

李天沛, 汪小昆, 施印炎, 等. 南京市江宁区鱼菜共生技术的综合效益评价与分析 [J]. 华南农业大学学报, 2024, 45(6): 966-974.
LI Tianpei, WANG Xiaochan, SHI Yinyan, et al. Evaluation and analysis of comprehensive benefits of aquaponics technology in Jiangning District, Nanjing City[J]. Journal of South China Agricultural University, 2024, 45(6): 966-974.

南京市江宁区鱼菜共生技术的综合效益评价与分析

李天沛, 汪小昆, 施印炎, 卢美光, 钱大伟

(南京农业大学 工学院, 江苏 南京 210031)

摘要:【目的】鱼菜共生技术结合水产养殖和作物栽培优势, 具有氮素转化利用率高、节水减排的特点, 可以实现经济和环境效益双赢; 但鱼菜共生生产过程涉及的经济和环境指标多, 当前缺乏对该生产模式进行综合效益评价的研究。本研究对鱼菜共生系统的环境和经济效益进行量化分析并进行系统性评价与比较, 以期对鱼菜共生技术的定性定量分析和研究提供新思路。【方法】基于南京市江宁区鱼菜共生农场的实际建造和运营数据, 以环境效益和经济效益为主要评价指标, 通过经验公式法计算单一水产养殖氮排放量以及采用鱼菜共生技术时相关氮损失和氮转化量, 并通过实测法定性、定量计算鱼菜共生系统氮转化和排放量, 基于农场问卷和调研结果计算鱼菜共生系统的各项经济指标。【结果】采用鱼菜共生技术后, 全氮排放量比单一水产养殖模式减少 99.45%, 总氨氮排放量减少 99.73%; N_2O 排放和微生物固定转化造成较多的氮损失, N_2O 排放量和微生物同化的氮损失量分别是水中全氮排放量的 4.58 和 48.60 倍; 硝化细菌对 $NO_2^- - N$ 的降解增强, 水质更利于鱼类生存。鱼菜共生农场启动的第 1 年, 建设成本占比 55.21%, 超过其余各项支出的总和。饲料成本是鱼菜共生农场运行时的主要成本来源, 占比达 73.96%。水产养殖收入在总收入中占比 89.74%, 是种植收入和服务收入总和的 8.75 倍。【结论】本研究建立了科学的鱼菜共生综合效益评价体系, 对鱼菜共生技术的生态效益和经济效益评价有一定的指导意义, 可为鱼菜共生技术的研究和应用提供多维度参考。

关键词: 鱼菜共生; 水产养殖; 环境效益; 经济效益; 氮排放

中图分类号: S964; X822

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2024)06-0966-09

Evaluation and analysis of comprehensive benefits of aquaponics technology in Jiangning District, Nanjing City

LI Tianpei, WANG Xiaochan, SHI Yinyan, LU Meiguang, QIAN Dawei

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: 【Objective】Aquaponics technology combines the advantages of aquaculture and crop cultivation, featuring high nitrogen conversion utilization ratio as well as water saving and emission reduction, realizing a win-win situation for both economic and environmental benefits, but aquaponics system involves many economic and environmental indicators, and there are fewer current studies on comprehensive benefit evaluation

收稿日期: 2024-06-27 网络首发时间: 2024-09-25 14:49:41

首发网址: <https://link.cnki.net/urlid/44.1110.S.20240925.1313.002>

作者简介: 李天沛, 博士研究生, 主要从事综合种养技术与装备研究, E-mail: ltpnjau@foxmail.com; 通信作者: 汪小昆, 教授, 博士, 主要从事农业机械化及自动化、智能农机装备、智慧化水产养殖技术研究, E-mail: wangxiaochan@njau.edu.cn

基金项目: 江苏省重点研发计划 (现代农业)(BE2021362)

of this production model. In this study, the environmental and economic benefits of aquaponics systems were quantitatively analyzed, systematically evaluated and compared, with a view to providing new ideas for qualitative and quantitative analyses and research on aquaponics technology. 【Method】Based on the actual construction and operation data of the aquaponics farm in Jiangning District of Nanjing City, this study took environmental and economic benefits as two main evaluation indexes, calculated nitrogen emission of the single aquaculture mode as well as related nitrogen loss and nitrogen transformation in the aquaponics through the empirical formula method, qualitatively and quantitatively calculated nitrogen transformation and emission of the aquaponics system through the measurement method, and calculated the economic indexes of the aquaponics system based on the questionnaire of the farm and the results of the research. 【Result】After adopting aquaponics technology, the total nitrogen emission was reduced by 99.45% and the total ammonia nitrogen emission was reduced by 99.73% compared with the single aquaculture mode; N_2O emission and microbial assimilation caused more nitrogen loss, were 4.58 and 48.60 times more than total nitrogen emission in water, respectively; The degradation of $\text{NO}_2^- \text{-N}$ by nitrifying bacteria was enhanced, the water quality was more conducive to the survival of fish. In the first year of aquaponics farm, the construction cost accounted for 55.21%, which exceeded the sum of other expenditures. Feed cost was the main source of cost when running the aquaponics farm, accounting for 73.96%. Aquaculture income accounted for 89.74% of the total income, which was 8.75 times more than the sum of planting income and service income. 【Conclusion】This study establishes the scientific comprehensive benefit evaluation system of aquaponics, which has certain guiding significance for the evaluation of ecological and economic benefits of aquaponics technology, and can provide multi-dimensional references for the research and application of aquaponics technology.

Key words: Aquaponics; Aquaculture; Environmental benefit; Economic benefit; Nitrogen emission

2019 年农业农村部等十部委联合印发的《关于加快推进水产养殖业绿色发展的若干条意见》指出,我国农业资源高度消耗的经营方式尚未改变。饲料作为主要氮源,占淡水养殖成本的 50%~70%^[1],只有 25%(w) 的氮源被转化为鱼体蛋白质^[2],其余以氮化物的形式排放到环境中,造成资源浪费和环境污染。国内水产养殖业水污染物中,氮化物对环境的污染和对水产品质量的影响最为显著^[3]。鱼菜共生技术结合水产养殖与作物栽培的优势,将氮素进行多层次的转化利用,降低资源浪费的同时减少养殖污水排放^[4],可产出多种农产品,实现环境效益和经济效益双赢。

近年来,南京市江宁区大力支持和发展设施农业,区域内设施农业面积占全区耕地总面积的 22.6%^[5],但该区设施农业种养殖模式落后,水产饲料浪费严重,农产品产量和质量低,水产养殖废水排放多,环境效益和经济效益受到影响。当今关于鱼菜共生技术的研究多集中于鱼菜共生的种养殖技术^[6]、物联网应用^[7]、硝化过程^[8-9]和工程创新^[10-11]等方面,关于效益的分析局限于效益可行性总结和宏观分析^[12-13],缺乏对鱼菜共生系统环境和经济效益的量化分析,也未有成体系的环境和经济效益评

价与比较方法,不利于鱼菜共生技术的定性定量分析和研究推广。

综合效益分析主要包括经济效益、环境效益(又称生态效益)和社会效益,本文基于南京市江宁区某鱼菜共生农场的实际建造和运营数据,以环境效益和经济效益为 2 个主要评价方向,在环境效益中选择全氮、总氮氮、亚硝酸盐氮含量等 7 个指标,在经济效益中选择建设成本、饲料成本、鱼苗成本等 12 个成本指标以及养殖收入、种植收入和服务收入 3 个收入指标进行分析。本研究比较经验公式法和实测法定性定量计算氮转化和排放量,分析鱼菜共生系统的经济性评价指标和方法,旨在建立科学的鱼菜共生综合效益评价体系,指导鱼菜共生技术的生态效益和经济效益评价,为鱼菜共生技术的研究和应用提供多维度参考。

1 试验设计与方法

1.1 试验设计

试验农场位于南京市江宁区陆郎镇牌坊社区龙坊路 8 号(31°47'43.3"N, 118°40'18.4"E),大棚总面积 4 000 m²。如图 1 所示,单个解耦型种养单元的面积为 143 m²,主要由养殖池、栽植池、过滤池和沉

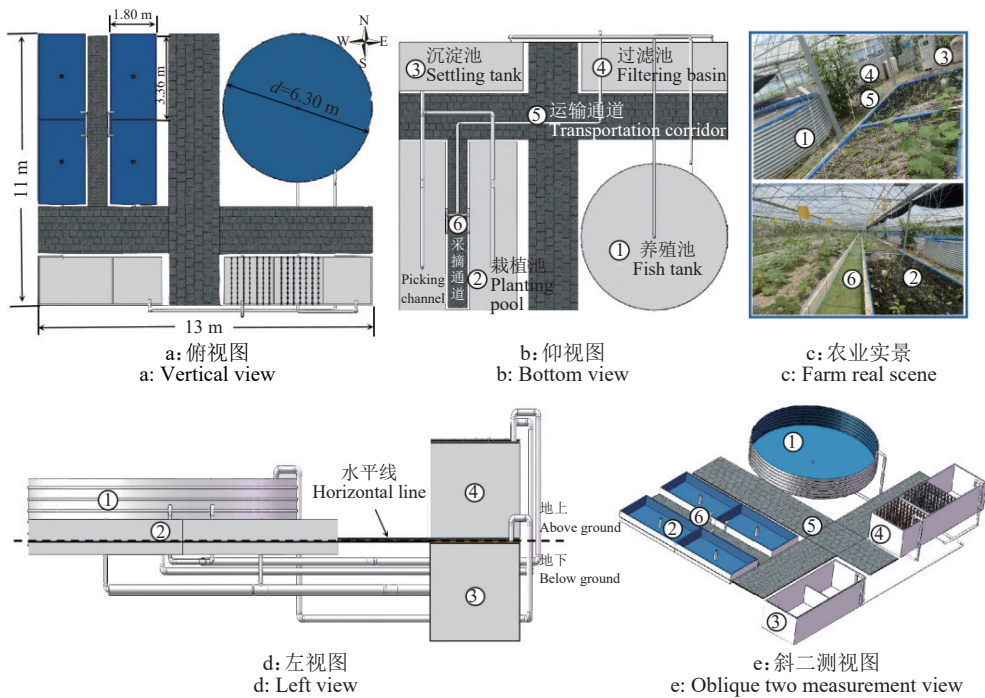


图 1 农场试验区种养单元示意图
Fig. 1 Schematic diagram of farming units in the farm trial area

淀池组成, 1 个养殖池 (面积 31.17 m²、体积 56.11 m³) 配套 4 个栽植池 (单个面积 6.05 m²、体积 3.33 m³)。其中各种养单元间留有宽 2 m 的运输通道, 栽植池间留有宽 0.5 m 的采摘通道, 过滤池内建设有 3 个顺次连通的隔间, 可实现对养殖尾水的多道过滤和降解 (首道滤池隔间作为缓冲隔间, 不挂载滤材, 用于大颗粒杂质的沉降; 次道滤池隔间挂载黑色十字毛丝过滤刷; 末道滤池隔间挂载中空石英培菌柱)。养殖池和栽植池均采用部分埋地式, 可实现种养殖环境温度的相对稳定; 养殖池埋地深度为 0.5 m, 栽植池埋地深度为 0.2 m。养殖初期投养罗非鱼 *Oreochromis mossambicus*, 鱼苗规格为 600 尾/kg, 每个养殖池总投养鱼苗约 5 000 尾。栽植池中种植有圣女果 *Lycopersicon esculentum* var. *cerasiforme*、番茄 *Solanum lycopersicum* L. 等应季蔬菜。养殖池投饲由专人负责, 根据农业生产和养殖经验进行系统的运行和维护。

养殖过程采用人工定时、定点投饲, 24 h 内投饲 3 次 (06:00、11:00、17:30), 鱼饲类型为海水鱼膨化配方饲料, 由江苏长寿集团南山饲料 (锦农) 有限公司提供。初始鱼苗养殖密度约 100 尾/m³, 收获时养殖密度约 94 尾/m³, 养殖期间平均投喂率约 2%(w)。养殖池、过滤池和栽植池间通过自吸泵不间断供水, 沉淀池向养殖池间歇性回水 (回水周期 14~15 min, 回水时长 9.5~10.5 min, 停止回水时长 5.5 min)。栽植池中的蔬菜 20 d 收获 1 次, 每次收获产量为 4 kg/m²。

1.2 试验方法

根据试验目的测定水样的全氮 (Total nitrogen, TN)、总氨氮 (Total ammonia nitrogen, TAN)、亚硝酸盐氮 (NO₂⁻-N)、硝酸盐氮 (NO₃⁻-N) 含量 4 个参数, 分别参照《水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾氧化紫外分光光度法》(HJ 636—2012)^[14]、《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》(HJ 535—2009)^[15]、《水质 亚硝酸盐氮的测定 分光光度法》(GB/T 7493—1987)^[16]、《水质 硝酸盐氮的测定 紫外分光光度法 (试行)》(HJ/T 346—2007)^[17] 测定。饲料、鱼体和植株中的全氮含量由凯氏定氮仪 (BUCHI KjellFlex K-360, BUCHI Labortechnik AG, CH) 测定, 配套自动电位滴定仪 (877 Titrino plus)。在种养单元中设置 4 处取样位置, 分别位于栽植池、沉淀池、过滤池和养殖池, 根据各部分水质参数质量浓度和体积计算系统水质参数的平均值。

2 综合效益评价方法

2.1 环境效益

为量化鱼菜共生系统相比单一水产养殖对减少氮排放的突出作用, 有必要对单一水产养殖和鱼菜共生系统进行环境效益分析, 本研究采用经验公式法计算单一水产养殖氮排放量以及采用鱼菜共生技术时相关氮损失和氮转化量, 用实测法计算鱼菜共生系统氮转化和排放量。

2.1.1 经验公式法计算生产单位质量 (1 000 kg) 水产品的氮排放量 有研究^[18] 表明, 饲料转化比 (Feed

conversion ratio, FCR) 和养殖尾水中氮、磷等废弃物含量存在线性关系, 本研究 FCR 计算公式如下:

$$FCR = \frac{W_{\text{feed}}}{\Delta W_{\text{fish}}} = \frac{n_{\text{feed}} W_{\text{feed}}}{W_{\text{fish}} - w_{\text{fish}}}, \quad (1)$$

式中, W_{feed} 为单个养殖池 1 个生产批次的饲料投喂量, kg; ΔW_{feed} 为单个养殖池 1 个生产批次鱼总产量的增量, kg; n_{feed} 为投饲天数, d; w_{feed} 为单个养殖池日投喂量, kg; W_{fish} 为单个养殖池生产的成鱼质量, kg; w_{fish} 为单个养殖池投养的鱼苗质量, kg。

1) 不采用鱼菜共生技术时, 在单一水产养殖条件下, Tacon 等^[19] 和 Martinez-Porchas 等^[20] 研究得出 FCR 与生产单位质量水产品的全氮排放量 (W_{TN}) 存在如下关系, FCR=1.0 时, $W_{\text{TN}}=26$ kg; FCR=2.5 时, $W_{\text{TN}}=117$ kg。据此建立 FCR 与 W_{TN} 的线性表达式如下:

$$W_{\text{TN}} = 60.7\text{FCR} - 34.7. \quad (2)$$

2) 不采用鱼菜共生技术时, 在单一水产养殖条件下, 生产单位质量水产品的总氨氮的近似排放量 (W_{TAN}) 可用如下公式^[21] 计算:

$$W_{\text{TAN}} = w_{\text{feed}} n_{\text{feed}} P_{\text{protein}} P_{\text{p-T}}, \quad (3)$$

式中, P_{protein} 为饲料中蛋白质的含量, %; $P_{\text{p-T}}$ 为每单位质量蛋白质输入鱼排泄总氨氮的系数。

3) 采用鱼菜共生技术时, 水产品转化饲料中 20%~30%(w) 的氮, 饲料中 10%~37% 的氮释放到水中被植物吸收, 43%~65% 通过气体 (N_2O 、 N_2 等) 挥发等途径损失, 在鱼菜共生系统中反硝化细菌数量少、 NO_2^- 和 O_2 抑制^[22-23]、有机碳缺乏和 pH 低^[24-25] 等因素都会导致 N_2O 的产生。每生产单位质量水产品 N_2O 的排放量 ($w_{\text{N}_2\text{O}}$) 可用如下公式计算:

$$w_{\text{N}_2\text{O}} = w_{\text{feed}} n_{\text{feed}} P_{\text{TN}} P_{\text{N}_2\text{O}}, \quad (4)$$

式中, P_{TN} 为饲料中全氮含量, %, 不同配方饲料的全氮含量不尽相同, 本文采用凯氏定氮法实测得到饲料中 P_{TN} 为 6.21%; $P_{\text{N}_2\text{O}}$ 为鱼菜共生系统中产生 N_2O 占氮投入的百分比, %, $P_{\text{N}_2\text{O}}=1.5\%\sim 1.9\%$ ^[22], 本研究取中值 1.7%。

在鱼菜共生系统中异养、好氧细菌与硝化细菌共存, 异养细菌消耗鱼类产生的 NH_4^+ , 约 70% 的能量用于细胞合成^[21], 当有机碳浓度或 C:N 增加时, 异养细菌占主导地位, 缺氧条件下过量的微生物以污泥的形式产生氮损失。有研究^[26] 指出异养生物量约占水产养殖系统鱼类饲料的 7%, 因此生产单位质量水产品, 异养细菌在同化过程中的氮损失量 ($w_{\text{h-micro}}$) 可用如下公式计算:

$$w_{\text{h-micro}} = 0.16 w_{\text{feed}} n_{\text{feed}} P_{\text{micro}}, \quad (5)$$

式中, P_{micro} 为异养生物量占鱼类饲料的百分比, %, 本研究取 7%。

在鱼菜共生系统的运行过程中, NH_3 挥发造成的氮损失非常少, pH 高于 8.0 时曝气和混合才会增加 NH_3 挥发率, 在中性 pH 下 NH_3 浓度较低^[27]; 本研究的循环系统中, 各处循环水的 pH 均在 7.0 以下, 故 NH_3 挥发造成的氮损失可忽略不计。

4) 通过经验公式法计算鱼菜共生系统每生产单位质量水产品被蔬菜吸收转化的氮排放量。假定在案例农场中罗非鱼平均投饲质量为鱼体质量的 1.25%, 饲料蛋白中氮含量为 16%, 此时罗非鱼估计生长量 $w_{\text{fish}}(t)$ 曲线可表示为时间 (t) 的函数 $(2 \times 10^{-5})t^{3.0421}$, 单位面积蔬菜的生长量 $w_{\text{vegetable}}(t)$ 可使用 Richard 函数^[28] 表示为时间 (t) 的函数 $14.3(1 + e^{5.04 - 0.074t})^{-1/0.893}$ 。修正后的鱼菜共生系统中蔬菜的氮吸收方程如下:

$$\begin{cases} n_{\text{vegetable}}(t) = g e^{-kw(t)} + h \\ w_{\text{na}}(t) = a w_{\text{vegetable}}(t) n_{\text{vegetable}}(t) \\ W_{\text{na}} = \int_0^t w_{\text{na}} dt \end{cases}, \quad (6)$$

式中, W_{na} 为生产单位质量水产品时蔬菜的氮吸收量, g; w_{na} 为单位面积蔬菜的氮吸收量, g/m²; $w_{\text{vegetable}}(t)$ 为单位面积蔬菜鲜质量, kg/m²; $n_{\text{vegetable}}(t)$ 为蔬菜鲜质量中的氮含量, g/kg; a、g、k、h、e 为回归常数, 无量纲; 其中, t 值由边界条件公式 $\int_0^t (2 \times 10^{-5})t^{3.0421} dt = 1 \times 10^6$ g 求得, 且 $t=0$ 时, $w_{\text{fish}}(0)=0$, $w_{\text{na}}(0)=0$ 。

2.1.2 实测法计算鱼菜共生系统的氮排放量 本研究的案例农场采用了鱼菜共生技术, 养殖过程中的氮素一部分被蔬菜吸收转换, 一部分被作物种植基质固定, 一部分溶解在养殖水体中 (净氮排放量), 少部分以 NO 、 N_2 、 NH_3 、 N_2O 等气体形式排放到大气中, 因此需分别对各部分氮素进行计算。

1) 鱼菜共生系统中每生产单位质量水产品的净氮排放量。在本案例农场中, 同批次鱼养殖过程中不更换养殖水, 最终向水体的氮素排出量为水产收获时水体的氮素浓度, 在鱼池水平面下 20 cm 处重复取样 3 次, 测量取平均值。

生产单位质量水产品的氮素 (TAN 、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N 和 TN) 排放量的 (w) 的计算公式为:

$$w = 10^{-3} \bar{\rho} V, \quad (7)$$

式中, w 分别代表 w_{TAN} 、 $w_{\text{NO}_2^-}$ -N、 $w_{\text{NO}_3^-}$ -N 和 w_{TN} ; $\bar{\rho}$ 为同批次水产收获时水体中对应氮素的平均质量

浓度, mg/L; V 为生产单位质量水产品的水体总体积, m^3 , 包括养殖池、栽植池、沉淀池、过滤池和循环管道中的水体积。

2) 鱼菜共生系统每生产单位质量水产品被蔬菜吸收转化的氮排放量。不同蔬菜全氮含量略有差异, 根据文献资料和实验室自测数据, 鱼菜共生系统中常见种植蔬菜的全株氮素含量如表 1 所示。

表 1 鱼菜共生系统中常见种植蔬菜全株氮素含量 (w)
Table 1 Nitrogen content in whole plant of common cultivated vegetables in aquaponics system

蔬菜 Vegetable	w/%	数据来源 Data source
圣女果 <i>Lycopersicon esculentum</i> var. <i>cerasiforme</i>	2.685	实测
番茄 <i>Solanum lycopersicum</i> L.	2.298	实测
生菜 <i>Lactuca sativa</i> L.	3.750	[29]
油菜 <i>Brassica napus</i> L.	2.550	[30]
蕹菜 <i>Ipomoea aquatica</i> Forssk.	3.230	[31]

本案例农场水产养殖总体积为 $1\,683.3\text{ m}^3$, 栽植区总面积为 762.3 m^2 , 1 年可收获水产品 2 批次

(每批次收获 $50\,000\text{ kg}$), 在同一批次水产品的养殖过程中可收获蔬菜 9 次 (共 $12\,500\text{ kg}$), 即每生产 $1\,000\text{ kg}$ 水产品可同时收获蔬菜 250 kg 。

则鱼菜共生系统中每生产单位质量水产品被蔬菜吸收转化的氮排放量 (w'_{na}) 可用下式计算:

$$w'_{\text{na}} = \bar{p}w'_{\text{planting}}, \tag{8}$$

式中, \bar{p} 为各种蔬菜平均全株氮素含量, %; w'_{planting} 为每生产单位质量水产品可生产蔬菜的质量, kg 。

2.2 经济效益

设施农业比传统农业的投入成本高, 在建设前期给农户造成较大的压力。鱼菜共生系统在设施农业基础上还增加了栽植池、养殖池、循环管道和过滤池等设施的建设成本, 因此有必要对该系统做经济效益分析。根据实地调研和访谈, 本研究统计了建设成本 (C_{build})、土地租金 (C_{rent})、鱼苗成本 (C_{fish})、菜苗成本 ($C_{\text{vegetable}}$)、饲料成本 (C_{feed})、人工成本 (C_{labor})、电力成本 (C_{electric})、菌剂及防虫成本 (C_{medicine})、广告成本 ($C_{\text{propaganda}}$) 以及其他支出 (C_{other}) 共 10 部分支出, 各项成本指标计算公式如表 2 所示, 各项参数均以 1 个自然年计。

表 2 鱼菜共生系统各项成本指标计算公式
Table 2 Calculation formulas of each cost index in aquaponics system

指标 Index	计算公式 Calculation formula	参数含义 Parameter meaning	参数取值 Parameter value
建设成本 C_{build}	$C_{\text{build}} = C_{\text{green house}} + C_{\text{system}}$	$C_{\text{green house}}$ 为大棚建设成本, 万元; C_{system} 为系统建设成本, 万元	$C_{\text{green house}}=170$, $C_{\text{system}}=80$
土地租金 C_{rent}	$C_{\text{rent}} = S_{\text{build}}P_{\text{rent}}/10\,000$	S_{build} 为鱼菜共生农场使用面积, m^2 ; P_{rent} 为单位面积年土地租金, 元	$S_{\text{build}}=4\,000$, $P_{\text{rent}}=0.90$
鱼苗成本 C_{fish}	$C_{\text{fish}} = n_{\text{a}}n_{\text{b}}w_{\text{fish}}P_{\text{fish}}/10\,000$	n_{a} 为养殖池个数; n_{b} 为 1 年内水产养殖批次; w_{fish} 为单个养殖池投养的鱼苗质量, kg ; P_{fish} 为鱼苗单价, 元· kg^{-1}	$n_{\text{a}}=30$, $n_{\text{b}}=2$, $w_{\text{fish}}=8.30$, $P_{\text{fish}}=270$
菜苗成本 $C_{\text{vegetable}}$	$C_{\text{vegetable}} = n_{\text{c}}n_{\text{d}}S\sigma_{\text{c}}P_{\text{vegetable}}/10\,000$	n_{c} 为 1 年内蔬菜种植批次; n_{d} 为栽植池个数; S 为单个栽植池面积, m^2 ; σ_{c} 为栽植池种植密度, 株· m^{-2} ; $P_{\text{vegetable}}$ 为菜苗单价, 元·株 $^{-1}$	$n_{\text{c}}=12$, $n_{\text{d}}=126$, $S=6.05$, $\sigma_{\text{c}}=22$, $P_{\text{vegetable}}=0.06$
饲料成本 C_{feed}	$C_{\text{feed}} = n_{\text{a}}n_{\text{feed}}w_{\text{feed}}P_{\text{feed}}/10\,000$	n_{feed} 为投饲天数, d; w_{feed} 为单个养殖池日投喂量, kg ; P_{feed} 为饲料单价, 元· kg^{-1}	$n_{\text{a}}=30$, $n_{\text{feed}}=365$, $w_{\text{feed}}=15$, $P_{\text{feed}}=9.13$
人工成本 C_{labor}	$C_{\text{labor}} = n_{\text{labor}}t_{\text{labor}}P_{\text{labor}}$	n_{labor} 为工人数量; t_{labor} 为工作时长, 月; P_{labor} 为每月每人工资, 万元·月 $^{-1}$	$n_{\text{labor}}=2$, $t_{\text{labor}}=12$, $P_{\text{labor}}=0.50$
电力成本 C_{electric}	$C_{\text{electric}} = t_{\text{electric}}EP_{\text{electric}}/10\,000$	E 为 1 年内每月平均用电量, $\text{kW}\cdot\text{h}$; t_{electric} 为用电时长, 月; P_{electric} 为农业用电单价, 元·($\text{kW}\cdot\text{h}$) $^{-1}$	$E=10\,020$, $t_{\text{electric}}=12$, $P_{\text{electric}}=0.50$
菌剂及防虫成本 C_{medicine}	$C_{\text{medicine}} = C_{\text{aquaculture}} + C_{\text{hydroponic}}$	$C_{\text{aquaculture}}$ 为水产养殖使用硝化细菌等菌剂的成本, 万元; $C_{\text{hydroponic}}$ 为作物栽培的防虫成本(粘虫板等), 万元	$C_{\text{aquaculture}}=1.00$, $C_{\text{hydroponic}}=0.05$
广告成本 $C_{\text{propaganda}}$			$C_{\text{propaganda}}=0.05$
其他支出 C_{other}	$C_{\text{other}} = C_{\text{transport}} + C_{\text{pack}} + C_{\text{meal}}$	$C_{\text{transport}}$ 为每年运输及设备损耗费, 万元; C_{pack} 为每年种养殖农产品包装费, 万元; C_{meal} 为年均农场工人餐费, 万元	$C_{\text{transport}}=12.50$, $C_{\text{pack}}=5.00$, $C_{\text{meal}}=1.20$

本研究统计了养殖收入、种植收入和服务收入共3部分收入。年总收入(I)为:

$$I=I_{\text{cultivation}}+I_{\text{planting}}+I_{\text{survice}}=w_{\text{cultivation}}P_{\text{cultivation}}/10\,000+w_{\text{planting}}P_{\text{planting}}/10\,000+I_{\text{else}},\tag{9}$$

式中, $I_{\text{cultivation}}$ 为年水产养殖总收入,万元; I_{planting} 为年种植总收入,万元; I_{survice} 为服务收入,万元; $w_{\text{cultivation}}$ 为水产养殖年产量,kg; $P_{\text{cultivation}}$ 为水产养殖成鱼商品市场售价,元/kg; w_{planting} 为作物栽培年产量,kg; P_{planting} 为作物栽培蔬菜商品平均市场售价,元/kg。

年总效益(I_{profit})(除初始基础建设成本外)为:

$$I_{\text{profit}}=I-(C_{\text{fish}}+C_{\text{vegetable}}+C_{\text{feed}}+C_{\text{labor}}+C_{\text{electric}}+C_{\text{medicine}}+C_{\text{rent}}+C_{\text{propaganda}}+C_{\text{other}}).\tag{10}$$

3 结果与分析

3.1 环境效益分析

鱼菜共生种养系统的重要特征之一是构建了有效的氮素循环系统,系统中的氮素和其他营养物质主要来源于饲料,鱼类消化后的排泄物以及残余饲料等含氮废弃物被硝化细菌分解成 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 等形态,其中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 可直接被植物吸收转化。但 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 对鱼类具有毒性,而且易导致水体富营养

化等问题^[32]。因此对鱼菜共生种养系统中氮素迁移转化规律进行量化分析和深入研究,可以更好地评估系统的能量流动,为鱼菜共生系统的进一步优化提供理论基础。

氮转化及排放量计算的参数取值及计算结果如表3所示,生产单位质量水产品时单一水产养殖的全氮排放量、总氨氮排放量均远远高于采用鱼菜共生系统的排放量。采用鱼菜共生技术后,全氮排放量减少99.45%,总氨氮排放量减少99.73%;说明采用鱼菜共生技术后,硝化细菌对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的有效降解和蔬菜对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸收转化有效减少了氮素的排放。如表3所示,尽管鱼菜共生系统中蔬菜对水产养殖产生的含氮污水进行了转化吸收,但气体排放和微生物固定转化仍然造成鱼菜共生系统较多的氮损失,其中 N_2O 排放量($w_{\text{N}_2\text{O}}$)是溶解在水中全氮排放量(w_{TN})的4.58倍,微生物同化的氮损失量($w_{\text{h-micro}}$)是溶解在水中全氮排放量(w_{TN})的48.60倍。实测法测得总氨氮在全氮排放量中的占比最高,45.39%, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 为7.09%, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为26.18%;说明鱼菜共生系统中硝化细菌对 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 进行了有效降解,处理后的水质更利于鱼类的生存。与经验公式计算的结果相比,本案例农场每生产单位质量水产品被蔬菜吸收转化的氮排放量提高了69.94%,说明经验公式的相关参数和不同实地生产条件下的参数有所差异,经验公式的普适性和准确性还有待提高。

表3 生产单位质量水产品的氮转化及排放量
Table 3 Nitrogen transformation and emission per unit mass of aquatic products

模式 Mode	指标 Index	经验公式法 Empirical formula method		模式 Mode	指标 Index	实测法 Measurement method	
		参数取值 Parameter value	结果/kg Result			参数取值 Parameter value	结果/kg Result
单一水产 Single aquaculture	FCR	$n_{\text{feed}}=183, w_{\text{feed}}=15,$ $W_{\text{fish}}=1\,500, w_{\text{fish}}=5$	1.840	鱼菜共生 Aquaponics	w_{TN}	$\bar{\rho}_{\text{TN}}=9.795, V=43.057$	0.422
	W_{TN}	FCR=1.840	76.988		w_{TAN}	$\bar{\rho}_{\text{TAN}}=4.445, V=43.057$	0.191
	W_{TAN}	$w_{\text{feed}}=10, n_{\text{feed}}=183,$ $P_{\text{protein}}=40\%, P_{\text{p-T}}=0.092$	67.344		$w_{\text{NO}_2^-\text{-N}}$	$\bar{\rho}_{\text{NO}_2^-\text{-N}}=0.695,$ $V=43.057$	0.030
鱼菜共生 Aquaponics	$w_{\text{N}_2\text{O}}$	$w_{\text{feed}}=10, n_{\text{feed}}=183,$ $P_{\text{TN}}=6.21\%, P_{\text{N}_2\text{O}}=1.7\%$	1.932		$w_{\text{NO}_3^-\text{-N}}$	$\bar{\rho}_{\text{NO}_3^-\text{-N}}=2.563,$ $V=43.057$	0.110
	$w_{\text{h-micro}}$	$w_{\text{feed}}=10, n_{\text{feed}}=183,$ $P_{\text{micro}}=7\%$	20.496		w'_{na}	$\bar{p}=2.902\,6\%,$ $w'_{\text{planting}}=250$	7.257
	W_{na}	$t=626.55, \text{a、g、k、h分别}$ 取0.10、2.77、0.11、1.77	4.270				

综上所述,采用鱼菜共生技术可以大幅减少氮素的排放,提高系统中氮素的利用效率。如何减少含氮气体的排放、提高硝化细菌转化效率并抑制异

养、好氧细菌的生长繁殖是鱼菜共生技术的重要研究方向。经验公式法计算氮转化及排放量方便、简单、快速,但受不同鱼菜共生系统、种养鱼类和蔬菜

品种等因素的影响较大, 计算出的结果存在较大误差, 计算模型和方法的通用性和准确度还有待提高。实测法计算氮转化及排放量准确可靠, 但操作繁琐、仪器设备成本高、技术要求高、采集时间长。将实测法与经验公式法结合, 利用深度学习和大数据等技术建立智能测算系统是提高氮转化及排放

量测算精度、降低成本的有效手段。

3.2 经济效益分析

基于农场问卷和调研数据采集的各项收支指标计算公式中的参数取值, 计算收支指标, 根据计算结果绘制鱼菜共生农场各项细分效益占比饼状图, 如图 2 所示。

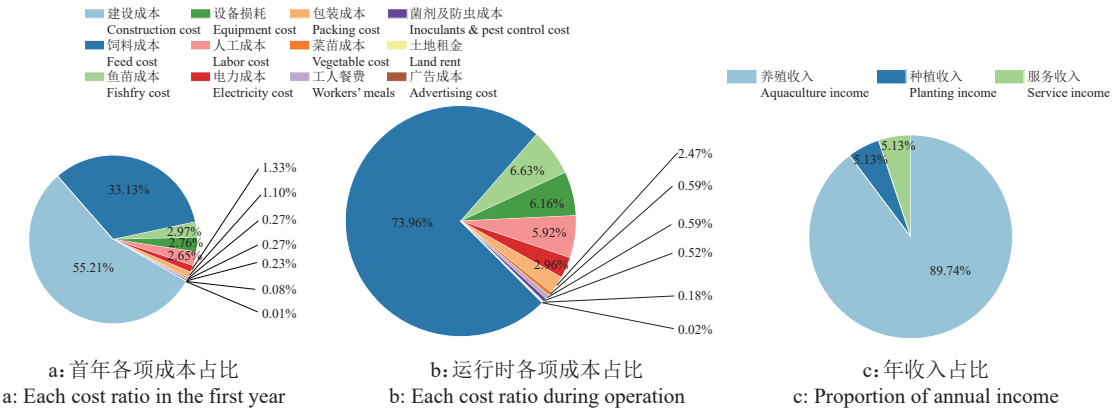


图 2 鱼菜共生农场各项细分效益占比

Fig. 2 Proportion of each subdivision benefit in aquaponis farm

图 2a 为本研究鱼菜共生农场启动第 1 年各项成本占比的饼状图。建设成本占比超过其余各项支出的总和, 说明设施农业前期基础设施建设支出远远超过传统农业支出, 回报周期明显长于传统农业。基础建设成本的组成也较为复杂, 除温室、种植池、养殖池和管道等主要组成单元外, 安全保障设备、水动力循环设备、过滤基材、物联网系统、水质监测系统等配套设施的投入也占有较大比重。此外, 作物栽培基质的选择也是影响建设成本和养殖尾水过滤效果的重要因素^[33]。本试验农场采用砾石和生物质炭 2 种栽培基质, 经前期试验研究, 生物质炭作为栽培基质对养殖尾水中氮素的固定和吸收效率较高, 且作物对养殖尾水中氮素的吸收和转化效率更高。生物质炭基质的成本是砾石的 10 倍, 采用砾石作为栽培基质具有更高的经济性, 但随着环境保护政策的收紧和绿色农业的要求, 生物质炭对养殖尾水中污染物的高吸附和去除效果带来的生态效益使其在以后的应用中更具有竞争力。

去除建设成本后, 鱼菜共生农场正常运行时各项成本占比如图 2b 所示。各项成本占比从大到小排序为饲料成本 > 鱼苗成本 > 设备损耗 > 人工成本 > 电力成本 > 包装成本 > 菜苗成本=工人餐费 > 菌剂及防虫成本 > 土地租金>广告成本。饲料成本是鱼菜共生农场运行时的主要成本来源 (73.96%)。设备损耗 (6.16%) 和人工成本 (5.92%) 相当; 熟练、

具有专业技术的工人可以较好地维护各种设备, 一定程度上降低设备的损耗, 但人工成本会因此增加, 故这 2 项成本的关系为负相关, 在一定程度上相互制约, 并没有明显的降低空间。鱼苗成本 (6.63%) 大于电力成本 (2.96%) 和包装成本 (2.47%); 鱼苗成本和包装成本随市场需求和规律波动, 电力成本的降低可通过更合理的水循环间隔、更智能的能源管理方案实现, 此外采用太阳能等环保能源也可有效降低电力成本。其余 5 项成本来源 (菜苗成本、工人餐费、菌剂及防虫成本、土地租金和广告成本) 在总运行成本中的占比均低于 1%, 广告成本仅占 0.02%, 一般来说广告投入和销售收入成正比, 因此可以加大对广告成本的投入。

如图 2c 所示, 在本案例农场所有收入的占比中, 水产养殖是主要的收益来源, 在总收入中占据绝对优势 (89.74%), 种植收入和服务收入相当, 养殖收入是种植收入和服务收入总和的 8.75 倍。本案例农场养殖水产品的销售渠道稳定, 还可以通过向酒店、商超定点签约供货的方式减少传统分销过程中的成本, 从而进一步提高养殖收入。农场种植、养殖区面积比为 1:1, 考虑到日益严格的养殖污水排放标准, 增加作物种植面积和种植密度可以提高对养殖尾水的过滤和处理效果。增加作物种植面积会增加土地使用成本, 但增加高价值作物的种植可以解决这种成本矛盾。另外, 市场对鱼菜共生技术生产的绿色无公害蔬菜的认可度较低也是种植

收入占比较低的原因。在本案例农场中, 服务收入包括鱼菜共生农场番茄、菠菜、黄瓜等作物的特色采摘, 鱼菜共生农场技术方案服务和科研活动服务费等, 也存在较大提升空间。

一项江苏设施农业建设成本的研究^[5]指出, 玻璃温室建设成本约 640 元/m², 连栋塑料温室建设成本约 150 元/m², “8332” 钢架大棚建设成本约 30 元/m²; 本试验农场鱼菜共生温室为连栋塑料温室, 配套有鱼菜共生系统, 温室建设成本约 625 元/m², 略低于单位面积玻璃温室建设成本, 是单纯连栋塑料温室单位面积建设成本的 4.17 倍。为考察本试验农场的经济性和生产能力优势, 本研究对江苏省农业机械技术推广站提供的另一种 ECS(Efficiency

circulating system) 工厂化鱼菜共生农场技术指标进行统计, 本试验农场和 ECS 工厂化农场各项数据对比如表 4 所示。ECS 工厂化鱼菜共生农场单位面积建设成本低于本案例农场单位面积温室建设成本, 为本案例农场的 48%。本案例农场的养殖密度为 94 尾/m³, 是 ECS 工厂化农场的 1.34 倍, 但种植密度较 ECS 工厂化农场低 38.89%。本案例农场的单位体积养殖年产量为 ECS 工厂化农场的 4.16 倍, 单位面积种植年产量是 ECS 工厂化农场的 1.33 倍, 说明本案例农场的种养策略充分发挥了水产养殖生产潜力, 作物生长状况更好, 对养殖尾水中营养物质的吸收效率更高, 有更低的含氮废弃污水排放量。

表 4 试验农场和 ECS 工厂化农场各项数据对比
Table 4 Comparison of data between experimental farm and ECS factory farm

农场类型 Type of farm	建设成本/ (元·m ⁻²) Construction cost	养殖密度/ (尾·m ⁻³) Stocking density	种植密度/ (株·m ⁻²) Planting density	养殖年产量/ (kg·m ⁻³) Aquaculture annual output	种植年产量/ (kg·m ⁻²) Planting annual output
试验农场 Experimental farm	625	94	22	104	48
ECS工厂化农场 ECS factory farm	300	70	36	25	36

4 结论

1) 本文通过经验公式法计算氮转化和氮排放量, 通过实测法定性、定量计算鱼菜共生系统氮转化和排放量, 并基于农场问卷和调研结果计算鱼菜共生系统的各项经济指标, 对鱼菜共生的环境效益和经济效益进行综合评判, 解决了已有评价体系指标过于单一、无法量化计算等问题。理论计算和试验测算结果有一定差异但具有合理性, 对从业者的农业生产调整具有一定的参考价值。

2) 采用鱼菜共生技术后, 全氮排放量比单一水产养殖模式减少 99.45%, 总氨氮排放量减少 99.73%, 说明采用鱼菜共生技术后硝化细菌对 NH₄⁺-N 及 NO₂⁻-N 的有效降解和蔬菜对 NH₄⁺-N 及 NO₃⁻-N 的吸收转化有效减少了氮素的排放。实测法测得 NO₂⁻-N 在总氮排放量中的占比最低, 为 7.09%, 说明鱼菜共生系统中的硝化细菌对 NO₂⁻-N 进行了有效降解, 处理后的水质更利于鱼类的生存。

3) 饲料成本是鱼菜共生农场运行时的主要成本来源, 占比达 73.96%; 广告成本仅占 0.02%, 不利于提高市场和消费者对鱼菜共生技术生产的绿色无公害农产品的认可度, 有较大提升空间。水产养殖收入在总收入中占比 89.74%, 是种植收入和服务

收入总和的 8.75 倍。

4) 鱼菜共生生产过程涉及的经济和环境指标多, 本研究初步建立了科学的鱼菜共生综合效益评价体系, 对鱼菜共生技术的生态效益和经济效益评价有一定的指导意义, 为鱼菜共生技术的定性定量分析和研究提供新思路, 也可鱼菜共生技术的研究和应用提供多维度参考。

参考文献:

[1] 赵思琪, 丁为民. 水产养殖精准投喂关键技术研究进展[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2023, 4(1): 42-53.

[2] SCHNEIDER O, SERETI V, EDING E H, et al. Analysis of nutrient flows in integrated intensive aquaculture systems[J]. Aquacultural Engineering, 2005, 32(3/4): 379-401.

[3] 生态环境部, 国家统计局, 农业农村部. 第二次全国污染源普查公报[EB/OL]. (2020-06-09) [2024-06-27]. https://www.gov.cn/xinwen/2020-06/10/content_5518391.htm.

[4] 李天沛, 汪小岳, 丁为民, 等. 鱼菜共生系统中不同种类蔬菜对养殖尾水氮素转化的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 247-252.

[5] 周怀兵, 周德龙. 南京市江宁区高效设施农业发展举措[J]. 长江蔬菜, 2020(5): 4-6.

[6] 蔡淑芳, 陈敏, 陈永快, 等. 种植密度对鱼菜共生系统氮素转化的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 132-137.

- [7] 郑广智, 张珊, 郭海涛, 等. 物联网和 PLC 技术在鱼菜共生系统中的应用[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(30): 133-138.
- [8] 徐琰斐, 单建军, 顾川川, 等. 菜-鱼复合设施种养系统构建与运行试验分析[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(2): 150-156.
- [9] LOBANOV V, DE VRIEZE J, JOYCE A. Simultaneous biomethane production and nutrient remineralization from aquaculture solids[J]. *Aquacultural Engineering*, 2023, 101: 102328.
- [10] KEESMAN K J, KÖRNER O, WAGNER K, et al. Aquaponics systems modelling[M]//Aquaponics food production systems. Cham: Springer International Publishing, 2019: 267-299.
- [11] ZHU Z, YOGEV U, GODDEK S, et al. Carbon dynamics and energy recovery in a novel near-zero waste aquaponics system with onsite anaerobic treatment[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 833: 155245.
- [12] 杨思宇, 朱浩辰, 刘友晴, 等. 鱼菜共生发展与经济效益分析[J]. *养殖与饲料*, 2021, 20(10): 64-66.
- [13] 蔡淑芳, 刘现, 王涛, 等. 鱼菜共生系统经济可行性研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(5): 5-8.
- [14] 大连市环境监测中心, 天津市环境监测中心, 辽宁省环境监测实验中心, 等. 水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法: HJ 636—2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [15] 沈阳市环境监测中心站. 水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法: HJ 535—2009[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [16] 湖北省环境监测中心. 水质 亚硝酸盐氮的测定 分光光度法: GB/T 7493—1987[S]. 北京: 国家环境保护局, 1987.
- [17] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会, 中国环境监测总站. 水质 硝酸盐氮的测定 紫外分光光度法 (试行): HJ/T 346—2007[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [18] BÓRQUEZ-LOPEZ R A, CASILLAS-HERNANDEZ R, LOPEZ-ELIAS J A, et al. Improving feeding strategies for shrimp farming using fuzzy logic, based on water quality parameters[J]. *Aquacultural Engineering*, 2018, 81: 38-45.
- [19] TACON A G J, FORSTER I P. Aquafeeds and the environment: Policy implications[J]. *Aquaculture*, 2003, 226(1/2/3/4): 181-189.
- [20] MARTINEZ-PORCHAS M, MARTINEZ-CORDOVA L R. World aquaculture: Environmental impacts and troubleshooting alternatives[J]. *Scientific World Journal*, 2012: 389623.
- [21] EBELING J M, TIMMONS M B, BISOGNI J J. Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia-nitrogen in aquaculture systems[J]. *Aquaculture*, 2006, 257(1/2/3/4): 346-358.
- [22] HU Z, LEE J W, CHANDRAN K, et al. Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics[J]. *Biore-source Technology*, 2015, 188: 92-98.
- [23] WUNDERLIN P, MOHN J, JOSS A, et al. Mechanisms of N₂O production in biological wastewater treatment under nitrifying and denitrifying conditions[J]. *Water Research*, 2012, 46(4): 1027-1037.
- [24] LU H, CHANDRAN K. Factors promoting emissions of nitrous oxide and nitric oxide from denitrifying sequencing batch reactors operated with methanol and ethanol as electron donors[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2010, 106(3): 390-398.
- [25] ZOU Y, HU Z, ZHANG J, et al. Effects of pH on nitrogen transformations in media-based aquaponics[J]. *Biore-source Technology*, 2016, 210: 81-87.
- [26] HU Z, LEE J W, CHANDRAN K, et al. Nitrous oxide (N₂O) emission from aquaculture: A review[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46: 6470-6480.
- [27] HARGREAVES J A. Nitrogen biogeochemistry of aquaculture ponds[J]. *Aquaculture*, 1998, 166(3/4): 181-212.
- [28] FINK M, FELLER C. An empirical model for describing growth and nitrogen uptake of white cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*)[J]. *Scientia Horticulturae*, 1998, 73(2/3): 75-88.
- [29] 贺志文. 水培生菜吸氮模型构建与营养液氮素调控研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2018.
- [30] 李响. 玉米加工污水灌溉对油菜生长的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [31] 王齐龙. 减氮配施钙、镁、硼、钼对几种蔬菜产量和品质的影响[D]. 佛山: 佛山科学技术学院, 2020.
- [32] 徐跑. 中国稻鱼综合种养的发展与展望[J]. *大连海洋大学学报*, 2021, 36(5): 717-726.
- [33] 李天沛, 汪小昆, 施印炎, 等. 鱼菜共生技术及其系统装备的研究现状与展望[J/OL]. *南京农业大学学报* (2024-06-14) [2024-06-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1148.S.20240613.1725.004.html>.

【责任编辑 李庆玲】