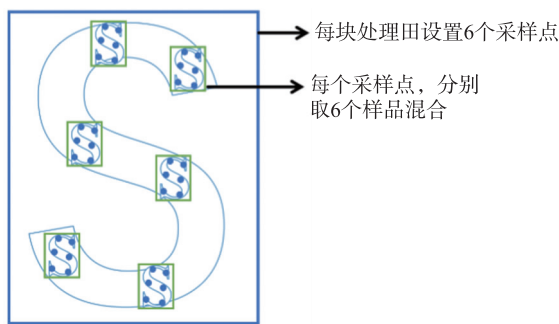
田间试验于 2023 年 6 月—10 月在江苏盱眙稻虾共作示范基地开展,地处北亚热带与暖温带过渡区域,属季风性湿润气候,年平均气温 15 ℃,年降水量 972 mm. 样地最初由水稻单作地块改造,一部分继续用来水稻单作,一部分进行稻虾种养连作,至采样时稻虾共作地已连续种养 7 年,土壤本底为黏土,基地管理作业和采样方式如图 2 所示.



(a) 田间试验基地卫星图和试验布局



(b) 稻虾共作种养管理作业



(c) 田间样本取样方法

图 2 稻虾共作和水稻单作田间样本采集

Fig. 2 Field sample collection for RC and RM

氮肥减施验证试验设置 4 个处理:(1)水稻单作,常规施肥(RM);(2)水稻单作,氮肥减施 40%(NRM);(3)稻虾共作,常规施肥(RC);(4)稻虾共作,氮肥减施 40%(NRC). 其余管理按照当地稻虾共作管理模式进行,即采用标准环沟模式养殖小龙虾,虾苗投放量 30 kg/亩,饵料投放量共 18 kg/亩,常规施肥处理中施加复合基肥 35 kg/亩,分蘖期追施尿素 20 kg/亩;水稻单作管理模式与稻虾共作施用等量肥料,不养殖小龙虾.

最适养殖密度探究试验分别设置 3 个梯度处理:(1)低密度(LRC),虾苗投放量 15 kg/亩,饵料投放量共 9 kg/亩;(2)中密度(MRC),虾苗投放量 30 kg/亩,饵料投放量共 18 kg/亩;(3)高密度(HRC),虾苗投放量 45 kg/亩,饵料投放量共 27 kg/亩. 所有处理均在常规施肥基础上减施 40%氮肥.

1.3 样品采集及植株生长指标测定

盆栽试验中,水稻植株成熟后,在根系周围约 5 cm 处,深挖约 10 cm,将植株地上部、地下部和连带土壤全部取回至实验室. 田间样品则采用蛇形取样法采集混合样品(即“S”形)(图 2c),每个处理收集 6 株生长状况良好、具有代表性的水稻植株. 在选定的水稻植株周围圈定 10×10 cm 大小的方格,挖至地下深约 10~15 cm 处,同样将植株地上部和地下部及周围土壤全部取出,装入取样袋并标记,带回实验室. 抖落植株粘土,简单处理后,测量水稻植株的株高、分蘖数、穗数、穗长、地上部鲜重、地上部干重、丰谷数、秕谷数、千粒重等农艺及产量性状指标. 其中,丰谷为生长良好、籽粒饱满的稻谷,秕谷为生长条件不佳、缺乏养分或发育不全导致空壳或瘪瘦的稻谷. 以 n 代表用于统计丰谷总数所使用的植株数量,利用所测 n 株植株丰谷总数和千粒重计算水稻产量,计算公式^[12]如下:

$$\text{产量}(\text{kg}/\text{hm}^2) = \frac{80\,000}{n} \times \frac{n \text{ 株植株丰谷总数}}{1000} \times \frac{\text{千粒重}}{1000}$$

1.4 土壤微生物计数

将取回的新鲜土壤样品去除根系、石子及其他杂物后,过 10 目筛. 分别称取不同处理下的土壤样品 10 g,溶于盛有 90 mL 无菌水的三角瓶内,摇床(37 °C, 180 r/min)振荡培养 30 min,制成土壤悬液,涂布后倒置于 37 °C 恒温培养箱培养. 固氮菌培养使用阿须贝氏固体培养基^[13],取 10^{-2} 、 10^{-3} 、 10^{-4} 浓度土壤悬液涂布于平板,培养 1~3 d 后取出计数;细菌培养使用 10%胰酪大豆胨固体培养基^[14],取 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} 浓度土壤悬液涂布于平板,培养 1~2 d 后取出计数;真菌培养使用孟加拉红固体培养基^[15],取 10^{-1} 、 10^{-2} 、 10^{-3} 浓度土壤悬液涂布于平板,培养 3~4 d 后取出计数.

1.5 数据处理与分析

使用曼惠特尼 U 检验(Mann-Whitney U test)进行两个样本间的显著性差异比较;使用克鲁斯卡尔—沃里斯检验(Kruskal-Wallis H test)进行两个以上样本间的显著性差异比较,并进行多重比较. $P < 0.05$ 表示差异显著, $P < 0.01$ 表示极显著相关. 使用 R 4.4.2 中的 ggplot 包进行数据可视化处理.

2 结果与分析

2.1 盆栽试验探究长期稻虾共作土壤氮肥减施潜力

结果表明,除不施加氮肥处理外,减施 50% 处理分别在株高、穗长、丰谷数和产量上显著低于常规施肥,而减施 40% 和减施 30% 处理与常规施氮在生物量和产量上没有显著差异. 此外,根据株高、分蘖数、有效穗数以及地上部干重指标上来看,减施 50% 和 40% 处理的水稻植株略呈“矮壮”形态,尽管相比于高氮肥(减施 30% 和常规氮肥)产量较低. 但从水稻植株生物量长势来看,氮肥减施,尤其是减施 40% 的处理,更有益于稻虾共作土壤中水稻秸秆生长(表 1).

在此基础上,在下一季盆栽试验中进一步探究了减施氮肥条件下,不同养殖密度对水稻生长的影响. 如图 3 所示,结果表明,无论养殖密度高低,随着施氮量的增加,水稻植株的株高、地上部干重和有效穗数等生物量指标都呈现“先升高后降低”的趋势,其中减施 40% 和 30% 处理最佳. 对比仅栽种水稻(表 1),养虾和投饵对高氮处理的水稻生长有一定的抑制作用,但在产量指标上没有显著差异. 此外,养殖密度对不同减施梯度的水稻生长没有显著影响,但是在产量上,在各减施梯度处理中高密度养殖均显著低于常规密度. 因此,综合水稻生长量和产量结果表明,稻虾共作模式最佳的水稻生长条件是氮肥减施 40% 或 30%,且养殖密度不宜过高(图 3).

表 1 稻虾共作土壤梯度减施氮肥对水稻生长的影响

Table 1 Impact of nitrogen fertilizer gradient reduction in RC soil on rice growth

处理	株高/cm	分蘖数/个	穗长/cm	地上部干重/g	有效穗数/个	每株丰谷数/个	千粒重/g	产量/kg·hm ⁻²
N ₀	83.96±0.57 ^c	4.50±0.96 ^b	11.83±0.64 ^c	23.30±2.16 ^c	3.50±0.29 ^b	151.50±21.93 ^c	23.67±0.58 ^b	192.17±4.70 ^c
N ₅₀	92.98±1.70 ^{bc}	13.38±1.07 ^a	14.74±0.17 ^{bc}	92.14±9.86 ^{ab}	12.75±1.25 ^a	779.25±69.91 ^{bc}	25.09±0.16 ^{ab}	1 363.21±8.70 ^{bc}
N ₆₀	97.62±0.86 ^{ab}	14.25±1.03 ^a	16.07±0.36 ^{ab}	99.19±10.34 ^a	13.25±1.38 ^a	1 065.25±86.00 ^{ab}	25.54±0.20 ^a	2 176.52±17.16 ^{ab}
N ₇₀	100.17±1.31 ^{ab}	11.00±0.71 ^{ab}	15.75±0.62 ^{ab}	67.20±5.26 ^{bc}	9.75±0.75 ^{ab}	1 024.00±100.07 ^{ab}	25.21±0.04 ^{ab}	2 064.93±3.32 ^{abc}
N ₁₀₀	101.63±1.19 ^a	12.00±0.71 ^a	16.39±0.32 ^a	72.41±6.51 ^{abc}	12.00±1.08 ^a	1271.75±159.48 ^a	26.37±0.26 ^a	2 682.54±25.99 ^a

注: N₀ 为不施氮肥; N₅₀ 为氮肥减施 50%; N₆₀ 为氮肥减施 40%; N₇₀ 为氮肥减施 30%; N₁₀₀ 为常规施肥. 不同小写字母表示同一时期不同处理组之间存在显著差异(P<0.05), 其中 a>b>c.

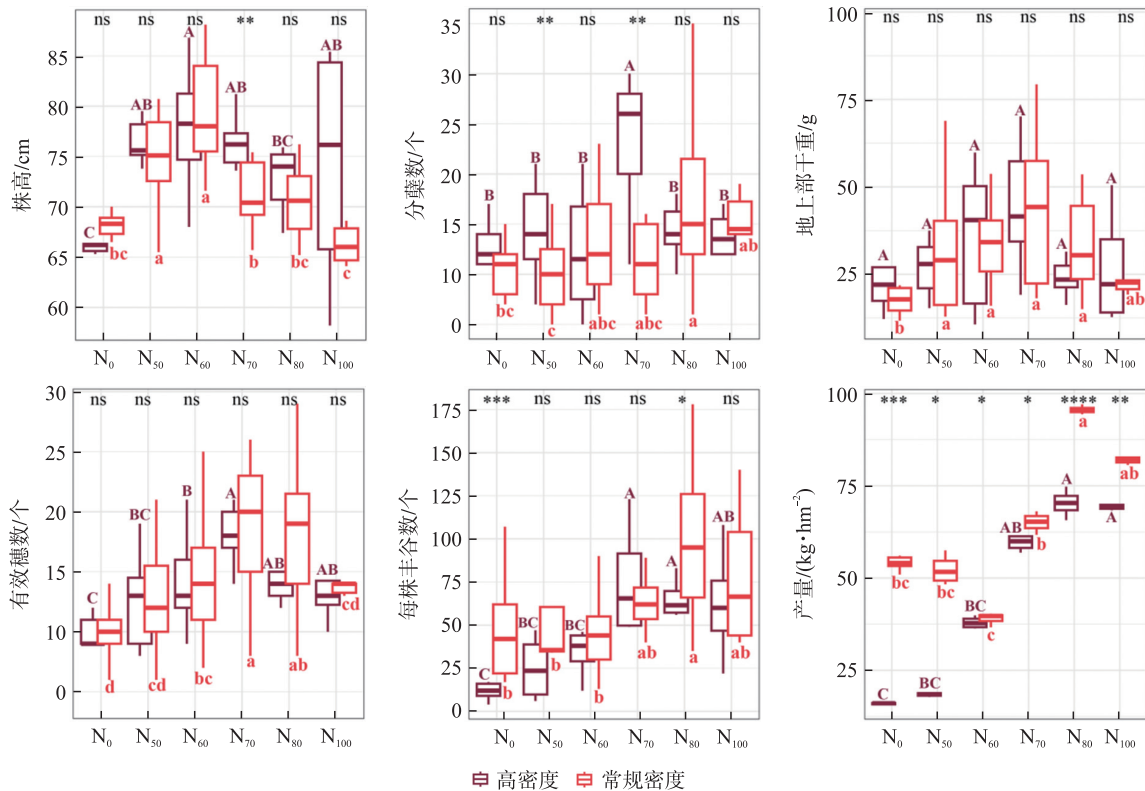


图 3 稻虾共作模式下氮肥减施与养殖密度对水稻生长的协同影响

Fig. 3 Synergistic effects of nitrogen fertilizer reduction and stocking density on rice growth in RC

注: N₀ 为不施氮肥; N₅₀ 为氮肥减施 50%; N₆₀ 为氮肥减施 40%; N₇₀ 为氮肥减施 30%; N₈₀ 为氮肥减施 20%; N₁₀₀ 为常规施肥. * P<0.05, 表示同一时期下不同处理组之间差异显著; ** P<0.01, 表示同一时期下不同处理组之间差异极显著. 不同字母表示同一时期不同处理组之间存在显著差异(P<0.05), 大写字母和小写字母分别表示高密度和常规密度处理组差异显著性, 其中 A(a)>B(b)>C(c).

2.2 田间验证稻虾共作模式最适种养条件

田间结果表明, 水稻单作模式下, 相比于常规氮肥处理, 氮肥减施 40% 的处理显著降低了水稻的株高、地上部鲜干重等各项生长指标, 产量显著降低了 38.54%. 然而, 在稻虾共作模式下, 氮肥减施 40% 处理在水稻生长和产量等各项指标上均没有显著差异, 且显著增产 9.47%. 此外, 比较两种稻作模式, 不难发现, 稻虾共作模式无论是否减施氮肥, 其水稻株高、地上部鲜重等生长指标与水稻单作常规施肥模式没有显著差异. 而在产量上, 氮肥减施 40% 处理显著低于水稻单作的常规施肥模式. 因此, 可以得出, 相比于常规施肥水稻单作, 稻虾共作模式水稻产量下降, 且在稻虾共作模式中氮肥减施 40% 对水稻生长没有显著影响, 但是常规施加氮肥可能反而导致稻虾共作水稻减产(图 4).

随后, 基于氮肥减施 40% 的条件下, 进一步验证养虾与养殖密度对水稻生长和产量的影响. 结果表明, 除千粒重指标外, 低密度养殖处理的水稻分蘖数、地上部鲜干重以及产量等指标均显著高于中、高密度, 尤其在产量上, 低密度比高密度养殖显著高 35.94%(表 2).

表 2 不同小龙虾养殖密度水稻植株农艺及产量性状对比

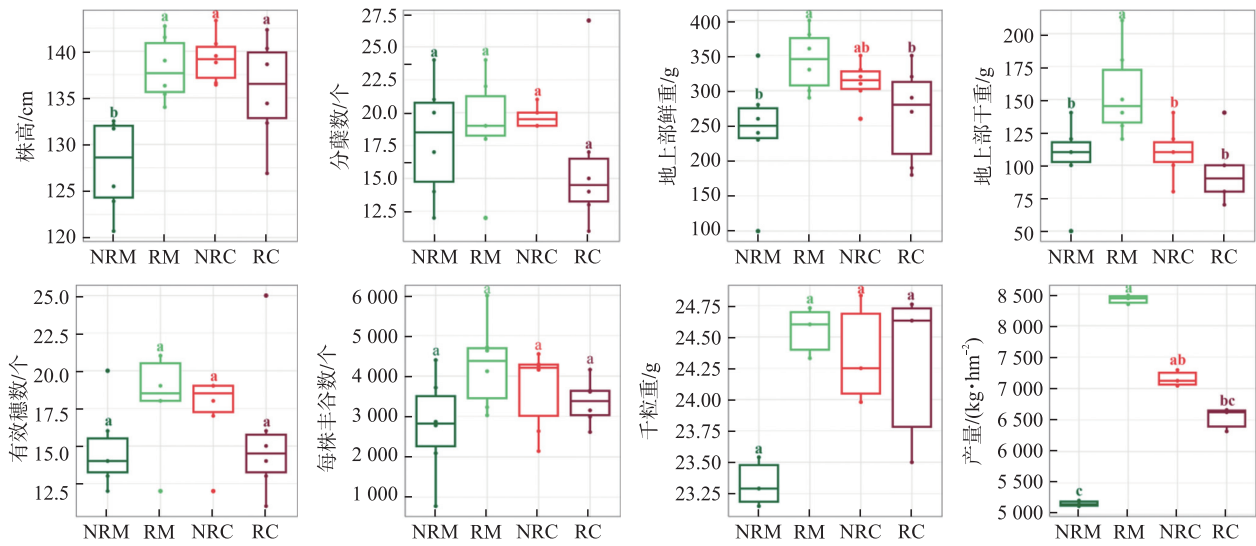


图4 减施氮肥与常规施肥处理水稻植株农艺及产量性状对比

Fig. 4 Comparison of agronomy and yield traits of rice plants under reduced nitrogen fertilizer and conventional fertilization treatments

注: NRM 为水稻单作, 氮肥减施 40%; RM 为水稻单作, 常规施肥; NRC 为稻虾共作, 氮肥减施 40%; RC 为稻虾共作, 常规施肥。* $P < 0.05$, 表示同一时期下不同处理组之间差异显著; ** $P < 0.01$, 表示同一时期下不同处理组之间差异极显著。不同小写字母表示同一时期不同处理组之间存在显著差异 ($P < 0.05$), 其中 $a > b > c$ 。

Table 2 Comparison of agronomy and yield traits of rice plants under different crayfish stocking densities

处理	株高/cm	分蘖数/个	地上部鲜重/g	地上部干重/g	有效穗数/个	每株丰谷数/个	千粒重/g	产量/(kg·hm ⁻²)
LRC	140.07±0.57 ^a	22.83±0.87 ^a	546.67±25.39 ^a	195.00±11.18 ^a	20.83±1.05 ^a	4360.00±228.32 ^a	23.98±0.27 ^a	8365.39±95.51 ^a
MRC	139.23±1.07 ^a	19.67±0.33 ^b	311.67±12.49 ^b	110.00±8.16 ^b	17.33±1.12 ^a	3672.33±413.84 ^{ab}	24.35±0.25 ^a	7154.68±73.67 ^{ab}
HRC	138.52±1.55 ^a	18.17±0.91 ^b	311.67±11.38 ^b	126.67±11.16 ^b	17.83±1.38 ^a	3121.33±199.48 ^b	24.64±0.11 ^a	6153.60±26.67 ^b

注: LRC 为小龙虾低养殖密度; MRC 为小龙虾中养殖密度; HRC 为小龙虾高养殖密度。不同小写字母表示同一时期不同处理组之间存在显著差异 ($P < 0.05$), 其中 $a > b$ 。

2.3 探究稻虾共作模式最适种养条件对土壤微生物的影响

基于可培养方法, 分别对盆栽试验和田间试验土壤样品进行了固氮菌、总细菌及总真菌计数, 如图 5 所示, 结果表明, 在只种稻不养虾的盆栽季, 与常规施肥相比, 稻虾共作土壤减施氮肥对土壤固氮菌没有显著影响, 但显著降低了土壤总细菌和总真菌丰度, 真菌丰度在不同减施梯度中没有显著差异 (图 5a)。在种稻又养虾的盆栽季, 各减施氮肥处理中常规养虾均比高密度养虾显著增加了土壤固氮菌丰度, 在总真菌和总细菌上没有一致的趋势, 在氮肥减施 40% 的处理中, 高密度养殖增加了总细菌和总真菌量, 而在氮肥减施 30% 和 20% 的处理中, 高密度养殖降低了总细菌量, 增加了总真菌量, 在常规施肥处理中, 无论是固氮菌、细菌和真菌, 高密度养殖处理均显著高于常规养殖密度 (图 5b)。田间土壤样品计数结果表明, 在氮肥减施 40% 条件下, 稻虾共作模式低密度养殖处理中固氮菌、总细菌和总真菌丰度显著增加, 而在中、高密度上差异不显著 (图 5c)。相比于高密度养殖, 较低密度可增加土壤固氮菌丰度, 这与种稻又养虾的盆栽结果一致。

3 讨论

在稻虾共作模式中, 小龙虾脱壳、残饵和排泄物的分解为水稻生长提供了丰富的氮素来源^[16], 且相当一部分的氮营养不会被当季水稻和虾吸收利用, 盈余氮量可占氮总输入量的 59% 以上^[17-18]。结果表明, 与常规施氮相比, 氮肥减施更能促进稻虾共作水稻植株的生长, 并且产量显著提升 9.47% (图 3 和图 4)。彭成林等^[19]的结果同样发现, 长期稻虾共作模式后, 不施用氮肥产量也可增加 21.2%。高施氮肥处理的水稻产量有所降低, 造成这种变化的原因是成穗率和千粒重与施氮水平成负相关^[20]。但是, 盲目不施肥也可能导致水稻减产^[2,21], 有学者提出, 随着共作年限的增加, 氮素养分投入需酌量减少, 比如, 稻虾共作 4 年

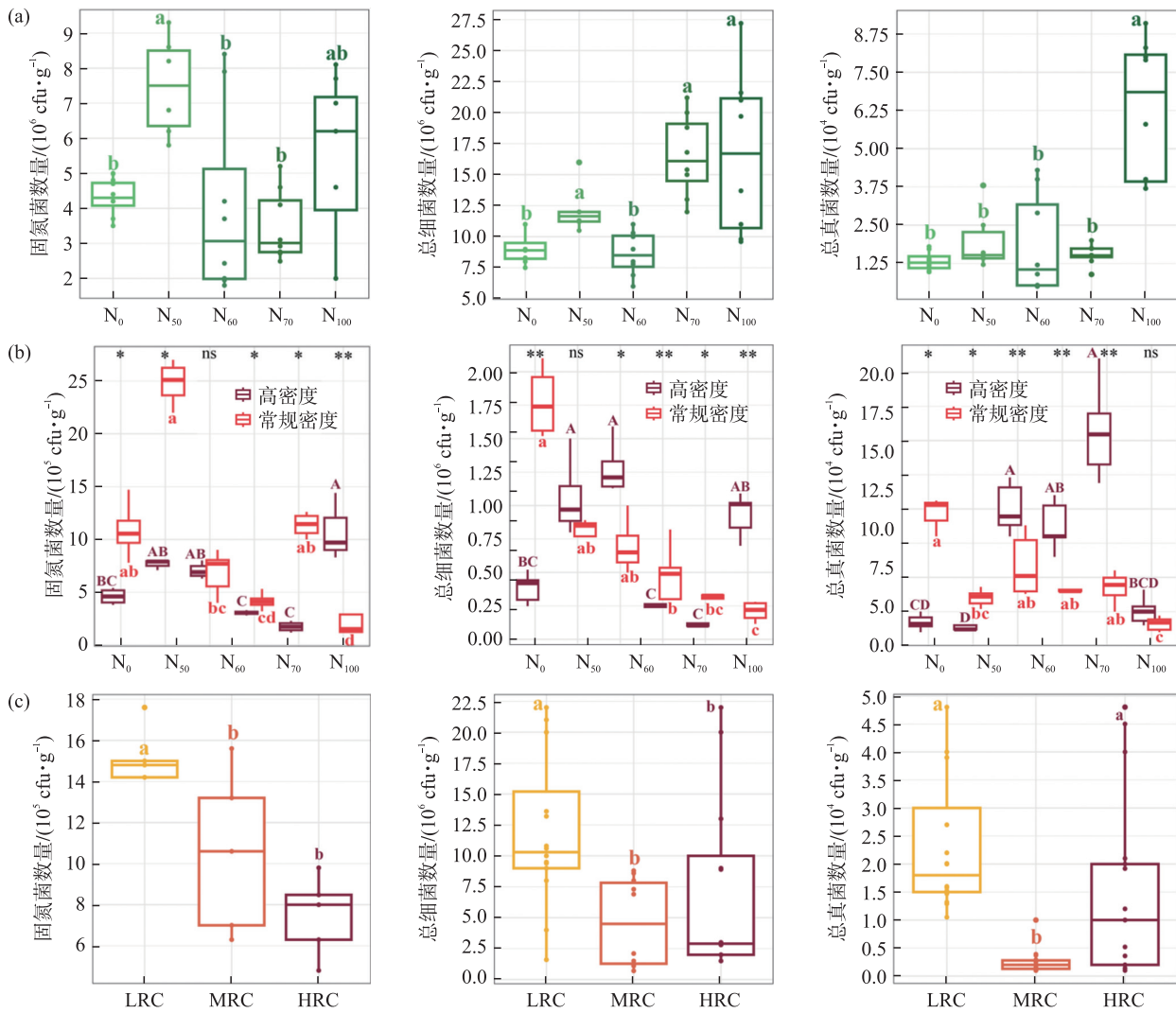


图 5 稻虾共作模式土壤微生物计数

Fig. 5 Soil microbial counts in RC

注: N_0 为不施氮肥; N_{50} 为氮肥减施 50%; N_{60} 为氮肥减施 40%; N_{70} 为氮肥减施 30%; N_{80} 为氮肥减施 20%; N_{100} 为常规施肥. LRC 为小龙虾低养殖密度; MRC 为小龙虾中养殖密度; HRC 为小龙虾高养殖密度. * $P < 0.05$, 表示同一时期下不同处理组之间差异显著; ** $P < 0.01$, 表示同一时期下不同处理组之间差异极显著. 不同字母表示同一时期不同处理组之间存在显著差异 ($P < 0.05$), 大写字母和小写字母分别表示梯度减施氮肥搭配养殖密度盆栽探究试验中高密度和常规密度处理组差异显著性, 其中 $A(a) > B(b) > C(c) > D(d)$.

的施氮量应比共作 1 年的施氮量减少 25%^[22], 本研究土壤取自种养连作 7 年的土壤, 结果得出减施 40% 效果最佳, 基本符合该建议减施比例. 研究还发现, 稻虾共作模式, 随着氮肥施氮量的增加, 水稻植株生物量和产量表现出“先升高后降低”的趋势. 与只种稻不养虾的盆栽季相比, 养虾后现象更加明显, 分别在株高、分蘖数、有效穗数以及产量上表现出随施氮量增加的“先升高后降低”的趋势, 这也与黄飞等^[21]的研究结果一致.

此外, 从两季盆栽结果发现, 无论氮减施与否, 养虾显著增加水稻的分蘖数和有效穗数(表 1 和图 3), 有研究表明, 稻田养鱼能使水稻的根系活力增强, 稻株氮养分吸收增加促进分蘖^[23-24], 然而, 结果中, 养虾没有增加水稻干物质质量和产量(图 3 和图 4), 这可能由于养虾后导致水稻生育期滞后, 开花延迟, 植株贪青晚熟, 结实率下降^[5, 25]. 根据寇祥明等^[17]的研究, 最适的养虾密度为 6 尾/ m^2 , 当虾苗密度达到 8 尾/ m^2 时, 小龙虾成活率会出现一定程度的下降. 因模拟条件限制投放数量, 本研究在盆栽试验中常规密度设置约 7 尾/ m^2 , 高密度约 9 尾/ m^2 , 研究发现两种养殖密度对水稻生长量的差异不显著, 但是在产量上, 常规密度显著高于高密度养殖, 这与田间验证结果一致, 在低密度(按克重换算约 6 尾/ m^2)处理中, 显著增加了水稻分蘖数、地上部鲜干重、丰谷数和产量, 高密度养殖导致化学需氧量和水体溶解氧降低^[26], 进而限

制水稻根部发育,可能是导致水稻减产的原因之一^[27]。

土壤微生物是评价土壤健康生态系统的重要指标之一,微生物丰度和多样性在土壤物质循环中具有重要作用,与土壤肥力密切相关^[28],相比于水稻单作,长期过度利用的稻虾共作模式的土壤微生物群落丰度和功能多样性下降^[29]。氮肥长期施用改变了参与各个氮循环过程的微生物群落组成,降低了固氮微生物的丰度^[30]。本研究也发现,与只种稻不养虾的盆栽相比,养虾季显著降低了土壤固氮菌、总细菌和总真菌丰度。固氮菌是促进土壤氮养分转化的关键微生物类群,不仅可以提高土壤氮量,还有利于植物根系激素调节,促进植物健康的生长,固氮菌与化肥配施可以使作物产量增加 20% 以上^[31]。从氮肥减施梯度上看,除不施加氮肥处理外,养虾盆栽季中常规密度的减施 50% 处理土壤固氮菌和总细菌含量最高,而不养虾盆栽季中各个减施处理的真菌数量均低于常规施肥;从养殖密度上看,常规(低)养殖密度在一定程度上增加了固氮菌和土壤细菌量,降低真菌数量。滕秋梅等^[32]的研究发现,氮肥减施处理固氮菌和细菌丰度增加,真菌下降,与本结果相似,且固氮菌和总细菌丰度与土壤速效氮养分呈正相关,而真菌呈负相关^[33]。也有研究表明,当土壤细菌和有益菌群数量增加的同时对真菌产生拮抗作用,进而减少有害菌群(如真菌)的数量,使土壤向有益微生物菌群、“健康细菌型”方向发展^[34]。因此,氮肥减施和低密度养殖对土壤微生物生态也具有积极的影响。

4 结论

本研究提出了调控减施氮肥和养殖密度两步法优化稻虾共作可持续生产的管理方式和养殖策略。首先,通过两季盆栽模拟试验证明稻虾共作土壤氮肥减施潜力,获得最优减施比例和养殖密度,再在基地大田开展验证,完成了从“发现问题——试验探究——田间验证”的研究闭环。最终得出,在实际的稻虾共作生产实践中,氮肥减施 40% 与低密度(15 kg/亩)养殖搭配的协同管理方案是确保水稻生产和产量并提高土壤微生物生态健康的最优组合,为稻虾共作模式乃至稻田综合种养模式的节能增效提供理论依据和技术支持。

[参考文献]

- [1] 于秀娟,郝向举,党子乔,等. 中国稻渔综合种养产业发展报告[J]. 中国水产,2023(8):19-26.
- [2] 曹凌贵,江洋,汪金平,等. 稻虾共作模式的“双刃性”及可持续发展策略[J]. 中国生态农业学报,2017,25(9):1245-1253.
- [3] ZHU Z L, CHEN D L. Nitrogen fertilizer use in China: Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. Nutrient cycling in agroecosystems, 2002, 63(2): 117-127.
- [4] 贺纪正,张丽梅. 氨氧化微生物生态学与氮循环研究进展[J]. 生态学报,2009,29(1):406-415.
- [5] ZHANG S, ZHANG Y, LI K, et al. Nitrogen mediates flowering time and nitrogen use efficiency via floral regulators in rice[J]. Current biology, 2021, 31(4): 671-683.
- [6] 吕东锋,王武,马旭洲,等. 稻蟹共生系统河蟹放养密度对水稻和河蟹的影响[J]. 湖北农业科学,2010,49(7):1677-1680.
- [7] 陈松文,江洋,汪金平,等. 湖北省稻虾模式发展现状与对策分析[J]. 华中农业大学学报,2020,39(2):1-7.
- [8] 郑聚锋,张平究,潘根兴,等. 长期不同施肥下水稻土甲烷氧化能力及甲烷氧化菌多样性的变化[J]. 生态学报,2008(10):4864-4872.
- [9] 宋平原. 稻虾共作模式对土壤氮素转化及水稻氮吸收的影响研究[D]. 湖北:长江大学,2024.
- [10] 董洪瑞. 长期稻虾共作对土壤质量和团聚体组成及其碳氮矿化的影响[D]. 湖北:长江大学,2024.
- [11] ZHANG Y, GAO X, SHEN Z, et al. Pre-colonization of PGPR triggers rhizosphere microbiota succession associated with crop yield enhancement[J]. Plant and soil, 2019, 439(1/2): 553-567.
- [12] 权太勇,孙立伟,宋汉财. 水稻籽粒充实程度术语与测定方法探讨[J]. 沈阳农业大学学报,1998(2):103-104.
- [13] MATTHEWS S, SUHAIMI M. Selection of suitable growth medium for free-living diazotrophs isolated from compost[J]. Journal of tropical agriculture and food science, 2010, 38(2): 211-219.
- [14] 王莹,何欢欢,卢春艳,等. 珠江河口滩涂沉积物中可培养细菌多样性及微塑料降解功能菌资源的挖掘[J]. 微生物学报,2025,65(4):1341-1357.

- [15] CHEN C Y,ZHANG M Y,NIU Y C, et al. Comparison of fungal genera isolated from cucumber plants and rhizosphere soil by using various cultural media[J]. *Journal of fungi*,2023,9(9):934.
- [16] 肖大康,龚孝雷,胡仁,等. 不同施氮量下稻虾共作模式氮循环及平衡特征[J]. *中国土壤与肥料*,2025(1):83-91.
- [17] 寇祥明,韩光明,吴雷明,等. 虾苗密度对稻虾共作模式下稻虾生长及氮磷利用的影响[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*,2020,41(2):22-27.
- [18] HOU J,WANG X,XU Q, et al. Rice-crayfish systems are not a panacea for sustaining cleaner food production[J]. *Environmental science and pollution research*,2021,28(18):22913-22926.
- [19] 彭成林,袁家富,贾平安,等. 长期稻虾共作模式对不同施氮量下直播水稻产量和氮肥利用效率的影响[J]. *河南农业科学*,2020,49(4):15-21.
- [20] 陈天祥,杨顺瑛,苏彦华. 水稻 OsAMT1;1 过表达提升氮肥减施情境下的氮素利用效率[J]. *土壤*,2023,55(6):1176-1186.
- [21] 黄飞,聂玺斌,杨朔,等. 不同施氮量下稻虾共作水稻产量与田面水水质特征[J]. *中国稻米*,2022,28(2):51-55.
- [22] 王关林,苏章锋,刘东,等. 虾稻共作土壤养分空间变异及中稻施肥技术研究[J]. *现代农业科技*,2017(2):160-162.
- [23] 李端富,周天生,吴能,等. 稻田养鱼对水稻生长发育的效应试验初报[J]. *广西农学院学报*,1990(4):27-34.
- [24] 蔡晨,李谷,朱建强,等. 稻虾轮作模式下江汉平原土壤理化性状特征研究[J]. *土壤学报*,2019,56(1):217-226.
- [25] QIAO J,YANG L,YAN T, et al. Rice dry matter and nitrogen accumulation, soil mineral N around root and N leaching, with increasing application rates of fertilizer[J]. *European journal of agronomy*,2013,49:93-103.
- [26] LI F,JINFEI F,XIYUE Z, et al. Effect of rice-fish/shrimp co-culture on sediment resuspension and associated nutrients release in intensive aquaculture ponds[J]. *Archives of agronomy and soil science*,2020,66(7):971-982.
- [27] SEO D H,SEOMUN S,CHOI Y D, et al. Root development and stress tolerance in rice: The key to improving stress tolerance without yield penalties[J]. *International journal of molecular sciences*,2020,21(5):1807.
- [28] OUYANG Y,NORTON JEANETTE M. Short-term nitrogen fertilization affects microbial community composition and nitrogen mineralization functions in an agricultural soil[J]. *Applied and environmental microbiology*,2020,86(5):e02278-19.
- [29] ZHANG Y,CHEN M,ZHAO Y Y, et al. Destruction of the soil microbial ecological environment caused by the over-utilization of the rice-crayfish co-cropping pattern[J]. *Science of the total environment*,2021,788:147794.
- [30] SUN R,WANG F,HU C, et al. Metagenomics reveals taxon-specific responses of the nitrogen-cycling microbial community to long-term nitrogen fertilization[J]. *Soil biology and biochemistry*,2021,156:108214.
- [31] 胡梦媛,李雅颖,葛超荣,等. 禾本科植物联合固氮的研究现状及应用前景[J]. *中国生态农业学报(中英文)*,2021,29(11):1815-1826.
- [32] 滕秋梅,张德楠,余丽敏,等. 减施氮肥配接种固氮菌剂对烤烟生长和土壤特性的影响[J]. *江苏农业科学*,2023,51(21):72-78.
- [33] 张迎春,颀建明,李静,等. 生物有机肥部分替代化肥对莴笋及土壤理化性质和微生物的影响[J]. *水土保持学报*,2019,33(4):196-205.
- [34] YANG L,BAI J,ZENG N, et al. Diazotroph abundance and community structure are reshaped by straw return and mineral fertilizer in rice-rice-green manure rotation[J]. *Applied soil ecology*,2019,136:11-20.

[责任编辑:黄敏]