

胡译然, 杜林森, 李奎, 等. 不同放养密度稻虾综合种养模式的水质评估及经济效益评价 [J]. 华南农业大学学报, 2024, 45(6): 918-928.
HU Yiran, DU Linsen, LI Kui, et al. Water quality assessment and economic benefit evaluation of integrated rice-red crayfish cultivation system under different stocking densities[J]. Journal of South China Agricultural University, 2024, 45(6): 918-928.

不同放养密度稻虾综合种养模式的水质评估及经济效益评价

胡译然^{1,2}, 杜林森¹, 李奎¹, 李峰², 王华¹

(1 湖南农业大学 环境与生态学院, 湖南长沙 410128; 2 中国科学院 亚热带农业生态研究所/亚热带农业生态过程重点实验室/洞庭湖湿地生态系统国家野外科学观测研究站, 湖南长沙 410125)

摘要:【目的】比较不同放养密度稻虾综合种养模式与传统水稻单作模式的水体环境质量及经济效益, 探索洞庭湖区稻虾种养的科学模式。【方法】采用小区试验的方法, 共设置 3 个处理: 放养密度为 300 kg·hm⁻² 的低密度稻虾处理、放养密度为 375 kg·hm⁻² 的高密度稻虾处理和水稻单作处理。分别在水稻不同生长期进行水样采集和理化性质分析, 采用综合水质指数评价法对 3 种模式进行水体质量评价, 同时比较不同模式的经济效益。【结果】溶解性总固体含量、pH、NH₄⁺-N 含量、化学需氧量和溶解氧含量这 5 项水体理化指标是田间水质变化的主要影响因素。在成熟期, 相较于低密度稻虾处理虾沟水体, 高密度稻虾处理虾沟水体总 N 含量显著提升 10.5% ($P < 0.05$), 总 P 含量上升 3.6%, 化学需氧量显著提升 26.2% ($P < 0.05$)。在水稻成熟期, 低密度稻虾处理水体质量指数达到 0.72, 显著高于高密度稻虾处理 ($P < 0.05$)。成本和收益计算结果显示, 稻虾综合种养模式的经济效益较水稻单作模式提升 6~9 倍, 且低密度稻虾处理的经济效益是高密度稻虾处理的 1.47 倍。【结论】在稻虾综合种养模式中选择合适的虾养殖密度, 可有效降低农业面源污染、提高稻田经济效益和环境效益, 具有较好的推广潜力。以上研究结果为洞庭湖区农业面源污染防治措施制定提供了数据支撑。

关键词: 稻虾综合种养; 放养密度; 产量; 水质; 经济效益

中图分类号: S511.32; S966.12; X824

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2024)06-0918-11

Water quality assessment and economic benefit evaluation of integrated rice-red crayfish cultivation system under different stocking densities

HU Yiran^{1,2}, DU Linsen¹, LI Kui¹, LI Feng², WANG Hua¹

(1 College of Environment and Ecology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2 Institute of Subtropical Agriculture/Key Laboratory of Agro-Ecological Processes in Subtropical Region/National Field Scientific Observation and Research Station of Dongting Lake Wetland Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

收稿日期: 2024-03-21 网络首发时间: 2024-09-20 09:20:59

首发网址: <https://link.cnki.net/urlid/44.1110.S.20240919.1701.002>

作者简介: 胡译然, 硕士研究生, 主要从事农业面源污染研究, E-mail: huyiran@stu.hunau.edu.cn; 通信作者: 王华, 教授, 博士, 主要从事农业生态和环境生态研究, E-mail: wangchina926@hunau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFD1700804); 湖南省水利厅项目 (XSKJ2022068-32); 湖南省重点研发计划 (2021NK2059); 国家自然科学基金 (42377319); 湖南省自然科学基金 (2023JJ30308); 长沙市自然科学基金 (kq2208078); 湖南省水产产业技术体系项目 (HARS-07)

Abstract: 【Objective】 To compare the water environment quality and economic benefits of rice-red crayfish integrated cultivation model under different stocking densities and traditional rice monocropping model, and explore the scientific model of rice-red crayfish cultivation in Dongting Lake area. 【Method】 Using the method of plot experiment, three treatments were set up: Low density rice-red crayfish treatment with stocking density of 300 kg·hm⁻², high density rice-red crayfish treatment with stocking density of 375 kg·hm⁻² and rice monocropping treatment. Water samples were collected and their physico-chemical properties were analyzed at different growth stages of rice. Comprehensive water quality index evaluation method was used to evaluate the water quality of three models, and the economic benefits of different models were compared. 【Result】 Total dissolved solid content, pH, NH₄⁺-N content, chemical oxygen demand, and dissolved oxygen content were the primary five factors affecting water quality changes. At ripening stage, compared to the ditch water of low density rice-red crayfish treatment, the ditch water of high density rice-red crayfish treatment showed increases of total N content by 10.5% ($P<0.05$), total P content by 3.6%, and chemical oxygen demand by 26.2% ($P<0.05$). At rice ripening stage, the water quality index of the low density rice-red crayfish treatment reached 0.72, significantly higher than that of high density rice-red crayfish treatment ($P<0.05$). The cost and benefit calculations showed that the integrated rice-crayfish model's economic benefits were 6–9 times higher than that of rice monocropping model, and low density rice-red crayfish's economic benefits were 1.47 times of high density rice-red crayfish treatment. 【Conclusion】 The suitable breeding density of red crayfish can effectively reduce the pollution of agricultural non-point sources, significantly increase the economic and environment benefits of rice fields, and have a good popularization potential. These findings provide a data support for formulating measures to prevent agricultural non-point source pollution in the Dongting Lake region.

Key words: Integrated rice-red crayfish cultivation; Stocking density; Yield; Water quality; Economic benefit

水质和粮食安全是全球农业可持续发展的中心问题^[1]。中国是世界上最大的稻米生产国,产量约占全球稻米产量的28%^[2]。作为一种耗水型作物,水稻种植用水量在许多地区占农业用水总量的80%左右,因此在确保粮食安全的前提下有效防控稻田面源污染至关重要。随着当前集约化农业生产模式的广泛应用,施用大量农药、化肥的同时叠加不合理的灌溉和排水方式,一方面造成严重的农业面源污染、降低水稻产量;另外,大量污染物通过地表径流、农田排水、地下渗漏等方式扩散到其他水生生态系统,导致周边湖泊、河流等水生生态系统的水质下降,并引发水体富营养化、蓝藻暴发等生态环境问题^[3-4],引起社会的高度关注。因此,积极探索环保型水稻种植模式、改善农业面源污染环境已成为当前农业发展的一个重要方向。

稻渔综合种养系统是以水稻种植为基础,在稻田养殖鱼、虾、鸭等水生动物或禽类,在不施用或者少量施用化肥、农药的同时,生产出高质量水稻和优质动物蛋白,是一种有机、可持续的现代农业生产模式^[5]。稻虾种养模式是水稻种植与小龙虾养殖

的有机结合,当前已在我国众多湖区得到大面积推广,是稻渔综合种养系统的典型模式。一方面稻田中的杂草、害虫等可为小龙虾提供天然饵料,小龙虾的粪便也可以成为水稻的肥料;同时,养殖小龙虾还可通过有效减少稻田中害虫数量、增加土壤有效含氧量及促进田间水体元素循环等途径减少稻田农药和化肥的使用^[6-8]。

近年来,为了提高稻虾综合种养模式中小龙虾的效益,农民过量投放饵料和病害防治药物,过多的投入品以及由此产生的固液态废弃物在养殖季结束时随尾水集中排放,大大加剧周边水体富营养化的风险。环洞庭湖区是湖南稻虾综合种养的重要区域,主要分布在益阳市、常德市、岳阳市、长沙市望城区,种养面积已突破5.3万hm²^[9]。稻虾养殖尾水大多不经任何处理直接排至洞庭湖,严重威胁湖泊水质及生态环境;因此,改善稻虾养殖技术、减少养殖尾水中营养物质的排放对于保障湖区生态环境、推动湖区稻虾产业发展及面源污染防治均具有重要的理论和现实意义。

为了得出洞庭湖区稻虾综合养的科学模式,本研究设置了3种模式:水稻单作模式、水稻-

低密度虾模式和水稻-高密度虾模式,结合综合水质指数评价法对 3 种模式的水质进行综合评价,以确定不同模式对水环境的影响;此外,还对不同模式的经济效益进行了比较。本研究旨在遴选科学的种养模式,为湖区农业面源污染的治理及农业发展提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验地位于湖南省长沙市望城区 (28°44'N, 112°87'E),属于亚热带季风气候,温和湿润,年平均气温 17 °C,年降水量约 1 370 mm,年日照时数 1 610 h,无霜期约 274 d。试验地土壤为沙壤,耕层约 20 cm,基本肥力性质见表 1。

1.2 试验设计

本研究采用小区试验的方法,将本底值相近的田块设计成为均匀的 9 个试验小区,每个试验小区

面积为 667 m²,并设有田埂,用地膜包裹,试验小区四周开挖虾沟,上宽 0.5 m,下宽 0.3 m,深 0.6 m。设置 2 种稻虾综合种养模式(低密度稻虾、高密度稻虾)和水稻单作模式,每种模式设置 3 次重复,9 个试验小区完全随机区组排列。供试水稻为中熟品种‘农香 42’。供试虾为红螯螯虾 *Cherax quadricarinatus*,虾苗规格为 120 尾·kg⁻¹,其中低密度稻虾处理投放 20 kg(2 400 尾,投放密度为 300 kg·hm⁻²),高密度稻虾处理投放 25 kg(3 000 尾,投放密度为 375 kg·hm⁻²)。试验红螯螯虾放养密度由本研究前期对环洞庭湖地区(以常德市、益阳市、岳阳市为主要调研对象)稻虾综合种养实际生产的调研结果确定,调研结果显示环洞庭湖区稻虾综合种养的虾苗放养密度以 300、375 kg·hm⁻² 最具代表性,因此选取 300、375 kg·hm⁻² 作为本研究目标放养密度。

表 1 试验地土壤基本理化性质
Table 1 Basic physical-chemical properties of the tested soil

处理 Treatment	pH	w/(g·kg ⁻¹)				w/(mg·kg ⁻¹)	
		总N Total N	总P Total P	总K Total K	有机质 Organic matter	速效P Available P	速效K Available K
稻虾 Rice-red crayfish	6.02±0.03	0.97±0.07	0.58±0.02	5.69±0.27	27.50±2.24	2.71±0.76	43.94±2.89
水稻单作 Rice monocropping	6.01±0.02	0.98±0.06	0.59±0.01	5.49±0.24	29.80±4.31	2.23±0.50	36.65±2.66

1.3 田间管理

1.3.1 水稻管理 2022 年 5 月中旬进行整地、育秧;6 月上旬进行水稻机插秧,栽插的原则是宽行窄株、沟边密植,10 月中下旬收割。本研究所有处理均于水稻种植前施用基肥,基肥选用三元复合肥(N、P、K 质量比为 15:15:15);水稻单作模式施用基肥 40 kg,2 种稻虾综合种养模式均减少 20%(w) 的肥料投入,即施用基肥 32 kg。

1.3.2 红螯螯虾管理 2022 年 7 月初投放红螯螯虾虾苗,10 月中旬收获成虾。每日分别在 06:00、17:00 投喂,初始投喂量为虾苗总质量的 3%(w),后期根据红螯螯虾长势及饵料台吃食情况调整投喂量。

1.3.3 水位管理 水稻单作:水稻移栽后至分蘖盛期前,田间保持淹水 3~4 cm;水稻分蘖盛期采用浅水晒田,水层 1~2 cm;水稻分蘖后期至灌浆期前,田面保持 15~20 cm 水位;水稻灌浆期,田间排水,开始晒田。

稻虾综合种养模式:水稻移栽后至分蘖盛期

前,田间保持淹水 3~4 cm;水稻分蘖盛期采用浅水晒田,水层 1~2 cm;水稻分蘖后期至成熟期前,田面保持 15~30 cm 水位;水稻成熟期至水稻收割,逐渐降低水位至田面以下。整个稻虾共作期间,仅在水稻成熟期对田间进行排水,虾沟一直保持淹水状态。

1.4 水体样品采集与测定

2022 年 6—10 月,分别在水稻的分蘖期、拔节期、孕穗期、扬花期、灌浆期和成熟期,从低密度、高密度稻虾处理的田面和虾沟以及水稻单作处理的田面采集水样,带回实验室保存于 4 °C 冰箱,等待后续检测。样品名称及编号分别为:低密度稻虾模式田面水体样品(RCL)、低密度稻虾模式虾沟水体样品(RCL-G)、高密度稻虾模式田面水体样品(RCH)、高密度稻虾模式虾沟水体样品(RCH-G)、水稻单作模式田面水体样品(RM)。由于水稻单作模式在灌浆期即开始晒田,因此在灌浆期水稻单作模式无水体样品;成熟期 3 个处理均需要晒田,仅

采集低、高密度稻虾处理虾沟水体样品。使用便携式水质分析仪 (YSI Pro Quatro) 现场测定水体溶解氧含量、温度、溶解性总固体含量、电导率和 pH; 采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定水体总 N 含量; 采用纳氏试剂分光光度法测定水体铵态 N(NH₄⁺-N) 含量; 采用紫外分光光度法测定水体硝态 N(NO₃⁻-N) 含量; 采用钼酸铵分光光度法测定水体总 P 含量; 采用高锰酸钾法测定水体的化学需氧量。

1.5 数据分析

1.5.1 水体质量评价

综合水质指数评价法将各种参数指标整合成一个可以反映整体水质情况的常数, 减少单独使用一些指标产生的差异, 从而综合评价水生生态系统水环境的整体质量^[10-11]。在这一方法中, 所有候选的指标都可能是水体质量的最终评价因素, 由于部分指标的获取有一定难度, 因此可以选择具有代表性的指标建立一个最小数据集 (Minimal data set, MDS), 旨在从所有候选参数中筛选出最具代表性的子集, 以尽可能全面地代表所有候选参数。然后, 对选择出来的合适指标进行加权与评分, 最终将分数合并为水质指数 (Water quality index, WQI)。

本研究选取 9 个水体理化指标进行 WQI 评价, 选择评价因子建立 MDS。为了克服指标间的信息重叠, 采用主成分分析 (Principal component analysis) 进行分组, 将特征值 ≥ 1 、主成分载荷绝对值 ≥ 0.5 的水体指标分为一组。计算分组指标的范数值, 选择各组中范数值在前 10% 的指标。选择后, 分析各组指标间的相关性, 如果具有相关性 ($r \geq 0.3$), 确定得分最高的指标进入 MDS, 若无相关性 ($r < 0.3$), 所有指标都进入 MDS, 从而得到最终的 MDS。范数值的计算公式见式 (1):

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_{i=1}^k (U_{ik}^2 \lambda_k)}, \quad (1)$$

式中: N_{ik} 为水体变量 i 在前 k 个主成分上的综合载荷; U_{ik} 为水体变量 i 在第 k 个主成分上的载荷; λ_k 为主成分 k 的特征值。

式 (2) 和 (3) 分别为“越多越好”和“越少越好”曲线的线性评分:

$$S_i = \frac{X-L}{H-L}, \quad (2)$$

$$S_i = 1 - \frac{X-L}{H-L}, \quad (3)$$

式中: S_i 为水体指标的线性得分, 0~1; X 为变量值; L 为变量中的最小值; H 为变量中的最大值。

在计算了水体指数的得分和权重后, 采用式

(4) 计算 WQI:

$$WQI = \sum_{i=1}^n W_i S_i, \quad (4)$$

式中: W_i 为主成分分析得到的加权指标; S_i 为使用式 (2) 或 (3) 计算的指数得分; n 为数据集中的指数量。WQI 取值 0~1, WQI 越高, 说明水体质量越好。

1.5.2 经济效益评价

水稻产量测定: 在水稻成熟期, 每小区按 5 点取样法调查 100 穴水稻的有效穗数, 计算单穴平均有效穗数; 每小区按平均有效穗数取样 5 穴, 测定每穗总粒数、每穗实粒数、结实率和千粒质量; 各处理分收分晒, 测实际产量^[12]。

红螯螯虾产量测定: 红螯螯虾通过虾的规格分级记产, 计算产值, 红螯螯虾规格分为小青、中青、大青、炮头。小青指体质量 < 20 g, 中青指体质量 $20 \sim < 30$ g, 大青指体质量 $30 \sim < 45$ g, 炮头指体质量 ≥ 45 g。

1.5.3 水质数据分析

统计分析均采用 SPSS 26.0 进行, 在 $P < 0.05$ 水平差异显著; 采用双因素方差分析研究水稻不同生长时期和不同处理对水体理化指标和 WQI 的影响; 采用多重比较检验法 (Duncan's 法) 检验水稻不同生长时期和不同处理的水体理化指标和 WQI 的差异性; 采用 Pearson 相关分析确定水体理化指标的两两相关性; 采用线性回归比较与验证 WQI 的 MDS; 使用 Origin 2021 绘图软件制图。

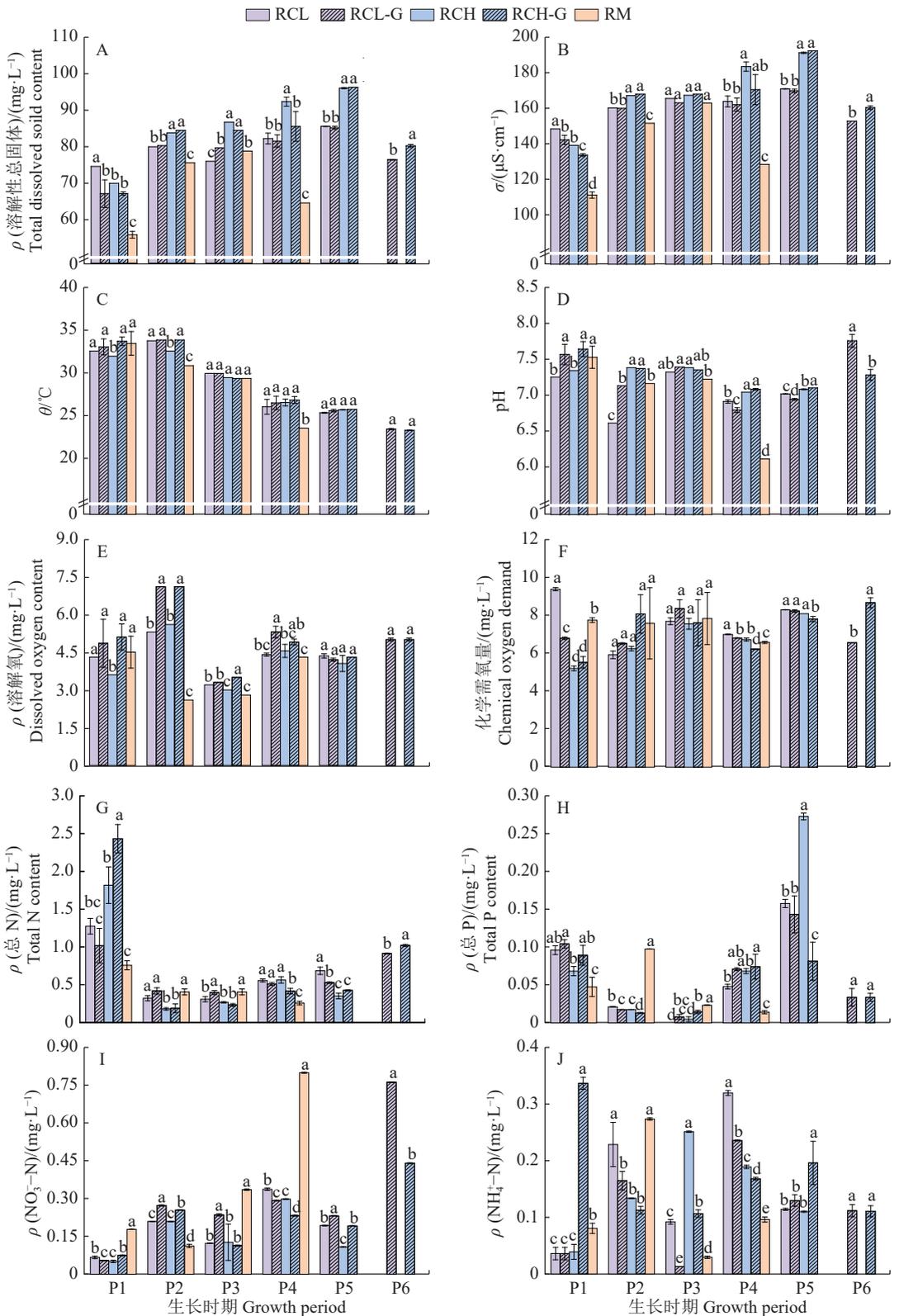
2 结果与分析

2.1 水体物理指标的变化

不同处理及水稻不同生长时期对水体物理指标的影响如图 1A~1C 所示。整个试验阶段的水体温度随水稻生长时期的推移逐渐降低。在水稻分蘖期, 低密度稻虾处理水体的电导率高于高密度稻虾处理, 且电导率和溶解性总固体含量均显著高于水稻单作; 在水稻拔节期和扬花期, 高密度稻虾处理水体的电导率和溶解性总固体含量高于低密度稻虾处理, 且均显著高于水稻单作; 在水稻孕穗期, 高密度稻虾处理水体的溶解性总固体含量显著高于低密度稻虾处理和水稻单作; 在水稻灌浆期, 高密度稻虾处理水体的电导率和溶解性总固体含量均显著高于低密度稻虾处理。

2.2 水体化学指标的变化

不同处理及水稻不同生长时期对水体化学指标的影响如图 1D~1J 所示。pH 变化如图 1D 所示, 3 个处理的水体 pH 在 6.12~7.92 波动。溶解氧含量变化如图 1E 所示, 2 种稻虾综合种养处理的水体溶解氧含量在拔节期最高, 在孕穗期最低, 且 2 种综



RCL: 低密度稻虾模式田面水体, RCL-G: 低密度稻虾模式虾沟水体, RCH: 高密度稻虾模式田面水体, RCH-G: 高密度稻虾模式虾沟水体, RM: 水稻单作模式田面水体; P1: 分蘖期, P2: 拔节期, P3: 孕穗期, P4: 扬花期, P5: 灌浆期, P6: 成熟期; 各小图中柱子上的不同小写字母表示相同生长时期不同处理间差异显著 ($P < 0.05$, Duncan's 法)。

RCL: Surface water of low density rice-red crayfish model, RCL-G: Ditch water of low density rice-red crayfish model, RCH: Surface water of high density rice-red crayfish model, RCH-G: Ditch water of high density rice-red crayfish model, RM: Surface water of rice monocropping model; P1: Tillering stage, P2: Jointing stage, P3: Booting stage, P4: Flowering stage, P5: Filling stage, P6: Ripening stage; Different lowercase letters above the columns in each figure indicate significant differences among different treatments in the same growth period ($P < 0.05$, Duncan's method).

图 1 水体理化指标在不同处理和水稻各生长时期的变化

Fig. 1 Physico-chemical indicator changes of water under different treatments and in different growth periods of rice

合种养模式虾沟水体的溶解氧含量普遍高于其田面水体; 水稻单作田面水体的溶解氧含量随水稻生育期推移呈先下降后上升的趋势, 且全程低于 2 种稻虾处理虾沟水体。化学需氧量变化如图 1F 所示, 水体化学需氧量在水稻生长周期内无明显波动。低密度稻虾处理水体的化学需氧量在水稻分蘖期、孕穗期、扬花期、灌浆期均高于高密度稻虾处理, 在拔节期和成熟期低于高密度稻虾处理; 在成熟期, 相对于低密度稻虾模式虾沟水体, 高密度稻虾模式虾沟水体的化学需氧量显著上升 26.2%。

总 N 含量变化如图 1G 所示, 所有模式的水体总 N 含量随水稻生长时期推移呈先下降后上升的趋势。所有模式均在分蘖期最高, 在拔节期最低; 在分蘖期和成熟期, 高密度稻虾处理水体总 N 含量显著高于低密度稻虾处理, 其中成熟期虾沟水体中总 N 含量显著提升 10.5%; 其余时期低密度稻虾处理水体总 N 含量高于高密度稻虾处理。

总 P 含量变化如图 1H 所示, 所有模式水体总 P 含量随水稻生长时期推移呈先下降后上升再下降的趋势。2 种稻虾综合种养处理水体的总 P 含量在水稻分蘖期和扬花期均高于水稻单作, 而在水稻拔节期和孕穗期则显著低于水稻单作; 高密度稻虾处理田面水样总 P 含量在水稻灌浆期显著高于低密度稻虾处理水样, 且均显著高于高密度稻虾处理虾沟水样; 在水稻成熟期 2 种稻虾综合种养处理水体

的总 P 含量无显著差异, 高密度模式虾沟水体总 P 含量比低密度模式虾沟水体提升 3.6%。

NO_3^- -N 含量变化如图 1I 所示, 所有模式水体的 NO_3^- -N 含量随水稻生长时期推移呈先上升后下降再上升的趋势。2 种稻虾综合种养处理水体的 NO_3^- -N 含量在水稻分蘖期、孕穗期和扬花期均低于水稻单作, 而在水稻拔节期则高于水稻单作; 低密度稻虾处理水体 NO_3^- -N 含量在水稻灌浆期和成熟期高于高密度稻虾处理。 NH_4^+ -N 含量变化如图 1J 所示。水稻单作水体的 NH_4^+ -N 含量在水稻扬花期显著低于 2 种稻虾综合种养处理, 而在水稻拔节期则高于低密度稻虾处理, 且显著高于高密度稻虾处理; 高密度稻虾处理虾沟水样的 NH_4^+ -N 含量在水稻分蘖期显著高于水稻单作, 且均显著高于低密度稻虾处理; 高密度稻虾处理水体的 NH_4^+ -N 含量在水稻拔节期和扬花期低于低密度稻虾处理; 高密度稻虾处理虾沟水体的 NH_4^+ -N 含量在水稻分蘖期、孕穗期和灌浆期显著高于低密度稻虾处理; 在水稻成熟期, 2 种稻虾处理的 NH_4^+ -N 含量无显著差异。

2.3 基于水质指数的水质总体状况及主要因子

2.3.1 最小数据集 从测定的 10 个指标中选择合适的变量纳入 MDS, 并进行主成分分析, 结果如表 2 所示。共得到 4 个特征值 > 1 的主成分, 占有变量特征变化的 72% 以上。

表 2 水体指标的主成分分析结果
Table 2 Principal component analysis results of water indexes

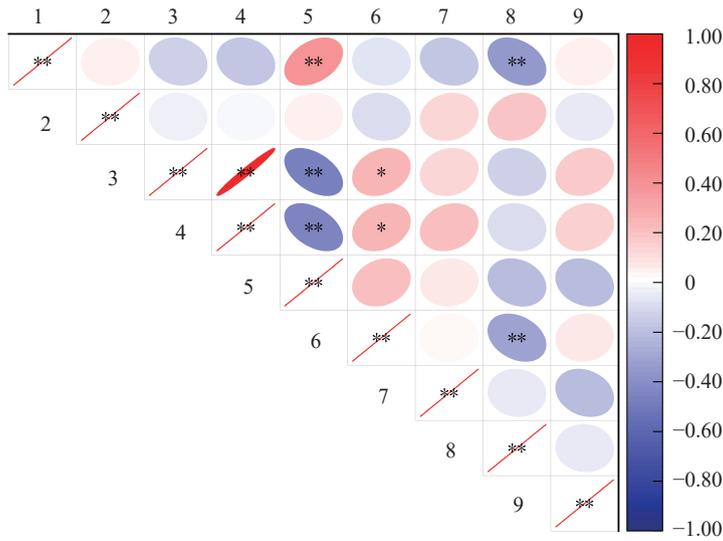
指标 ¹⁾ Index	主成分 Principal component				范数值 Norm value	公因子方差 Communality
	I	II	III	IV		
1	-0.361	0.553	-0.175	0.527	6.331	0.744
2	-0.061	-0.257	0.330	0.775	7.328	0.780
3	0.939	0.158	0.014	0.148	5.233	0.930
4	0.945	0.138	0.080	0.143	5.262	0.939
5	-0.649	0.487	0.278	0.019	5.254	0.736
6	0.271	0.602	0.191	-0.287	5.219	0.554
7	0.204	-0.042	0.787	0.009	6.265	0.663
8	-0.036	-0.811	-0.059	0.002	5.568	0.663
9	0.252	0.147	-0.657	0.205	5.686	0.559
特征值 Eigenvalue	2.511	1.696	1.314	1.046		
占比/% Percent	27.903	18.847	14.599	11.619		
累积占比/% Cumulative percent	27.903	46.749	61.348	72.967		

1) 1: pH, 2: 溶解氧含量, 3: 电导率, 4: 溶解性总固体含量, 5: 总 N 含量, 6: 总 P 含量, 7: NH_4^+ -N 含量, 8: NO_3^- -N 含量, 9: 化学需氧量。

1) 1: pH, 2: Dissolved oxygen content, 3: Electrical conductivity, 4: Total dissolved solid content, 5: Total N content, 6: Total P content, 7: NH_4^+ -N content, 8: NO_3^- -N content, 9: Chemical oxygen demand.

根据 MDS 的构建方法, 从主成分 I~IV 中挑选载荷值绝对值 ≥ 0.5 , 即具有高度加权的变量。在主成分 I 中挑选出的指标为电导率、溶解性总固体含量和总 N 含量; 在主成分 II 中挑选出的指标为 pH、总 P 含量和 NO_3^- -N 含量; 在主成分 III 中挑选出的指标为 NH_4^+ -N 含量和化学需氧量; 在主成分 IV 中挑选出的指标为 pH 和溶解氧含量。从这些指标中挑选出范数值在前 10% 的 7 个指标: 电导率、溶解

性总固体含量、总 N 含量、pH、 NH_4^+ -N 含量、化学需氧量和溶解氧含量; 再结合图 2 水体各指标间的相关性分析, 去除相关性较高的指标 (电导率和总 N 含量) 后, 最终得到 5 项 MDS 指标: 溶解性总固体含量、pH、 NH_4^+ -N 含量、化学需氧量和溶解氧含量 (表 3), 即这 5 项指标是导致田间水质变化的主要因素。



1: pH, 2: 溶解氧含量, 3: 电导率, 4: 溶解性总固体含量, 5: 总 N 含量, 6: 总 P 含量, 7: NH_4^+ -N 含量, 8: NO_3^- -N 含量, 9: 化学需氧量; “*” 表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关 (Pearson 法)。

1: pH, 2: Dissolved oxygen content, 3: Electrical conductivity, 4: Total dissolved solid content, 5: Total N content, 6: Total P content, 7: NH_4^+ -N content, 8: NO_3^- -N content, 9: Chemical oxygen demand; “*” indicates significant correlation at $P < 0.05$ (Pearson method).

图 2 水体各指标间的相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis among all water indexes

表 3 最小数据集指标的公因子方差和权重

Table 3 Communalities and weight of indicators in minimal data set

指标 Index	公因子方差 Communality	权重 Weight
溶解性总固体含量 Total dissolved solid content	0.939	0.255
pH	0.744	0.202
NH_4^+ -N 含量 NH_4^+ -N content	0.663	0.180
化学需氧量 Chemical oxygen demand	0.559	0.152
溶解氧含量 Dissolved oxygen content	0.780	0.212

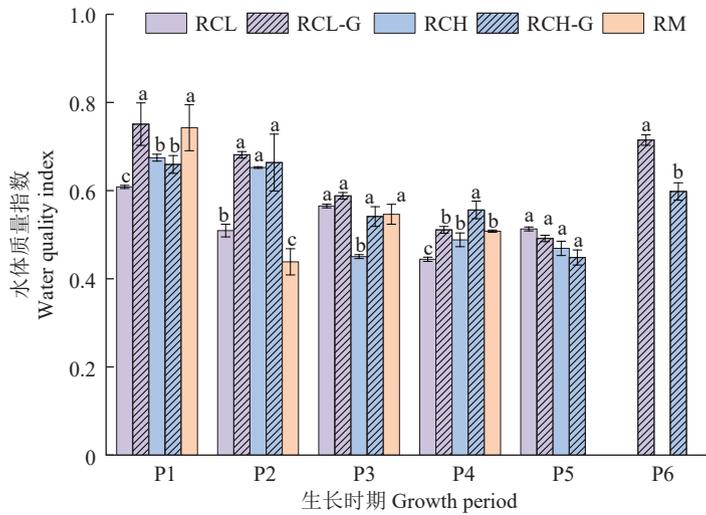
2.3.2 基于综合水质指数评价法的水质变化特征
对 3 种模式在水稻不同生长时期的水体样品分别计算 WQI, 结果如图 3 所示。在前 4 个生长时期, 所有处理的 WQI 均随水稻生长时期的推移呈下降趋势。在分蘖期, 低密度稻虾处理虾沟水体的

WQI 最高, 其次是水稻单作, 低密度稻虾处理田面水体最低; 在拔节期, 高密度稻虾处理田面水体的 WQI 显著高于低密度稻虾处理田面水体和水稻单作; 在孕穗期, 高密度稻虾处理田面水体的 WQI 显著低于其他处理; 在灌浆期, 低密度稻虾处理的 WQI 整体高于高密度稻虾处理, 但差异不显著; 在成熟期, 低密度稻虾处理虾沟水体的 WQI 达到 0.72, 显著高于高密度稻虾处理虾沟水体。

2.4 经济效益评价

2.4.1 水稻产量与产值 试验期间水稻的种植时间为 2022 年 6 月 14 日至 10 月 12 日, 低密度稻虾、高密度稻虾和水稻单作的水稻产量分别为 5.21、4.35 和 6.57 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 产值分别为 18 235、15 225 和 22 987 元 $\cdot \text{hm}^{-2}$; 单作的水稻产量与产值较高, 2 种稻虾综合种养模式中低密度处理的水稻产量与产值较高 (表 4)。

2.4.2 红螯螯虾产量与产值 本研究于 2022 年 7 月 10 日开始投放虾苗, 2022 年 10 月 9 日起捕, 连续捕捞 2 d, 养殖周期为 91 d。低密度和高密度稻



RCL: 低密度稻虾模式田面水体, RCL-G: 低密度稻虾模式虾沟水体, RCH: 高密度稻虾模式田面水体, RCH-G: 高密度稻虾模式虾沟水体, RM: 水稻单作模式田面水体; P1: 分蘖期, P2: 拔节期, P3: 孕穗期, P4: 扬花期, P5: 灌浆期, P6: 成熟期; 柱子上方的不同小写字母表示相同生长时期不同处理间差异显著 ($P < 0.05$, Duncan's 法)。

RCL: Surface water of low density rice-red crayfish model, RCL-G: Ditch water of low density rice-red crayfish model, RCH: Surface water of high density rice-red crayfish model, RCH-G: Ditch water of high density rice-red crayfish model, RM: Surface water of rice monocropping model; P1: Tillering stage, P2: Jointing stage, P3: Booting stage, P4: Flowering stage, P5: Filling stage, P6: Ripening stage; Different lowercase letters above the columns indicate significant differences among different treatments in the same growth period ($P < 0.05$, Duncan's method).

图 3 不同处理以及水稻不同生长时期的水质质量分析

Fig. 3 Analysis of water quality under different treatments and in different growth periods of rice

表 4 3 种处理的水稻产量与产值¹⁾

Table 4 Rice yield and output value in three treatments

处理 Treatment	有效穗数/($10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$) Number of productive ears	每穗总粒数 Total number of grains per panicle	结实率/% Setting percentage	千粒质量/g Thousand-seed weight	产量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$) Yield	产值/(元· hm^{-2}) Output value
LRC	212.2±2.7b	119.6±3.4a	80.1±0.9b	25.6±0.5b	5.21±0.03b	18 235±96b
HRC	206.2±2.9c	108.3±5.2b	80.3±0.4b	24.3±0.4c	4.35±0.01c	15 225±82c
R	230.6±4.4a	121.9±2.9a	85.1±0.3a	28.7±0.4a	6.57±0.20a	22 987±94a

1) LRC: 低密度稻虾, HRC: 高密度稻虾, R: 水稻单作; 水稻收购价格为 $3.5 \text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$, 水稻收购价格不考虑稻虾米溢价; 同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$, Duncan's 法)。

1) LRC: Low density rice-red crayfish, HRC: High density rice-red crayfish, R: Rice monocropping; The rice procurement price is $3.5 \text{ yuan} \cdot \text{kg}^{-1}$, and its purchase price does not take into account the premium of rice-red crayfish; Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$, Duncan's method).

虾处理的虾产量分别为 923 和 $752 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 产出投入比分别为 1.93 和 1.36 , 存活率分别为 79.3% 和 51.8% 。低密度养殖的红螯螯虾产量、产出投入比及存活率较高 (表 5)。

2 种稻虾复合模式产量与产值的统计结果如表 6 所示, 低密度和高密度稻虾处理的红螯螯虾产值分别为 $90 575$ 和 $73 356 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$, 大规格 (中青、大青、炮头) 红螯螯虾产量分别占总产量的 96.3% 和 95.8% ; 低密度养殖的大规格红螯螯虾占比和红螯螯虾产值较高。

2.4.3 经济效益分析 3 种模式的经济效益分析如表 7 所示, 除去成本, 低密度、高密度稻虾和水稻单

表 5 2 种放养密度稻虾复合模式中红螯螯虾产量指标¹⁾
Table 5 Production index of red crayfish in rice-red crayfish integrated systems of two stocking densities

处理 Treatment	产量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Production	产出投入比 Output-input ratio	存活率/% Survival rate
LRC	923±8a	1.93±0.10a	79.3±0.2a
HRC	752±8b	1.36±0.10b	51.8±0.3b

1) LRC: 低密度稻虾, HRC: 高密度稻虾; 同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$, t 检验)。

1) LRC: Low density rice-red crayfish, HRC: High density rice-red crayfish; Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between two treatments ($P < 0.05$, t -test).

表 6 2 种放养密度稻虾复合模式中红螯螯虾养殖产量及产值¹⁾

Table 6 Red crayfish production and output value in rice-red crayfish integrated systems of two stocking densities

处理 Treatment	产量/(kg·hm ⁻²) Production				产量占比/% Production proportion				产值/ (元·hm ⁻²) Output value
	小青 Small green	中青 Medium green	大青 Large green	炮头 Cannon head	小青 Small green	中青 Medium green	大青 Large green	炮头 Cannon head	
LRC	34.5±2.6a	412.5±2.5a	270.0±3.5b	205.5±4.3a	3.7	44.7	29.3	22.3	90 575±102a
HRC	31.5±3.5a	282.0±1.7b	310.5±4.1a	127.5±2.8b	4.2	37.5	41.3	17.0	73 356±139b

1) LRC: 低密度稻虾, HRC: 高密度稻虾; 小青、中青、大青和炮头售价分别为 64、85、100 和 128 元·kg⁻¹; 同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$, t 检验)。

1) LRC: Low density rice-red crayfish, HRC: High density rice-red crayfish; Small green is priced at 64 yuan·kg⁻¹, medium green 85 yuan·kg⁻¹, large green 100 yuan·kg⁻¹, cannon head 128 yuan kg⁻¹; Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between two treatments ($P < 0.05$, t -test).

表 7 3 种处理的经济效益对比¹⁾

Table 7 Comparison of economic benefits of three treatments

处理 Treatment	秧苗成本/ (元·hm ⁻²) Seedling cost	化肥成本/ (元·hm ⁻²) Fertilizer cost	饲料成本/ (元·hm ⁻²) Feed cost	虾苗成本/ (元·hm ⁻²) Shrimp seed cost	人工成本/ (元·hm ⁻²) Labor cost	田地租金/ (元·hm ⁻²) Land rent	水稻产值/ (元·hm ⁻²) Rice output	虾产值/ (元·hm ⁻²) Red crayfish output	收益/ (元·hm ⁻²) Profit
LRC	500	2 920	3 578	9 000	10 140	9 000	18 235	90 575	73 672±198a
HRC	500	2 920	4 155	12 000	10 140	9 000	15 225	73 356	49 866±221b
R	500	3 504			3 000	9 000	22 987		6 983±94c

1) LRC: 低密度稻虾, HRC: 高密度稻虾, R: 水稻单作; 收益数据后的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$, Duncan's 法)。

1) LRC: Low density rice-red crayfish, HRC: High density rice-red crayfish, R: Rice monocropping; Different lowercase letters after the profit data indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$, Duncan's method).

作的收益分别为 73 672、49 866 和 6 983 元·hm⁻², 低密度稻虾共作模式的收益更高。

3 讨论与结论

3.1 讨论

研究表明, 稻虾综合种养会对水体环境产生较大的影响^[13-14]。在稻虾共作期间, 稻田水位较浅会使得水体的理化因子更容易受到外界影响而发生变化, 系统研究水体理化因子的动态变化, 能够更全面地了解共作系统中的环境特征。本研究中, 3 种处理水体的多个指标间存在显著差异, 表明小龙虾养殖对水体具有显著影响。温度是影响小龙虾生长发育的重要环境因子^[15]。红螯螯虾生长的适宜水温为 24~30 °C, 当温度超过 35 °C 时, 开始出现死亡^[16]。本研究红螯螯虾的试验周期为 7—10 月, 水体温度为 23.3~34.7 °C, 基本符合虾的适应温度。水体 pH 是稻田生态系统中重要的非生物因素, 可以通过直接或间接影响其他因素来影响水稻生长^[17]。本研究中, 随着水稻生长时期推移, 3 个处理的水体 pH 均呈现下降趋势, 在低密度和高密度稻虾处理中有偏向酸性的变化, 但在水稻成熟期回归了弱碱性, 这可能与稻田的饲料投放有关^[18]。王世会等^[19]

同样研究发现稻渔综合种养模式会导致水体 pH 下降。溶解氧对虾的生长发育具有重要促进作用^[20]。本研究中, 环沟中水体的溶解氧含量大多显著高于田面, 这可能是由于虾沟中的气体交换相较于田面更为便利, 并且虾沟水体接收到更多的光照, 使得浮游植物释放更多的氧气^[21]。Bashir 等^[22]同样发现在稻渔综合种养模式中, 环沟水体的溶解氧含量明显高于田间水体。这种相对较高的溶解氧水平为稻虾综合种养模式中虾类的代谢活动提供了更为适宜的生态条件, 从而对虾的生长发育产生积极的影响^[23]。

N、P 作为动植物生长所需的必要营养元素, 在维持农业生态系统健康和促进作物生长中发挥着至关重要的作用^[24]。然而, 当过度投入 N、P 时不仅会导致水体中 N、P 元素过量积聚及水质恶化, 还可能造成水产品死亡^[25]。本试验中, 总 N、NO₃⁻-N 含量均随水稻生长时期推移先下降后上升, 这可能是因为水稻前期生长发育旺盛对 N 的吸收量较大, 后期随着小龙虾的生长, 投饵量逐渐增加, 从而导致水体中 N 素累积, 这与已往研究结果一致^[14, 26]。水体总 P 含量随水稻生长时期先下降后上升再下降, 稻虾处理水体总 P 的最大累积出现在水稻的灌浆期, 且高密度稻虾处理显著高于低密度稻虾处

理,这可能是由于此时临近小龙虾的收获期,开始加大饲料投喂,而高密度稻虾处理的饲料投喂量高于低密度稻虾处理,饲料在水体中有盈余,因此导致P素在水体中累积。化学需氧量是衡量水体中有机物质含量的指标,化学需氧量越大,说明水体受有机物污染越严重^[27]。本研究中,3种处理的化学需氧量随水稻生长时期推移无大的波动,但在成熟期高密度稻虾处理的化学需氧量显著高于低密度稻虾处理,可能是由于此时接近龙虾养殖尾声,加大了饲料投放量,而高密度稻虾处理的龙虾存活率较低密度稻虾低,投入的饲料有盈余,导致高密度稻虾处理的化学需氧量升高。Li等^[28]的研究也表明在稻虾综合种养系统中增加投饵量会导致水体化学需氧量显著上升。

水质评价是通过水体理化指标定量描述水体质量^[29],得到水体污染程度,为科学管理水体和防治水体污染提供理论依据^[30]。本研究使用的综合水质指数分析法广泛应用于各种水体的质量评价^[31-32];但是目前以分析河流和湖泊等自然生态系统为主,分析农业养殖水体质量的研究较少。随着养殖业的迅速发展,对水质的要求日益提高,近年来,WQI开始用于养殖水体的综合水质评价^[33]。本研究通过构建3种模式WQI的MDS,并进行比较与验证,发现溶解性总固体含量、pH、 NH_4^+-N 含量、化学需氧量和溶解氧含量这5项指标是导致田间水质变化的主要因素。2种稻虾模式虾沟内的水质在大多时期优于田面,这可能是由于虾的大部分活动在虾沟中,虾的活动会增加水体的溶解氧含量,水体中残余的养分也会被虾利用吸收。在水稻扬花期和灌浆期,整体上各处理间的WQI差异不大,而在水稻成熟期,低密度稻虾处理虾沟水体的WQI显著高于高密度稻虾处理虾沟水体,这可能是由于高密度模式的虾死亡率较高,投放的饵料有剩余,从而引起水质恶化。梁宇辉^[34]研究得出相较于小龙虾池塘精养模式和水稻单作模式,稻虾种养模式能够有效降低水质污染风险、提高生态效益;与本研究结果相似。水稻单作模式中,在水稻灌浆期前,为了便于水稻晒田需要进行排水处理;稻虾模式中,在水稻成熟期,为了便于水稻的收割和虾的捕捞需要进行排水处理。在本研究中,2种稻虾模式水质整体优于水稻单作模式,且低密度稻虾处理水质为3种模式中最优。相较于水稻单作模式,稻虾模式生态效益更好,降低养殖密度,给外环境带来的生态风险会更低。

稻渔综合种养从环境友好、高效增产、农民增

收等方面推动了绿色农业的高效发展^[35]。本研究以不同密度稻虾种养和水稻单作为研究主体,探讨了水稻产量与产值、红螯螯虾产量与产值、种养阶段经济效益的变化情况。研究结果表明,相较水稻单作,2种稻虾模式的水稻产量与产值有所下降,其中高密度模式下下降更多。低密度稻虾处理的红螯螯虾产量、产出投入比、存活率均高于高密度稻虾,这可能是由于高密度处理的虾投入量过大,压缩了生长活动空间,加强了种内竞争,使虾存活率降低,最终导致红螯螯虾产量降低^[36]。低密度稻虾处理的红螯螯虾产值高于高密度稻虾处理,这可能是由于低密度稻虾处理的虾产量较高,且炮头虾产量的占比较高。研究结果说明低密度稻虾处理的虾投放密度较合理,给虾提供足够的生长空间。王晨等^[37]研究发现,水稻单作模式的生产成本显著低于稻鱼综合种养模式,但稻鱼综合种养模式的经济效益显著高于水稻单作模式;本研究结果也得到了类似的结论。通过对3种模式的经济效益进行对比,发现2种稻虾模式的收益显著高于水稻单作,提升6~9倍。这可能是因为在不需要过多增加成本的情况下,收获了额外的产品红螯螯虾,大大增加了收入。在2种稻虾处理中,低密度稻虾处理的经济效益是高密度稻虾的1.47倍,这主要是由于低密度稻虾处理中虾的产出投入比和存活率较高,导致其红螯螯虾产值显著高于高密度稻虾。因此,在稻虾综合种养模式中,选择合适的放养密度,有助于充分利用水体中的养分,防止过度竞争和资源浪费,以实现最佳的经济效益和环境效益。

3.2 结论

1) 多个水体理化指标在不同处理和不同生长期间呈现显著差异。WQI和MDS分析表明:溶解性总固体含量、pH、 NH_4^+-N 含量、化学需氧量和溶解氧含量这5项水体理化指标是导致田间水质变化的主要因素。

2) 在水稻成熟期,低密度稻虾综合种养模式的WQI显著高于高密度稻虾综合种养模式,且具有较高的经济效益;因此在稻虾综合种养模式中需选择合适的虾养殖密度,这对于提高稻田环境效益和经济效益均具有一定的意义。

参考文献:

- [1] 康绍忠. 藏粮于水 藏水于技: 发展高水效农业 保障国家粮食安全[J]. 中国水利, 2022(13): 1-5.
- [2] DENG N, GRASSINI P, YANG H, et al. Closing yield gaps for rice self-sufficiency in China[J]. Nature Communications, 2019, 10: 1725.

- [3] 程敏. 农业面源污染对农村地表水的影响与对策[J]. 化工设计通讯, 2023, 49(12): 185-187.
- [4] 张佳卓. 中国农业面源污染区域差异及其影响因素分析[D]. 昆明: 云南财经大学, 2020.
- [5] 唐建军, 李巍, 吕修涛, 等. 中国稻渔综合种养产业的发展现状与若干思考[J]. 中国稻米, 2020, 26(5): 1-10.
- [6] 万玉霞. 探究稻虾共生高效生态种养模式与效益[J]. 种子科技, 2019, 37(5): 24.
- [7] HOU J, STYLES D, CAO Y, et al. The sustainability of rice-crayfish coculture systems: A mini review of evidence from Jiangnan Plain in China[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(9): 3843-3853.
- [8] WU Y, LI Y, NIU L, et al. Nutrient status of integrated rice-crayfish system impacts the microbial nitrogen-transformation processes in paddy fields and rice yields[J]. Science of the Total Environment, 2022, 836: 155706.
- [9] 黄国林, 曾斌, 李卫东, 等. 湖南环洞庭湖区稻渔综合种养发展模式与优化建议[J]. 湖南农业科学, 2019(12): 59-63.
- [10] NIHALANI S, MEERUTY A. Water quality index evaluation for major rivers in Gujarat[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(45): 63523-63531.
- [11] SUTADIAN A D, MUTTIL N, YILMAZ A G, et al. Development of river water quality indices: A review[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 188(1): 58.
- [12] 魏征. 盐胁迫对不同水稻品种生理特性和产量的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2023.
- [13] 瞿梦洁, 韩玉成, 万智鹏, 等. 稻虾共作水域沉积物有机磷农药残留特征及其对磷循环驱动机制[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(2): 434-442.
- [14] 韩光明, 吴雷明, 张家宏, 等. 稻虾共作模式下不同投饲率对稻、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), 2022, 43(5): 10-17.
- [15] LIU K W, ZHU J Q, LIU K Q, et al. Assessment of precipitation suitable degree from integrated rice-crayfish farming systems in Jiangnan Plain of China[J]. Journal of Agrometeorology, 2022, 24(2): 123-132.
- [16] 李进. 水环境理化因子对红螯螯虾繁殖性能和幼体发育的影响研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [17] LI T, ZHANG B, ZHU C, et al. Effects of an ex situ shrimp-rice aquaponic system on the water quality of aquaculture ponds in the Pearl River estuary, China[J]. Aquaculture, 2021, 545: 737179.
- [18] NAYAK P K, NAYAK A K, PANDA B B, et al. Ecological mechanism and diversity in rice based integrated farming system[J]. Ecological Indicators, 2018, 91: 359-375.
- [19] 王世会, 赵志刚, 罗亮, 等. 放养密度对寒区稻-扣蟹共作模式中河蟹生长及水质的影响[J]. 水产学杂志, 2023, 36(2): 100-108.
- [20] 舒斌, 李军涛, 张秀霞, 等. 环境因子对克氏原螯虾 *Procambarus clarkii* 免疫指标影响的研究进展[J]. 水产学杂志, 2020, 33(4): 75-80.
- [21] LI Y F, WU T Y, WANG S D, et al. Developing integrated rice-animal farming based on climate and farmers choices[J]. Agricultural Systems, 2023, 204: 103554.
- [22] BASHIR M A, WANG H, SUN W, et al. The implementation of rice-crab co-culture system to ensure cleaner rice and farm production[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 316: 128284.
- [23] 李志福, 吴永红, 刘雪梅, 等. 基于稻虾共作系统水稻收割后水体水质及沉积物重金属风险评估[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2024(1): 122-33.
- [24] FARZADFAR S, KNIGHT J D, CONGREVES K A. Soil organic nitrogen: An overlooked but potentially significant contribution to crop nutrition[J]. Plant and Soil, 2021, 462(1): 7-23.
- [25] AKHTAR N, ISHAK M I S, BHAWANI S A, et al. Various natural and anthropogenic factors responsible for water quality degradation: A review[J]. Water, 2021, 13(19): 2660.
- [26] 倪明理. 投食对稻虾共作生态系统氮素利用的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- [27] 侯应霞, 苏应兵. 稻田小龙虾生态养殖模式的效益比较[J]. 养殖与饲料, 2024, 23(1): 13-19.
- [28] LI F, FENG J, ZHOU X, 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.
- [29] 徐若诗, 逢勇, 罗缙, 等. 基于 WQI 的南水北调东线江苏段水质评价及时空分布特征[J]. 环境科学, 2024, 45(9): 5227-5234.
- [30] 富天乙, 邹志红, 王晓静. 基于多元统计和水质标识指数的辽阳太子河水质评价研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(2): 473-480.
- [31] 曹阳阳. 改进层次分析法在地表水质评价中的应用[J]. 水利科技与经济, 2023, 29(9): 41-46.
- [32] 陈华, 张倩, 王照丽, 等. 基于主成分分析与聚类分析的水质综合评价研究[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(26): 88-92.
- [33] MA Z, LI H, YE Z, et al. Application of modified water quality index (WQI) in the assessment of coastal water quality in main aquaculture areas of Dalian, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, 157: 111285.
- [34] 梁宇辉. “双水双绿”稻虾种养模式水质变化和养分收支研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- [35] 管卫兵, 刘凯, 石伟, 等. 稻渔综合种养的科学范式[J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5451-5464.
- [36] 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.
- [37] 王晨, 胡亮亮, 唐建军, 等. 稻鱼种养型农场的特征与效应分析[J]. 农业现代化研究, 2018, 39(5): 875-882.