

# 不同稻虾种养模式下水稻中微量元素吸收 与稻米品质的关系研究

钱开国<sup>1</sup>, 罗加伟<sup>1</sup>, 占丰瑞<sup>1</sup>, 刘少君<sup>2</sup>, 李虹颖<sup>3</sup>,  
熊启中<sup>1</sup>, 张卫峰<sup>1</sup>, 柴如山<sup>1</sup>, 张朝春<sup>1</sup>, 叶新新<sup>1\*</sup>

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 安徽省绿色磷肥智能制造与高效利用工程研究中心, 农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室, 江淮耕地资源保护与生态修复重点实验室, 合肥 230036; 2. 全国农业技术推广服务中心, 北京 100125; 3. 安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 合肥 230001)

**摘要:** 为探明不同稻虾种养模式下水稻中微量元素吸收与稻米品质的关系, 开展不同龙虾品种和密度的田间试验, 设计水稻单作 (rice monoculture, R)、水稻克氏原螯虾低密度共作 (rice co-cropping with *Procambarus Clarkii* in low density, RCL)、水稻克氏原螯虾高密度共作 (rice co-cropping with *Procambarus Clarkii* in high density, RCH) 和水稻澳龙共作 (rice co-cropping with *Cherax quadricarinatus*, RA) 4 个处理, 分析了稻米中微量元素含量、稻米品质、中微量元素与品质的相关性以及经济效益等指标。结果表明: 稻虾共作模式提高了稻米中微量元素含量, 其中 Fe、Ca 和 Mg 含量显著增加, 与 R 处理相比, RCH、RCL 和 RA 处理稻米的 Fe 含量分别增加 52.0%、23.4% 和 21.4%, Ca 含量分别增加 45.7%、32.1% 和 22.8%, Mg 含量分别增加 45.0%、28.6% 和 23.3%。稻米中微量元素提升, 有利于稻米品质的改善, 稻米品质中的蛋白质与 Fe、Ca 和 Mg 呈显著 ( $P<0.05$ ) 正相关, 胶稠度与 Fe、Ca 和 Mg 呈极显著 ( $P<0.01$ ) 正相关; 直链淀粉含量和垩白粒率均与 Ca 呈极显著 ( $P<0.01$ ) 负相关。稻虾共作模式提高了蛋白质含量和胶稠度, 降低了稻米的垩白粒率和直链淀粉含量, 稻米品质变优, 其中 RCH 处理稻米品质改善效果最好。与 R 处理相比较, RCH、RCL 和 RA 处理的纯收益分别增加了 506%、314% 和 429%。总体而言, 稻虾共作模式能够提高稻米中微量元素含量, 改善稻米品质, 提高经济效益, 因此, 在稻虾综合种养模式的选择中, 龙虾品种和养殖密度是需要综合考虑的重要因素。

**关键词:** 稻虾共作; 中微量元素; 龙虾品种; 养殖密度; 稻米品质

中图分类号: S511.047; S153.61

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2023)05-0855-07

## Study on the relationship between uptake of medium and trace elements in rice and the quality of rice under different rice-crayfish farming modes

QIAN Kaiguo<sup>1</sup>, LUO Jiawei<sup>1</sup>, ZHAN Fengrui<sup>1</sup>, LIU Shaojun<sup>2</sup>, LI Hongying<sup>3</sup>, XIONG Qizhong<sup>1</sup>,  
ZHANG Weifeng<sup>1</sup>, CHAI Rushan<sup>1</sup>, ZHANG Chaochun<sup>1</sup>, YE Xinxin<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Anhui Engineering and Technology Research Center of Intelligent Manufacture and Efficient Utilization of Green Phosphorus Fertilizer, Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention, Key Laboratory of Jianghuai Arable Land Resources Protection and Eco-restoration, Hefei 230036; 2. National Agricultural Technology Extension Service Center, Beijing 100125; 3. Institute of Soil and Fertilizer, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230001)

**Abstract:** In order to explore the relationship between the absorption of medium and trace elements in rice and rice quality under different rice co-cropping with shrimp modes, the field experiments were conducted in this study with different lobster species and densities. Four treatments were designed: rice monoculture (R), rice co-cropping with *Procambarus Clarkii* in low density (RCL), rice co-cropping with *Procambarus Clarkii* in high

收稿日期: 2023-01-06

基金项目: 安徽省教育厅重点项目(2022AH050886), 安徽省科技重大专项(202103a06020012)和安徽省杰出青年科学基金项目(2008085J13)共同资助。

作者简介: 钱开国, 硕士研究生。E-mail: kaiguoq@stu.ahau.edu.cn

\* 通信作者: 叶新新, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: xxye@ahau.edu.cn

density (RCH) and rice co-cropping with *Cherax quadricarinatus* (RA). The results included the contents and correlation analysis between medium and trace elements and the quality of rice grain, and the economic benefits in different rice-crayfish farming model. The results showed that rice co-cropping with shrimp modes increased the contents of medium and trace elements in rice grain, especially in the contents of Fe, Ca and Mg. Compared with the R treatment, the Fe content of RCH, RCL and RA treatments increased by 52.0%, 23.4% and 21.4%, respectively, and the corresponding values increased by 45.7%, 32.1% and 22.8% for Ca, and increased by 45.0%、28.6% and 23.3% for Mg, respectively. The increase of medium and trace elements in rice was beneficial to the improvement of rice grain quality. The protein content in rice grain was positively correlated with Fe, Ca and Mg ( $P<0.05$ ), and the gel consistency was significantly positive correlation with Fe、Ca and Mg ( $P<0.01$ ). The amylose content and chalkiness grain rate were significantly negative correlation with Ca ( $P<0.01$ ). The rice and shrimp co-cropping mode increased the protein content and gel consistency, decreasing the chalkiness and amylose content in rice grain. RCH treatment had the best effect in enhancing the quality of rice grain. Compared with R treatment, the net benefit of RCH, RCL and RA treatments increased by 506%, 314% and 429%, respectively. In general, the rice-shrimp co-cropping pattern can increase the content of medium and trace elements in rice grain and improve grain quality and economic benefits. In general, lobster species and breeding density are important factors to be taken into consideration in the integrated cultivation of rice-shrimp.

**Key words:** rice-shrimp co-cropping; medium and trace elements; species of lobster; breeding density; rice quality

稻田综合种养是在水稻田引入水生经济动物,充分利用生物间互作关系,将小龙虾养殖与水稻种植有机结合的一种绿色经济的复合农业模式<sup>[1]</sup>,实现水稻、水产双丰收。稻田综合种养种类多样,稻虾生态种养作为其主要模式之一,在2021年占全国稻渔综合种养模式面积的52.95%<sup>[2]</sup>。近年来稻虾综合种养模式发展迅猛,在安徽区域得到大面积推广。

研究发现<sup>[3-5]</sup>,与水稻单作相比较,稻虾共作模式对水稻产量无显著影响。厉宝仙等<sup>[6]</sup>研究认为,与水稻单作相比较,采用稻虾共作模式既有助于稻米外观品质的改善,也有助于提升稻米的蒸煮和营养品质。稻米中微量元素含量是影响稻米品质的重要因素<sup>[7-9]</sup>。中微量元素作为水稻体内多种酶及其活化剂的组成成分,其含量增加有利于蛋白质、淀粉等物质的合成,改善稻米品质<sup>[10-11]</sup>。林利红等<sup>[12]</sup>研究发现,稻蟹共作模式可以增加土壤有机质,降低土壤pH,进而改变土壤中微量元素活性。此外,不同的龙虾品种(生活习性不同)和养殖密度会改变土壤理化性质进而影响土壤中微量元素有效性<sup>[13]</sup>。目前,关于稻虾共作模式下不同龙虾品种和投放密度对水稻中微量元素吸收与稻米品质的关系研究鲜有报道。

本研究通过设置不同龙虾品种和密度试验,比较不同稻虾种养模式对土壤中微量元素有效含量和稻米中微量元素含量变化,探讨不同稻虾共作模式对稻米品质和经济效益的影响,为稻虾共作模式绿色生产提供理论基础和实践依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

普济圩农场位于117°43'E, 31°58'N。年平均气温在16.1℃左右,年平均日照时数为2000h,年平均降雨139d,年平均降雨量在1500mm左右,无霜期240d左右。土壤为多湖沼地区的洪水长年累积沉淀成的腐殖壤土,适宜种植水稻。

### 1.2 供试材料

试验选取的水稻材料为绿亿香糯,提供试验的小龙虾品种为淡水澳龙和克氏原螯虾。

### 1.3 试验设计

试验设置4个处理:(1)水稻单作处理(rice monoculture, R), (2)水稻克氏原螯虾低密度共作(rice co-cropping with *Procambarus Clarkii* in low density, RCL), (3)水稻克氏原螯虾高密度共作(rice co-cropping with *Procambarus Clarkii* in high density, RCH), (4)水稻澳龙共作处理(rice co-cropping with *Cherax quadricarinatus*, RA)。本试验各小区随机排列,各处理3个重复,每个规划小区设置的总面积约为1423m<sup>2</sup>。于试验田周围开挖虾沟,开垦出来的泥土均匀堆垒,筑宽和高均为0.5m的试验田埂并加固。在虾沟岸边设置防逃网,将绳子与防逃网连接并固定于田边的木桩上,以防小龙虾逃出稻田。

试验于2021年7月播种,8月进行水稻移栽,11月进行收割。各处理肥料的施用完全一致,每小区施肥如下:氮肥为225kg·hm<sup>-2</sup>,磷肥为68

kg·hm<sup>-2</sup>, 钾肥为 90 kg·hm<sup>-2</sup>。基肥施入 60% 的氮肥, 磷肥和钾肥全部施入, 氮肥剩下的 40% 用于追肥。于 8 月 10 日将淡水澳龙和克氏原螯虾投入试验田, RCH 按照重量为 20 g 的幼虾 420 kg·hm<sup>-2</sup> 投放; RCL 投放密度为 210 kg·hm<sup>-2</sup>; RA 投放密度为每尾 5~8 cm 的淡水澳龙 1 500 尾·hm<sup>-2</sup>。RCH 和 RCL 处理小龙虾的日饵量一般按塘虾重量的 4% 左右投喂, RA 处理按照淡水澳龙体重的 3% 投喂饲料, 投饵状况要根据天气、水质以及摄食情况进行适当增减, 水稻成熟后, 捕捞试验田成虾。

#### 1.4 测定项目与方法

**1.4.1 水稻籽粒中微量元素测定** 水稻成熟后, 每小区随机取 5 个点(每点五丛)的水稻籽粒样品, 并用水洗去杂质, 再用超纯水进行清洗, 于 105 °C 对样品杀青 30 min, 75 °C 下烘干至恒重, 籽粒样品粉碎后装入自封袋, 用硝酸-高氯酸消煮, 水稻籽粒中微量元素采用原子吸收分光光度法测定<sup>[14]</sup>。

**1.4.2 土壤中微量元素有效含量测定** 用不锈钢土钻钻取 0~20 cm 土样, 于各小区随机选取 5 个点, 将土样分别混成一个样品, 剔除土样中的杂质, 封袋并带回实验室, 并对土壤有效态的中量和微量元素含量进行分析。有效态微量元素先采用 DTPA 浸提剂浸提, 然后过滤, 再用原子吸收分光光度法进

行测定; 交换性钙镁先用乙酸铵交换, 再用原子吸收分光光度法进行测定<sup>[14]</sup>。

**1.4.3 稻米品质测定** 水稻收获后进行脱粒, 参照《优质稻谷(GB/T17891—2017)》<sup>[15]</sup>测定稻米中的糙米率、精米率、胶稠度等加工和外观主要品质指标。蒸煮和营养品质中的蛋白质含量与直链淀粉含量采用 DA 7200 型多功能近红外成分快速分析仪(瑞典 Perten 公司生产)测定。

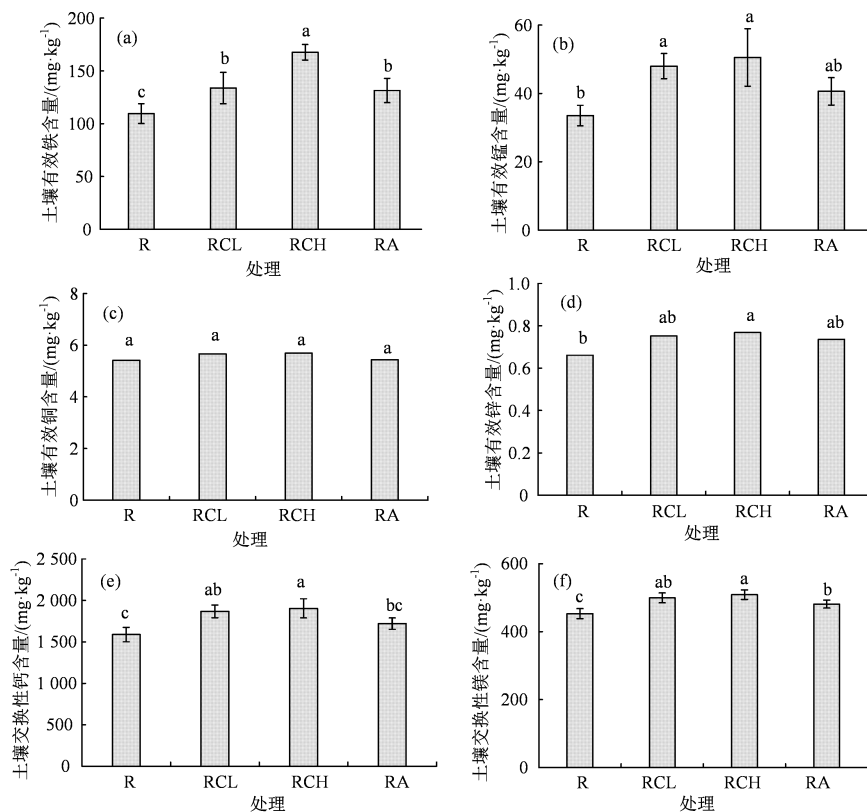
#### 1.5 数据统计分析

采用 Microsoft Excel 2021 对试验测得的数据进行整理计算并绘图, 通过 SPSS 20.0 对各处理数据进行差异性和相关性统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 稻虾共作对土壤中微量元素有效性的影响

由图 1 可知, 除了 Cu 元素, 共作模式下土壤中微量元素有效含量均高于水稻单作处理。土壤 Mn、Cu 和 Zn 的有效含量在 3 种共作模式下, 差异均未达显著水平; 对土壤交换性钙镁, RCH 处理均显著高于 RA 处理, 且 Ca 和 Mg 含量分别增加 10.7% 和 5.8%; 对土壤有效铁含量, RCH 处理相较于 RCL 和 RA 处理分别增加 25.4% 和 27.6%, 差异显著, 而 RCL 与 RA 处理差异不显著。



不同小写字母表示处理间有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。下同。

图 1 不同处理下土壤中微量元素有效含量

Figure 1 Available contents of medium and trace elements in soil under different treatments

## 2.2 稻虾共作对水稻籽粒中微量元素的影响

从图 2 结果显示,除了 Cu 元素,共作模式水稻籽粒中微量元素含量整体上均高于水稻单作处理;在共作处理中,3 种共作模式间水稻籽粒 Mn、Cu、Zn 含量无显著差异;对于籽粒 Ca、Mg 含量,

RCH 处理相较于 RA 处理, Ca 增加了 18.7%, Mg 增加了 17.5%,且差异显著,而 RCH 处理与 RCL 处理差异不显著。对籽粒 Fe 含量,RCH 处理显著高于 RCL 和 RA 处理,且分别增加 23.2%和 25.2%,RCL 与 RA 处理差异不显著。

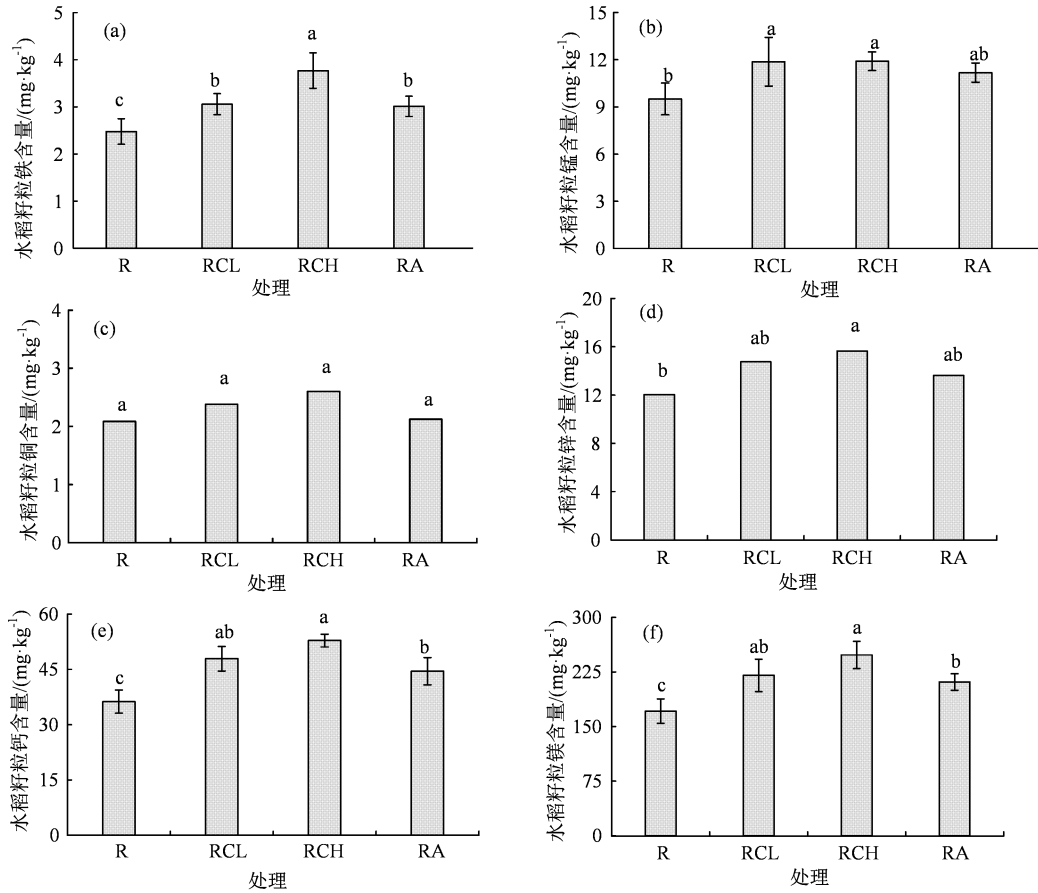


图 2 不同处理下水稻籽粒中微量元素含量

Figure 2 Contents of medium and trace elements in rice grains under different treatments

表 1 不同处理下稻米加工品质

Table 1 Processing quality of rice under different treatments

| 处理  | 糙米率/%                   | 精米率/%                   | 整精米率/%                  |
|-----|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| R   | 72.85±0.01 <sup>c</sup> | 69.16±0.01 <sup>b</sup> | 60.81±0.01 <sup>b</sup> |
| RCL | 74.53±0.01 <sup>b</sup> | 72.77±0.04 <sup>a</sup> | 63.79±0.02 <sup>a</sup> |
| RCH | 76.51±0.01 <sup>a</sup> | 73.78±0.02 <sup>a</sup> | 64.57±0.02 <sup>a</sup> |
| RA  | 74.39±0.02 <sup>b</sup> | 72.72±0.01 <sup>a</sup> | 63.65±0.02 <sup>a</sup> |

注: R 为水稻单作处理, RCL 为水稻克氏原螯虾低密度共作处理, RCH 为水稻克氏原螯虾高密度共作处理, RA 为水稻澳龙共作处理。同列数据后不同小写字母表示处理间具有显著性差异 ( $P<0.05$ )。下同。

## 2.3 稻虾共作对稻米品质的影响

**2.3.1 稻虾共作对稻米加工品质的影响** 由表 1 可知,与水稻单作相比,稻虾共作模式均显著提高稻米加工品质。不同处理糙米率规律是 RCH>RCL~RA>R, RCH 处理的糙米率比 RCL、RA 和 R 处理分别增加 2.7%、2.8%和 5.0%。在精米率和整

精米率方面,稻虾共作处理显著高于水稻单作处理,而共作处理间差异不显著。

表 2 不同处理下稻米外观品质

Table 2 Appearance quality of rice under different treatments

| 处理  | 垩白粒率/%                  | 垩白度/%                   | 长宽比                    |
|-----|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| R   | 11.51±0.22 <sup>a</sup> | 32.84±0.80 <sup>a</sup> | 1.73±0.05 <sup>a</sup> |
| RCL | 9.52±0.05 <sup>c</sup>  | 31.92±0.29 <sup>a</sup> | 1.63±0.02 <sup>b</sup> |
| RCH | 9.36±0.30 <sup>c</sup>  | 31.88±0.60 <sup>a</sup> | 1.59±0.03 <sup>b</sup> |
| RA  | 10.46±0.23 <sup>b</sup> | 32.35±0.96 <sup>a</sup> | 1.65±0.04 <sup>b</sup> |

**2.3.2 稻虾共作对稻米外观品质的影响** 表 2 结果显示,与水稻单作相比,稻虾共作各处理能降低稻米的长宽比和垩白粒率,且差异显著,RCH、RCL 和 RA 处理的垩白粒率和长宽比相较于 R 处理分别降低 18.7%、17.3%和 9.1% (垩白粒率), 8.1%、5.8%和 4.6% (长宽比);共作处理间的垩白度、长宽比差异均不显著。

**2.3.3 稻虾共作对稻米蒸煮和营养品质的影响** 表 3 结果显示, 稻虾共作处理的直链淀粉含量显著低于水稻单作, 但显著提高稻米的胶稠度。RCH、RCL 和 RA 处理的直链淀粉含量相比 R 处理显著降低 23.0%、22.1%和 21.6%, 而稻虾共作各处理间差异不显著。在胶稠度方面, 各处理间规律为 RCH>RCL≈RA>R。稻虾共作各处理间蛋白质含量的差异均未达显著水平, RCH 处理较 R 处理增加了 14.1%, 差异显著。

表 3 不同处理下稻米蒸煮和营养品质

Table 3 Cooking and nutritional quality of rice under different treatments

| 处理  | 直链淀粉含量/%               | 胶稠度/mm                  | 蛋白质含量/%                            |
|-----|------------------------|-------------------------|------------------------------------|
| R   | 2.22±0.32 <sup>a</sup> | 57.57±1.27 <sup>c</sup> | 5.94±0.19 <sup>b</sup>             |
| RCL | 1.73±0.32 <sup>b</sup> | 65.17±3.22 <sup>b</sup> | 6.45±0.27 <sup>a<sup>b</sup></sup> |
| RCH | 1.71±0.03 <sup>b</sup> | 72.41±1.52 <sup>a</sup> | 6.78±0.39 <sup>a</sup>             |
| RA  | 1.74±0.05 <sup>b</sup> | 62.00±1.84 <sup>b</sup> | 6.35±0.65 <sup>ab</sup>            |

## 2.4 稻米中矿质元素含量与品质的相关分析

表 4 结果显示, 蛋白质与 Fe、Zn、Ca、Mg 呈显著 ( $P<0.05$ ) 正相关。胶稠度与 Fe、Ca、Mg 呈

极显著 ( $P<0.01$ ) 正相关, 与 Cu、Zn 呈显著 ( $P<0.05$ ) 正相关。而直链淀粉含量与 Ca 呈极显著 ( $P<0.01$ ) 负相关, 与 Fe、Mn、Zn、Mg 呈显著 ( $P<0.05$ ) 负相关。垩白粒率与 Fe、Zn、Ca、Mg 呈极显著 ( $P<0.01$ ) 负相关, 与 Mn、Cu 呈显著 ( $P<0.05$ ) 负相关。

## 2.5 稻虾共作对水稻产量及其构成的影响

由表 5 可知, 4 种处理间有效穗数、每穗总粒数、水稻的结实率和千粒重差异均未达显著水平; 稻虾共作对水稻产量无显著影响。

## 2.6 稻虾共作模式经济效益分析

由表 6 可知, 3 种综合种养模式与水稻单作相比, 前期投入成本高于水稻单作, 增加的部分主要来自田间改造、虾苗和饲料, 但经济效益显著高于水稻单作处理, RCH、RCL 和 RA 处理纯收益较 R 处理分别增加了 34 089 元·hm<sup>-2</sup>、21 170 元·hm<sup>-2</sup> 和 28 917 元·hm<sup>-2</sup>, 从产投比方面看, RCH、RCL 和 RA 处理的产投比相较于 R 处理分别提高了 76.9%、58.7%和 39.2%。可见, 相比于水稻单作模式, 稻田综合种养模式下经济效益较好, 其中 RCH 处理经济效益最高。

表 4 中微量元素与稻米品质的相关分析

Table 4 Correlation analysis between medium and trace elements and rice quality

| 指标     | 铁        | 锰       | 铜       | 锌        | 钙        | 镁        | 蛋白质      | 胶稠度      | 直链淀粉含量  | 垩白度   | 垩白粒率 |
|--------|----------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|-------|------|
| 铁      | 1        |         |         |          |          |          |          |          |         |       |      |
| 锰      | 0.430    | 1       |         |          |          |          |          |          |         |       |      |
| 铜      | 0.442    | 0.347   | 1       |          |          |          |          |          |         |       |      |
| 锌      | 0.729**  | 0.608*  | 0.563   | 1        |          |          |          |          |         |       |      |
| 钙      | 0.832**  | 0.728** | 0.466   | 0.700*   | 1        |          |          |          |         |       |      |
| 镁      | 0.770**  | 0.475   | 0.647*  | 0.828**  | 0.707*   | 1        |          |          |         |       |      |
| 蛋白质    | 0.623*   | 0.270   | 0.430   | 0.616*   | 0.593*   | 0.619*   | 1        |          |         |       |      |
| 胶稠度    | 0.788**  | 0.560   | 0.671*  | 0.624*   | 0.799**  | 0.828**  | 0.587*   | 1        |         |       |      |
| 直链淀粉含量 | -0.697*  | -0.605* | -0.563  | -0.694*  | -0.823** | -0.690*  | -0.715** | -0.615*  | 1       |       |      |
| 垩白度    | -0.183   | -0.285  | -0.549  | -0.387   | -0.031   | -0.436   | -0.237   | -0.409   | 0.286   | 1     |      |
| 垩白粒率   | -0.753** | -0.708* | -0.686* | -0.763** | -0.867** | -0.786** | -0.598*  | -0.853** | 0.793** | 0.404 | 1    |

注: \*\*表示相关性极显著 ( $P<0.01$ ), \*表示相关性显著 ( $P<0.05$ )。

表 5 稻虾共作对水稻产量及其构成的影响

Table 5 Effects of integrated rice-crayfish farming system on rice yield and composition

| 处理  | 有效穗数/10 <sup>3</sup> hm <sup>-2</sup> | 每穗总粒数                    | 结实率/%                   | 千粒重/g                   | 实际产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )  |
|-----|---------------------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|
| R   | 3 268.30±57.76 <sup>a</sup>           | 130.68±0.81 <sup>a</sup> | 88.26±0.04 <sup>a</sup> | 26.81±1.39 <sup>a</sup> | 9 769.88±611.27 <sup>a</sup> |
| RCL | 3 335.00±152.83 <sup>a</sup>          | 126.66±3.98 <sup>a</sup> | 87.23±0.04 <sup>a</sup> | 26.27±0.07 <sup>a</sup> | 9 521.43±405.46 <sup>a</sup> |
| RCH | 3 401.70±264.71 <sup>a</sup>          | 125.50±7.51 <sup>a</sup> | 87.46±0.02 <sup>a</sup> | 26.50±0.62 <sup>a</sup> | 9 478.07±78.51 <sup>a</sup>  |
| RA  | 3 301.65±173.29 <sup>a</sup>          | 128.33±4.10 <sup>a</sup> | 86.79±0.01 <sup>a</sup> | 26.12±0.66 <sup>a</sup> | 9 394.70±398.70 <sup>a</sup> |

表 6 水稻单作与稻虾共作模式的经济效益

|    | 项目   | R      | RCL    | RCH    | RA     |
|----|------|--------|--------|--------|--------|
| 投入 | 地租   | 5 000  | 5 000  | 5 000  | 5 000  |
|    | 田间改造 | —      | 900    | 900    | 900    |
|    | 种子   | 600    | 600    | 600    | 600    |
|    | 虾苗   | —      | 3 000  | 6 000  | 17 000 |
|    | 肥料   | 2 840  | 2 840  | 2 840  | 2 840  |
|    | 农药   | 975    | 300    | 300    | 300    |
|    | 机耕费  | 800    | 800    | 800    | 800    |
|    | 管理   | 1 800  | 1 800  | 1 800  | 1 800  |
|    | 饲料   | —      | 2 250  | 4 000  | 2 250  |
|    | 劳务费  | 3 500  | 4 500  | 4 500  | 4 500  |
|    | 合计   | 15 515 | 21 990 | 26 740 | 35 990 |
| 收入 | 稻谷   | 22 249 | 33 355 | 33 985 | 30 676 |
|    | 成虾   | —      | 16 539 | 33 578 | 40 965 |
|    | 毛收益  | 22 249 | 49 894 | 67 563 | 71 641 |
|    | 纯收益  | 6 734  | 27 904 | 40 823 | 35 651 |
|    | 产投比  | 1.43   | 2.27   | 2.53   | 1.99   |

注:对照稻米价格 2.29 元·kg<sup>-1</sup>,稻田综合种养模式下 RCL 和 RCH 处理稻谷价格 3.32 元·kg<sup>-1</sup>,RA 处理稻谷价格 3.06 元·kg<sup>-1</sup>。水产品出售价:小龙虾 30 元·kg<sup>-1</sup>,淡水澳龙 70 元·kg<sup>-1</sup>。

### 3 讨论

#### 3.1 稻虾共作对稻米中微量元素的影响

本研究中,与水稻单作相比,稻虾共作模式提高了土壤中微量元素有效含量,进而提升稻米中微量元素含量。稻虾共作处理对土壤中微量元素有效性提升,主要是因为小龙虾在田间掘穴、觅食等活动会刺激水稻根系发育<sup>[16]</sup>,根系的有机分泌物量增加,这些根系分泌的有机酸、氨基酸等物质通过酸化、螯合及还原作用等改变根基环境,提高根际土壤中微量元素有效性,促进水稻吸收较多的中微量元素<sup>[17]</sup>。

在共作处理中,RCH 处理相较于 RA 处理显著提升稻米 Fe、Ca 和 Mg 的含量,这与土壤中 Fe、Ca 和 Mg 的有效含量增加有关,RCH 处理较 RA 处理的 Fe、Ca 和 Mg 有效含量分别提升了 25.2%、18.7%和 17.5%。在高密度模式下,小龙虾数量多,排泄物和虾壳等物质增加了土壤有机质<sup>[18]</sup>,土壤中的有机质在分解与合成过程中会产生多种有机酸,这些有机酸物质通过酸溶以及络合作用,提高土壤中微量元素活性<sup>[12]</sup>。

#### 3.2 稻虾共作对稻米中微量元素吸收与稻米品质的关系

本研究结果表明,与水稻单作相比,稻虾共作模式能够提升稻米品质。共作模式下,Fe、Ca 和 Mg 含量均显著提高,其中 Fe 主要提升稻米中的蛋白质含量,增加稻米胶稠度,降低稻米垩白粒率;

Ca、Mg 增加了稻米中的蛋白质含量和胶稠度,降低了垩白粒率和直链淀粉含量。也有研究<sup>[19-26]</sup>认为 Fe、Ca 和 Mg 可提高稻米胶稠度和蛋白质含量,降低垩白和直链淀粉含量。稻米品质改善与中微量元素含量提升有关,本研究中,蛋白质与 Fe、Ca 和 Mg 呈显著正相关,胶稠度与 Fe、Ca 和 Mg 呈极显著正相关,直链淀粉含量与 Ca 呈极显著负相关,垩白粒率与 Fe、Ca 和 Mg 呈极显著负相关。这是因为中微量元素是组成水稻体内多种酶的辅助因子,与植物的有机物质合成相关联<sup>[27]</sup>,其中,Fe、Ca 和 Mg 是叶绿素组成部分,与干物质的形成有关,并且同时参与多种酶的组成<sup>[23,28-29]</sup>,能提高蛋白质、淀粉等相关合成酶的活性,Fe、Ca 和 Mg 含量增加,有利于蛋白体和淀粉粒发育完善,进而提高蛋白质含量和增加胶稠度,有效降低稻米垩白,稻米中胶稠度增加会降低直链淀粉含量<sup>[23,30-32]</sup>。因此,稻米中微量元素含量提升,增加了蛋白质含量和胶稠度,降低了直链淀粉含量和垩白粒率,能够改善稻米品质。

#### 3.3 经济效益

本研究中,各处理纯收益规律为 RCH>RA>RCL>R,RCH 处理纯收益最高,一方面是因为稻虾共作模式下水稻产量得以稳产,且稻虾米品质提升,其价格比普通稻米价格高,可以获得更高收益;另一方面 RCH 处理小龙虾产量高,市场对于小龙虾需求大,且价格较高,最终提升成虾收益。稻田综合种养有机结合了水稻种植与水产养殖,水稻和龙虾后期的双重收益远高于水稻单作模式,因此,

在产投比方面, 共作模式均高于水稻单作模式, 可以显著提升经济效益。

#### 4 结论

综上所述, 稻虾共作模式相较于水稻单作能够提高稻米中微量元素含量, 其中 Fe、Ca 和 Mg 含量显著增加, 这与土壤中 Fe、Ca 和 Mg 有效含量显著提升有关。稻米中微量元素含量提升能够显著提高稻米品质, 稻米中的胶稠度、蛋白质与中微量元素呈显著正相关, 而直链淀粉、垩白粒率均与中微量元素呈显著负相关, 稻米中微量元素含量提升, 蛋白质含量提高, 胶稠度增加, 直链淀粉含量和垩白粒率降低, 能够有效改善稻米的外观、蒸煮和营养品质。稻虾共作模式下, 稻米品质提升, 市场价格高, 增加了生态系统收益, RCH 处理的收益最高。为了提高稻米品质 and 经济效益, 稻田综合种养模式选取需要考虑龙虾品种和合理的养殖密度。

#### 参考文献:

- [1] XIE J, HU L L, TANG J J, et al. Ecological mechanisms underlying the sustainability of the agricultural heritage rice-fish coculture system[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2011, 108(50): 19851-19852.
- [2] 于秀娟, 郝向举, 党子乔, 等. 中国小龙虾产业发展报告(2022)[J]. 中国水产, 2022, 559(6): 47-54.
- [3] 刘少君, 李文博, 熊启中, 等. 稻虾共作磷素平衡特征及生态经济效益研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(10): 2179-2188.
- [4] FREI M, BECKER K. A greenhouse experiment on growth and yield effects in integrated rice-fish culture[J]. Aquaculture, 2005, 244(1/2/3/4): 119-128.
- [5] LI P, WU G G, LI Y J, et al. Long-term rice-crayfish-turtle co-culture maintains high crop yields by improving soil health and increasing soil microbial community stability[J]. Geoderma, 2022, 413: 115745.
- [6] 厉宝仙, 王保君, 怀燕, 等. 水稻-红螯螯虾共作对稻田土壤养分、碳库与稻米品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(4): 688-696.
- [7] 汤海涛, 马国辉, 廖育林, 等. 土壤营养元素对稻米品质的影响[J]. 农业现代化研究, 2009, 30(6): 735-738.
- [8] RANVA S, SINGH Y V, JAIN N, et al. Effect of natural safe rock minerals on growth, yield and quality of rice (*Oryza sativa*) in rice-wheat cropping system[J]. Indian J Agri Sci, 2019, 89(9): 161-167.
- [9] CAO X M, SUN H Y, WANG C G, et al. Effects of late-stage nitrogen fertilizer application on the starch structure and cooking quality of rice[J]. J Sci Food Agric, 2018, 98(6): 2332-2340.
- [10] 俄胜哲, 袁继超, 丁志勇, 等. 水稻灌浆过程中籽粒 Fe、Zn、Cu、Mn、Mg、Ca 的积累动态[J]. 中国农学通报, 2009, 25(20): 154-159.
- [11] PANHWAR Q A, NAHER U A, RADZIAH O, et al. Quality and antioxidant activity of rice grown on alluvial soil amended with Zn, Cu and Mo[J]. S Afr N J Bot, 2015, 98: 77-83.
- [12] 林利红, 王延平, 王帅. 稻田养蟹对水稻土壤理化性质的影响研究[J]. 辽宁农业科学, 2016(3): 43-47.
- [13] 汪清, 王武, 马旭洲, 等. 稻蟹共作对土壤理化性质的影响[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(19): 3948-3952.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [15] 国家粮食储备局, 中华人民共和国农业部. 优质稻谷: GB/T 17891-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [16] 董明辉, 顾俊荣, 李锦斌, 等. 稻虾生态种养和机插密度对优良食味粳稻产量与品质的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(17): 1-12.
- [17] 徐国伟, 常二华, 陈明灿, 等. 根系分泌物对水稻及其他作物生长与品质影响[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(23): 4757-4760.
- [18] 管勤壮, 成永旭, 李聪, 等. 稻虾共作对土壤有机碳的影响及其与土壤性状的关系[J]. 浙江农业学报, 2019, 31(1): 113-120.
- [19] 杨文祥, 李刚华, 王强盛, 等. 镁对稻米食味品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2007, 23(3): 166-171.
- [20] 王永兵, 程海涛, 马兆惠, 等. 施镁对不同食味粳稻品种的品质影响[J]. 河北农业大学学报, 2020, 43(3): 23-28, 44.
- [21] 聂录, 林玉萍, 张少波. 镁肥对水稻产量和品质的影响[J]. 现代化农业, 2017(6): 17-18.
- [22] 王文玉, 郑桂萍, 万思宇, 等. 15%调环钙对水稻产量与品质的影响[J]. 大麦与谷类科学, 2019, 36(3): 11-17.
- [23] 刘立军, 常二华, 范苗苗, 等. 结实期钾、钙对水稻根系分泌物与稻米品质的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(4): 661-669.
- [24] 唐湘如, 吴密. 施用锌、铁、铜肥对香稻米质和产量的影响[J]. 杂交水稻, 2007(2): 69-72.
- [25] 孙涛, 同拉嘎, 赵书宇, 等. 氮肥对水稻胚乳淀粉品质、相关酶活性及基因表达量的影响[J]. 中国水稻科学, 2018, 32(5): 475-484.
- [26] KUMAR A, SEN A, UPADHYAY P K, et al. Effect of zinc, iron and manganese levels on quality, micro and macro nutrients content of rice and their relationship with yield[J]. Commun Soil Sci Plant Anal, 2017, 48(13): 1539-1551.
- [27] KHANDAY M, RAM D, ALI T, et al. Strategy for optimization of higher productivity and quality in field crops through micronutrients: a review[J]. Econ Aff, 2017, 62: 139.
- [28] 邱园园, 刘昆, 卓鑫鑫, 等. 铁的生理功能及其对水稻产量和品质影响的研究综述[J]. 中国稻米, 2022, 28(1): 43-47.
- [29] 孔宇, 张文忠, 高继平, 等. 钾硅镁配施对寒地水稻产量及品质的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2016, 47(2): 224-229.
- [30] 杨志珍, 黄河. 施用微量元素肥料对水稻产量与品质的影响[J]. 湖南农业科学, 2003(1): 34-35.
- [31] 李冠男, 黄立华, 黄金鑫, 等. 盐碱地水稻结实初期不同叶面肥喷施对稻米品质的影响[J]. 土壤与作物, 2020, 9(2): 126-135.
- [32] 王震, 邵高能, 魏祥进, 等. 稻米淀粉性状的 QTLs 定位及其与淀粉合成相关酶基因的关联性分析[J]. 浙江农业学报, 2011, 23(3): 439-445.