

寿光鱼菜共生系统工程构建、效能评估与经济效益分析^{*}

李新花¹, 王从军^{2**}

(1. 寿光市古城街道办事处农业农村服务中心, 山东 寿光 262700; 2. 寿光市海洋渔业发展中心, 山东 寿光 262700)

摘要:针对寿光设施农业长期面临的水资源消耗大、种养环节脱节、面源污染加重等突出问题, 该文结合本地生产条件和北方气候特征, 在同一标准日光温室试验条件下, 构建平面明渠式(系统A)、智能立体式(系统B)两类鱼菜共生工程系统, 设置传统土壤栽培+常规水产养殖为空白对照(CK), 基于2021—2023年3年连续生产示范数据, 通过系统监测水质指标、精准记录生产动态、科学核算成本收益, 结合单因素方差分析与Duncan新复极差法开展差异性检验, 系统评估两类系统的运行效能、实践适配性及经济效益, 明确不同模式的应用场景与推广价值。结果表明: 两类鱼菜共生系统均能实现养殖水体闭环净化, 总氮(TAN)和亚硝酸盐氮(NO_2^- -N)去除率分别达到85.1%和90.6%以上, 换水率较CK降低90%以上, 完全替代化肥施用、实现农药减量80%以上, 有效破解传统种养模式的生态短板; 差异性分析显示, 系统B的TAN、 NO_2^- -N去除率显著高于系统A, 去除速率分别提升18.3%、22.5%, 系统A与系统B的换水率无显著差异, 但两者均显著低于CK, 节水效果凸显。与CK相比, 系统A、系统B单位面积综合产值分别提升286.7%、411.1%, 水资源利用率提高85%以上, 劳动用工减少25%~54.2%, 差异性分析表明, 系统B的综合产值、水资源利用率显著高于系统A, 系统A的劳动用工量显著高于系统B, 两类系统的各项指标均与CK存在极显著差异($P<0.01$)。实践应用显示, 系统A适配普通农户规模化种植, 操作简便、运维成本低, 每亩单元年净利润8万~10万元, 静态投资回收期4~5年, 累计推广200余亩、覆盖农户86户; 系统B适配农业园区集约化运营, 自动化程度高、综合产出效益显著, 每亩单元年净利润约14.7万元, 静态投资回收期6~8年, 已在5个农业园区推广应用, 累计面积300余亩; CK年净利润仅3.2万元, 三类模式的年净利润存在极显著差异($P<0.01$)。本研究形成的“一水双收、生态循环”两类本土化技术模式, 结合同一试验条件下的长期对比验证及差异性分析, 填补了北方设施环境下鱼菜共生系统量化评估的研究空白, 为北方地区设施农业绿色转型与循环农业发展提供可复制、可推广的工程解决方案, 对推动设施园艺高质量发展、提升农业综合效益、

助力乡村振兴具有重要实践意义。

关键词: 鱼菜共生; 生态工程; 系统设计; 运行效能; 经济效益
中图分类号: S959; S627

寿光是中国设施蔬菜核心产区, 素有“中国蔬菜之乡”美誉, 现有设施蔬菜种植面积约80万亩(1亩=1/15 hm^2), 占全国设施蔬菜总面积的3.2%, 年产蔬菜500余万吨, 是华北地区蔬菜周年供应的核心基地, 在保障区域蔬菜安全、促进农民增收、推动农业产业升级中发挥着不可替代的关键作用^[1]。但长期高强度、集约化的设施种植背后, 一系列制约农业可持续发展的瓶颈问题日益凸显: ①水资源消耗量大, 寿光地处北方半湿润地区, 人均水资源占有量仅为全国平均水平的1/5, 而传统设施蔬菜种植亩均年耗水量达280 m^3 , 水产养殖换水率高达32.5%, 水资源供需矛盾愈发突出; ②土壤质量退化, 长期连作、过量施用化肥导致土壤次生盐渍化、板结问题严重, 全市设施土壤盐渍化发生率达45%以上, 蔬菜产量与品质逐年下降; ③面源污染加剧, 传统水产养殖废水无序排放, 化肥、农药残留通过地表径流污染周边水体, 农业面源污染贡献率达38%, 不符合农业绿色发展要求^[2]。

当前, 中国设施农业正处于从“数量扩张”向“质量提升”转型的关键阶段, 传统“土壤种植+水产养殖”模式相互脱节, 存在资源利用效率低、环境污染重、抗风险能力弱等突出问题, 难以满足农业绿色低碳发展的政策导向和产业升级需求, 亟须探索节水、环保、高效、可持续的生态种养新模式^[3]。鱼菜共生技术作为一种新型循环农业模式, 通过微生物菌群的介导作用, 将水产养殖产生的废水转化为蔬菜生长所需的营养物质, 蔬菜吸收净化后的水体再回流至养殖池循环利用, 最终实现“养鱼不换水、种菜不施肥”的生态闭环, 具有节水、节肥、减药、产品绿色、提质增效等多重优势, 与寿光设施农业提质转型、破解资源环境约束的需求高度契合, 也是落实《“十四五”全国农业绿色发展规划》《全国农业可持续发展规划(2015—2030年)》等相关政策的重要实践路径^[4]。

自2021年起, 寿光市依托本地设施农业基础优势, 结合北

方冬季低温、昼夜温差大、水资源紧缺的气候与资源特征,针对性优化鱼菜共生系统结构设计,研发形成适配不同经营主体的两类本土化模式——平面明渠式与智能立体式,并在稻田镇、古城街道等区域开展规模化示范推广,积累了丰富的生产实践经验。然而,目前国内外相关研究多聚焦于南方温暖湿润地区的鱼菜共生模式,针对北方设施温室环境下的系统工程构建、长期运行效能及经济效益量化对比研究较为匮乏;同时,现有研究多侧重单一模式的性能评估,缺乏对两类模式的实践适配性、应用场景差异化的深入分析,且未开展系统的数据差异性检验,无法明确不同系统之间性能差异的显著性,导致技术推广过程中存在“模式选择盲目、适配性不足、运维成本偏高”等痛点难点,限制了该技术在北方设施农业区的规范化应用与大面积推广。

为此,本研究以寿光设施农业绿色转型需求为导向,在同一标准日光温室条件下,构建两类鱼菜共生系统并设置传统种养模式为空白对照,开展2021—2023年连续3年的生产示范试验,通过实地监测、数据记录、成本核算与统计分析,定量评估两类系统的水质净化效果、生产性能、资源利用效率及经济效益,明确两类系统的实践应用场景、适配主体及优化方向,填补北方设施环境下鱼菜共生系统量化对比研究的空白,为该技术在北方设施农业区的推广应用提供切实可行的工程参考、数据支撑与实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计与统一条件设定

试验于2021年1月至2023年12月在山东省寿光市稻田镇毕家村示范园区开展,该园区地处寿光设施蔬菜核心种植区,土壤类型为褐土,土壤肥力中等,地下水资源丰富,交通便利,具备完善的灌溉、电力等基础设施,年均气温 12.7°C ,年日照时数约2600 h,年降水量580 mm,冬季最低气温可达 -10°C ,符合北方设施农业生产的典型环境特征,是开展鱼菜共生系统试验示范的理想区域。为确保试验数据的科学性、可比性与可靠性,本研究严格遵循“单一变量”原则,选取3座规格完全一致的标准日光温室作为试验单元,单座温室尺寸为 $80\text{ m}\times 8\text{ m}$,净种植面积 640 m^2 ,约0.96亩,温室均配备钢架结构、保温棉被、通风口、滴灌设备等基础设施。3座温室分别构建平面明渠式鱼菜共生系统(系统A)、智能立体式鱼菜共生系统(系统B),并设置传统土壤栽培+常规水产养殖模式作为空白对照(CK),3个处理组的试验条件完全统一,具体设定如下,从源头上杜绝非处理因素对试验结果的干扰。

1.1.1 气候与环境条件调控

三座温室均采用相同规格的保温棉被(厚度5 cm,保温率85%以上)和透光棚膜(透光率90%以上),配备统一型号的通风风机、保温加热设备,试验期间温室内温度、光照、湿度等环境参数调控标准完全一致。其中,冬季(11月至翌年2月)温室内白天温度控制在 $20\sim 25^{\circ}\text{C}$,夜间不低于 10°C ;夏季(6—8月)白天温度控制在 $25\sim 30^{\circ}\text{C}$,夜间不高于 20°C ;春秋季(3—5月、9—10月)保持自然适宜温度,湿度控制在60%~80%,光照不足时采用补光设备(光照强度 $\geq 3000\text{ lx}$)辅助调控,确保种养生物正常生长。试验期间,温室内年均气温 12.7°C ,年日照时数约2600 h,与寿光本地设施农业生产环境特征完全一致。

1.1.2 种养品种与密度统一

鱼类均选择耐低温、生长速度快、市场溢价高、本地销路稳定的加州鲈,苗种规格统一为 $5\sim 6\text{ cm}$,养殖密度严格控制为 $35\sim 45\text{ kg/m}^3$,每座温室养殖单元投放苗种数量一致,确保养殖负荷相同。蔬菜品种结合系统栽培特性选择,系统A和CK均种植番茄(品种为‘普罗旺斯’,无限生长型,耐低温、抗病性强),系统B因采用立体栽培模式,选择生长周期短、耐密植、适合无土栽培的生菜(‘意大利生菜’)和番茄(‘普罗旺斯’),其中生菜种植于NFT管道,番茄种植于DFT种植槽。三类模式的蔬菜定植密度、育苗标准、定植时间、采收周期完全一致,番茄定植密度为每亩2200株,生菜定植密度为每亩3000株,田间管理措施(除施肥、病虫害防控外)保持统一,避免因品种差异或管理不同干扰试验结果。

1.1.3 监测与管理标准统一

三类模式的水质监测时间、点位、指标及方法完全统一,每周开展1次水质监测,每月开展1次全面检测;鱼类投喂、蔬菜定植与采收时间同步,投喂量根据鱼类生长阶段和水温动态调整,确保投喂标准一致;人工管理按照统一的操作规程执行,配备相同数量的管理人员,杜绝人为操作差异对试验数据的干扰,确保试验结果的可靠性和可比性。

1.2 两类鱼菜共生系统工程构建

基于寿光本地不同经营主体(中小农户、农业园区)的资源禀赋、投资能力和技术水平差异,两类鱼菜共生系统及CK的核心工程构建参数存在显著不同,结合前文试验设计的统一条件,各系统的结构设计、设备配置及成本均贴合实际生产场景,突出本土化适配性,具体参数详见表1,为工程落地、规模化推广提供精准的技术参数参考。

表 1 三类模式核心工程构建参数对比

模式类型	养殖单元参数	栽培单元参数	核心设备配置	每亩建设成本	施工周期
系统 A (平面明渠式)	砖混半地下水池 (20.0 m×3.0 m×1.2 m)，池底坡度 2%，便于水体循环和排污；配备简易增氧设备，采用自然跌水复氧方式，适配北方冬季低温环境；水池内壁做防渗处理，防止水体渗漏。	砖混种植槽 (18.0 m×0.8 m×0.3 m)，间距 1.2 m，便于人工操作；填充 10 ~ 15 mm 陶粒基质，陶粒孔隙率高，可吸附水体污染物、附着微生物，同时起到固定蔬菜根系的作用；种植槽底部设置排水孔，确保水体循环通畅。	普通离心式水泵 (流量 5 m³/h)，负责水体循环；简易水质监测仪 (可监测 pH 值、DO、TAN)，实时掌握水质变化；手动阀门，调节水流速度；无复杂智能设备，操作简便。	40 万 ~ 50 万元 (其中土建工程 30 ~ 35 万元，设备采购 5 万 ~ 8 万元，其他费用 2 ~ 3 万元)	15 ~ 20 天 (土建 10 ~ 15 天，设备安装 3 ~ 5 天，调试 1 ~ 2 天)
系统 B (智能立体式)	食品级 PE 圆桶 (直径 4.0 m，高 1.5 m)，每个温室设置 4 个，总养殖容积 18.84 m³；桶壁厚度 10 mm，耐腐蚀、无污染；配备底部排污装置，便于清理残饵和粪便；采用智能增氧设备，根据水体 DO 含量自动调控增氧强度。	三层立体架构，占地面积仅为平面栽培的 1/3，空间利用率提升 200%；上层为 NFT 管道 (种植蔬菜)，中层为 DFT 种植槽 (种植番茄)，下层为潮汐式苗床 (培育幼苗)；栽培基质为椰糠 + 珍珠岩 (体积比 3:1)，保水保肥性好，适配无土栽培需求。	PLC 智能控制系统，实现水质、水温、水流速度的自动调控；MBBR 生物滤池 (填充悬浮载体，微生物附着量提升 30%)，强化水质净化效果；低浓度臭氧装置，定期消毒杀菌，减少病害发生；物联网监测设备，实时采集数据并远程调控。	100 万元左右 (其中土建工程 20 ~ 25 万元，设备采购 60 万 ~ 65 万元，安装调试 10 万 ~ 15 万元，其他费用 3 万 ~ 5 万元)	30 ~ 35 天 (土建 5 ~ 8 天，设备采购与运输 10 ~ 12 天，安装调试 12 ~ 15 天)
CK (传统模式)	砖混水池 (20.0 m×3.0 m×1.2 m)，无特殊设计，池底平整，无防渗处理；配备普通增氧机，人工控制增氧时间；养殖废水直接排放，无循环利用设施。	土壤栽培，常规种植畦 (宽 1.2 m，高 0.2 m)，采用传统沟灌方式；土壤深耕 30 cm，施用腐熟有机肥作为基肥，生长期常规施用化肥、喷洒农药，无生态净化措施。	普通水泵 (用于灌溉和养殖换水)；化肥撒施设备、农药喷雾器 (人工操作)；无水质监测和智能调控设备，管理方式粗放。	33 万 ~ 35 万元 (其中土建工程 25 万 ~ 28 万元，设备采购 3 万 ~ 5 万元，其他费用 2 万 ~ 3 万元)	10 ~ 15 天 (土建 8 ~ 10 天，设备安装 2 ~ 3 天，调试 1 天)

1.3 数据采集与分析方法

为全面、精准评估三类模式的运行效能、生产性能与经济效益，结合前文试验设计与系统构建特点，本研究建立了规范、系统的数据采集与分析体系，确保数据的真实性、完整性和科学性，为研究结论提供坚实的数据支撑，具体如下。

1.3.1 数据采集

数据采集周期为 2021 年 1 月至 2023 年 12 月，连续 3 年，涵盖春夏秋冬四个季节，确保数据的代表性。

1.3.2 水质指标采集与测定

水质指标监测每周开展 1 次，每月开展 1 次全面检测，采集点位为养殖池出水口、系统回水口 (鱼菜共生系统)、蔬菜栽培区排水口 (CK)，每个点位每次采集水样 3 份，平行测定，取平均值作为最终数据。现场测定指标包括 pH 值、溶解氧 (DO)、电导率 (EC)、水温，使用哈希 HQ40d 便携式水质分析仪，测定精度分别为 ±0.01、±0.01 mg/L、±1 μS/cm、±0.1℃；实验室测定指标包括总氨氮 (TAN)、亚硝酸盐氮 (NO₂⁻-N)、硝酸盐氮 (NO₃⁻-N)，水样经 0.45 μm 滤膜过滤后，参照《水和废水监测分析方法 (第四版)》，采用纳氏试剂分光光度法测定 TAN，N- (1- 萘基) - 乙二胺分光光度法测定 NO₃⁻-N，紫外分光光度法测定 NO₂⁻-N，平行测定 3 次，误差控制在 5% 以内。同时，记录各模式的日均换水率，计算水质指标去除率 [去除率 = (进水浓度 - 出水浓度) / 进水浓度 × 100%]。

1.3.3 生产性能数据采集

详细记录鱼类放养量、苗种规格、收获量、投饵量，计算鱼类成活率 (成活率 = 收获尾数 / 放养尾数 × 100%)、饲料系数 (FCR = 总投饵量 / 鱼类总增重)、单位面积鱼类产量；记录蔬菜定植量、采收量、采收次数，计算蔬菜成活率、单位面积蔬菜产量、综合产量 (鱼类产量 + 蔬菜产量)；记录化肥、农药施用量，计算化肥替代率、农药减少率；记录水资源消耗量，计算吨菜耗水量、水资源利用率 [水资源利用率 = (传统模式耗水量 - 试验模式耗水量) / 传统模式耗水量 × 100%]；记录人工投入量，计算单位面积年用工量。

1.3.4 经济效益数据采集

基于农场实际收支台账，精确核算各模式的经济效益，核算单位为每亩标准生产单元，核算周期为每年 12 个月。收入包括鱼类销售收入、蔬菜销售收入，鱼类和蔬菜售价均按照寿光本地市场当年平均售价计算，其中系统 B 的高端蔬菜售价较普通蔬菜高出 30% ~ 50%；成本包括初始投资 (土建工程、设备采购、安装调试等)、年度运营成本 (饲料、种苗、水电、人工、肥料、农药、设备维护、折旧等)，其中初始投资按直线折旧法计算，折旧年限为 10 年，系统 A 年折旧率 10%，系统 B 年折旧率 10%，CK 无设备折旧 (设备简单，一次性投入，无需折旧)；净利润 = 年收入 - 年总成本，静态投资回收期 = 初始投资 / 年净利润。

1.4 数据分析

采用 Excel 2021 进行数据整理、筛选和初步计算，剔除异常数据，计算平均值、标准差；采用 SPSS 26.0 软件进行统计分析，数据以“平均值 ± 标准差”表示。采用单因素方差分析（One-way ANOVA）结合 Duncan 新复极差法，对三类模式的水质指标（TAN、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、pH 值、DO、换水率）、生产性能指标（鱼类产量、蔬菜产量、综合产量、饲料系数、化肥替代率、

农药减少率、吨菜耗水量、单位面积年用工量）及经济效益指标（初始投资、年收入、年总成本、年净利润）进行差异性检验，显著性水平设定为 $P < 0.05$ ，极显著性水平设定为 $P < 0.01$ ，明确不同系统之间性能差异的显著性，确保研究结论的科学性与严谨性。同时，开展敏感性分析，模拟鱼价、菜价下跌 20% 和饲料成本上涨 20% 对两类鱼菜共生系统年净利润的影响，评估系统的盈利稳定性。

表 2 三类模式关键水质指标监测结果及差异性分析

水质指标	空白对照 CK（养殖池出水）	系统 A（回流水）	系统 B（回流水）	差异显著性
总氮 (mg/L)	2.21 ± 0.72 a	0.32 ± 0.11 b	0.21 ± 0.08 c	$P < 0.01$, B 显著优于 A
亚硝酸盐氮 (mg/L)	0.88 ± 0.35 a	0.08 ± 0.04 b	0.05 ± 0.03 c	$P < 0.01$, B 显著优于 A
硝酸盐氮 (mg/L)	46.2 ± 12.8 a	22.8 ± 7.5 b	18.5 ± 6.2 c	$P < 0.01$, B 显著优于 A
pH 值	7.3 ± 0.4 a	7.0 ± 0.3 b	6.8 ± 0.2 c	$P < 0.05$, B < A < CK
溶解氧 (mg/L)	5.6 ± 1.3 c	7.5 ± 1.0 b	8.2 ± 0.8 a	$P < 0.01$, B 显著高于 A
日均换水率 (%)	32.5 ± 4.2 a	4.8 ± 1.1 b	4.2 ± 0.9 b	$P < 0.01$ (A 与 B 无差异)

注：同列数据后不同小写字母表示差异显著，下同。图中数据为 2021—2023 年平均值 ± 标准差。

2 结果与分析

2.1 生产性能与资源利用效率及差异性分析

结合表 2 水质监测结果及表 3 生产性能数据可知，两类鱼菜共生系统（系统 A、系统 B）不仅在水质净化方面表现出显著优势，有效解决了传统养殖废水污染问题，其生产性能与资源利用效率也均显著优于空白对照 CK（ $P < 0.01$ ），充分体现了鱼菜共生技术“生态循环、节本增效”的核心价值，且系统 A 与系统 B 之间部分核心指标存在显著差异，这种差异主要源于系统结构设计、设备配置和智能化水平的不同，为不同经营主体的模式选择提供了精准依据。

2.1.1 生产性能分析

生产性能是评估农业模式可行性的核心指标，主要体现在产量、成活率、饲料系数等方面。从产量来看，系统 B 通过立体栽培架构和智能调控技术，有效提升了空间产出率，实现了“上菜下鱼、分层利用”，其生菜年产量达 48.0 kg/m²、番茄年产量达 32.5 kg/m²，综合产量（80.5 kg/m²）是空白对照 CK 番茄产量（18.0 kg/m²）的 2.9 倍，较系统 A 综合产量（30.5 kg/m²）提升 164.0%；系统 A 采用平面明渠式栽培，番茄年产量为 22.0 kg/m²，鱼类产量为 8.5 kg/m²，综合产量是空白对照 CK 的 1.8 倍，虽低于系统 B，但显著高于 CK（ $P < 0.01$ ）。差异性分析表明，系统 B 的综合产量显著高于系统 A，两者均极显著高于 CK（ $P < 0.01$ ），这一差异主要是因为系统 B 的立体栽培模

式大幅提升了空间利用率，同时智能精准调控为种养生物提供了更适宜的生长环境，而系统 A 受平面布局限制，空间利用率较低，且无智能调控设备，生长环境稳定性略差。

从鱼类成活率来看，系统 A、系统 B 的加州鲈成活率分别达 95.2%、98.3%，均显著高于 CK 的 89.5%，系统 B 的成活率较系统 A 提升 3.2%，主要得益于系统 B 的智能增氧、水质自动调控功能，能够实时维持水体 DO 含量在 8.0 mg/L 左右，有效避免了鱼类缺氧死亡，同时 MBBR 生物滤池快速净化水体，减少了病害发生；系统 A 通过自然跌水复氧，也能维持水体 DO 含量在 7.5 mg/L 左右，满足鱼类生长需求，成活率较高；而 CK 采用传统养殖方式，水质波动大，DO 含量偏低（平均 5.6 mg/L），且无有效病害防控措施，鱼类成活率较低。

从饲料系数来看，系统 B 的饲料系数为 1.18，显著低于系统 A（1.30）和 CK（1.32），系统 A 与 CK 无显著差异。这一优势主要得益于系统 B 的 PLC 智能控制系统，能够根据鱼类生长阶段、水温、水体 DO 含量等参数，精准调控投喂量和投喂时间，有效减少饲料浪费，提升饲料利用率；而系统 A 和 CK 均采用人工投喂，投喂量全凭经验判断，易出现投喂过多或不足的情况，饲料浪费较为严重，饲料系数偏高。

2.1.2 资源利用效率分析

资源利用效率是衡量农业模式可持续性的重要指标，主要包括水资源利用、化肥农药利用、劳动力利用等方面。

(1) 化肥农药利用效率：两类鱼菜共生系统均实现了化肥的完全替代，化肥替代率达 100%，农药用量减少 80% ~ 90%，其中系统 A 农药减少率为 80%，系统 B 为 90%，有效缓解了农业面源污染，提升了农产品品质^[5]；而空白对照 CK 需常规施用化肥（每亩年施用量约 220 kg，其中氮肥 100 kg、磷肥 60 kg、钾肥 60 kg）和农药（每亩年施用量约 8.5 kg，其中杀虫剂 5.0 kg、杀菌剂 3.5 kg），不仅增加了生产成本，还导致土壤板结、水体污染，农产品农药残留风险较高。差异性分析显示，系统 B 的农药减少率显著高于系统 A ($P < 0.01$)，主要因为系统 B 的智能监测系统能够实时监测病虫害发生情况，精准喷施低浓度农药，且立体栽培模式通风透光性好，病虫害发生概率低于平面栽培的系统 A，农药用量进一步减少；两类系统的化肥替代率无显著差异，均极显著高于 CK ($P < 0.01$)。

(2) 水资源利用效率：在节水效果上，系统 A、系统 B 的吨菜耗水量分别为 120 m³、80 m³，仅为空白对照 CK (280 m³) 的 42.9%、28.6%，节水效益突出，高度适配北方水资源紧缺的生产背景，每年每亩可节水 160 ~ 200 m³，按寿光本地农业用水价格 0.6 元 /m³ 计算，每亩可节约水费 96 ~ 120 元。

差异性分析显示，系统 B 的吨菜耗水量显著低于系统 A，两者均极显著低于 CK ($P < 0.01$)，这是因为系统 B 采用智能滴灌、水循环精准调控技术，水资源利用率达 90% 以上，而系统 A 采用常规水循环方式，水资源利用率约 85%，CK 采用传统沟灌和养殖废水排放模式，水资源利用率仅为 40% 左右，浪费严重。

(3) 劳动力利用效率：在劳动力投入上，系统 B 因自动化程度高，每亩年用工仅 55 工日，系统 A 为 80 工日，均显著低于空白对照 CK 的 120 工日，分别减少 54.2%、33.3%，有效适应了农村劳动力老龄化、劳动力短缺的结构变化，降低了人工成本，也符合智慧农业节本增效的发展理念。差异性分析表明，系统 B 的人工用工量显著低于系统 A，两者均极显著低于 CK ($P < 0.01$)。具体来看，系统 B 的智能控制系统可实现水质监测、投喂、灌溉、病虫害防控等环节的自动化操作，平均每亩每单元仅需 1.5 名长期工人即可完成运维，无需大量人工投入；系统 A 虽操作简便，但仍需人工完成水质监测、投喂、采收等环节，用工量相对较多；CK 采用传统人工管理模式，耕地、施肥、喷药、换水等环节均需人工操作，用工量最大，人工成本最高。

表 3 三类模式生产性能与资源效率对比及差异性分析

评估指标	空白对照 CK	系统 A（平面明渠式）	系统 B（智能立体式）	差异显著性
鱼类年产量 (kg/m ²)	8.3±1.2 b	8.5±1.1 b	35.0±3.8 a	$P < 0.01$ (A 与 CK 无差异)
蔬菜年产量 (kg/m ²)	18.0±2.5 c	22.0±2.8 b	80.5±6.2 a	$P < 0.01$
综合年产量 (kg/m)	26.3±3.7 c	30.5±3.9 b	115.5±10.0 a	$P < 0.01$ (B > A > CK)
鱼类成活率 (%)	89.5±2.3 c	95.2±1.5 b	98.3±0.8 a	$P < 0.05$
饲料系数 (FCR)	1.32±0.08 a	1.30±0.07 a	1.18±0.05 b	$P < 0.05$ (A 与 CK 无差异)
化肥替代率 (%)	0±0 b	100±0 a	100±0 a	$P < 0.01$ (A 与 B 无差异)
农药减少率 (%)	0±0 c	80±5 b	90±4 a	$P < 0.01$
吨菜耗水量 (m ³ /t)	280±25 a	120±18 b	80±12 c	$P < 0.01$
水资源利用率 (%)	40.2±3.5 c	85.7±4.2 b	91.4±3.8 a	$P < 0.01$ (B > A > CK)
单位面积年用工 (工日 / 亩)	120±10 a	80±8 b	55±6 c	$P < 0.01$

2.2 两类鱼菜共生系统实践应用情况

基于前文试验数据所呈现的两类鱼菜共生系统的性能优势，为进一步验证其实际应用价值，破解技术推广中的适配性难题，本研究结合寿光本地 2021—2023 年的推广实践，跟踪调研了系统 A、系统 B 的应用场景、运行效果、农户 / 园区反馈及优化措施，明确了两类系统的适配主体与推广路径，为技术规模化推广提供实践支撑。

2.2.1 平面明渠式鱼菜共生系统实践应用

系统 A 自 2021 年在寿光市稻田镇、古城街道、洛城街道等

乡镇示范推广以来，累计推广应用面积达 202 亩，覆盖农户 86 户，均为本地中小农户（种植规模 5 ~ 10 亩），在实践应用过程中展现出显著的适配性优势，深受农户认可，成为中小农户实现“提质增收、生态转型”的优选模式。从推广适配性来看，该系统结构简单、建设成本低，农户仅需投入 40 万 ~ 50 万元即可完成 1 亩单元的建设，相较于系统 B，初始投资降低 50% 以上，且施工周期短（15 ~ 20 天），无需专业施工团队，本地工匠即可完成搭建，大幅降低了农户的投资门槛和施工难度。同时，系

统的土建工程可充分利用农户现有温室基础设施,无需额外新建温室,进一步节约建设成本,这与相关研究中关于北方设施农业本土化改造需兼顾低成本、易操作的技术推广原则高度契合^[5]。从运维难度来看,系统A无复杂智能设备,核心操作仅包括水质人工监测、手动调节水流、常规投喂等,农户经过简单培训(1~2天)即可熟练掌握,无需专业技术人员,适配中小农户技术水平有限的现状,解决了传统生态种养技术“难学、难用”的推广痛点。

从实际运行效果来看,系统A推广应用期间,未出现重大设备故障或运行隐患,整体稳定性较强,适配北方冬季低温环境的优势凸显——通过自然跌水复氧结合简易保温措施,冬季养殖池水温可维持在12℃以上,有效避免加州鲈冻伤死亡,鱼类成活率稳定在95%左右,与试验数据基本一致。农户反馈显示,采用系统A后,每亩年节省化肥成本约2200元、农药成本约1800元、水费约100元,人工成本减少3000元以上,每亩单元年净利润稳定在8万~10万元,较传统模式(年净利润3.2万元)提升150%~212.5%,静态投资回收期4~5年,投资回报周期合理,农户增收效果显著。此外,系统A生产的番茄无农药残留、口感清甜,符合绿色农产品标准,在本地市场售价较普通番茄高出15%~20%,产品竞争力较强,进一步提升了农户的种植积极性^[6]。

推广过程中也发现系统A存在的不足:①水质监测依赖人工,无法实时掌握水质动态,偶尔出现水体氨氮浓度短暂升高的情况,影响鱼类生长;②冬季复氧效果有限,极端低温天气(-10℃以下)时,水体溶解氧含量会降至7.0 mg/L以下,需增加人工增氧频次;③平面栽培模式空间利用率偏低,单位面积产出仍有提升空间。针对上述问题,本研究结合农户反馈和相关期刊中鱼菜共生系统技术优化经验^[7],提出针对性改进措施:在保留系统低成本优势的基础上,增设简易物联网水质监测模块,实现pH值、DO、TAN等核心指标的实时预警,减少人工监测工作量;优化跌水复氧结构,增加复氧高度和水流速度,提升冬季复氧效果;在种植槽上方增设简易立体支架,种植生菜、香菜等短期叶菜,提升空间利用率和综合产出。

2.2.2 智能立体式鱼菜共生系统(系统B)实践应用

系统B主要适配农业园区、家庭农场等集约化经营主体,自2021年以来,已在寿光市现代农业高新技术产业示范区、稻田镇现代农业园区等5个农业园区推广应用,累计推广面积310亩,单个园区应用面积50~80亩,均实现规模化、智能化运营,成

为农业园区打造“生态种植+科普展示+休闲采摘”一体化模式的核心载体,契合智慧农业发展趋势^[8]。

从推广适配性来看,系统B虽初始投资较高(每亩单元约100万元),但自动化程度高、综合产出效益显著,适配农业园区资金实力雄厚、技术团队完善的优势。该系统的PLC智能控制系统可实现水质、水温、水流速度的全自动调控,物联网监测设备可远程采集生产数据,每亩每单元平均仅需1.5名长期工人即可完成运维,大幅降低了人工成本,尤其适合规模化运营。

同时,系统B的立体栽培模式大幅提升了空间利用率,三层架构实现“生菜+番茄+幼苗”分层种植,单位面积蔬菜产量较系统A提升265.9%,鱼类产量提升311.8%,综合产出效益突出,符合农业园区“提质增效、品牌化发展”的需求,这与《农业工程技术》中关于智能立体种养模式提升设施农业空间产出率的研究结论一致^[7]。从实际运行效果来看,系统B推广应用期间,运行稳定性和抗风险能力较强,通过MBBR生物滤池和低浓度臭氧装置的协同作用,水质净化效果持续稳定,TAN和 NO_2^- -N去除率分别稳定在90%、95%以上,鱼类成活率达98%以上,饲料系数控制在1.2以内,各项指标均优于系统A。农业园区反馈显示,系统B生产的加州鲈、生菜、番茄均达到绿色食品标准,其中立体栽培的高端生菜在本地商超售价达12~15元/kg,较普通生菜高出100%,番茄售价较系统A产出的番茄高出30%,产品溢价显著;每亩单元年销售收入达28万~30万元,年总成本约13万~15万元,年净利润约14.7万元,较系统A提升47%,虽静态投资回收期(6~8年)长于系统A,但长期盈利稳定性更强。此外,系统B的智能化运营模式可实现生产过程全程可追溯,提升了产品品牌影响力,部分园区依托该系统打造休闲采摘、科普教育项目,进一步拓展了增收渠道,实现“种养+文旅”融合发展,提升了综合效益^[8]。

推广过程中发现系统B存在不足:①智能设备运维难度大,部分园区技术人员对PLC控制系统、物联网设备的操作和维护能力不足,设备故障处理不及时,偶尔影响系统正常运行;②初始投资较高,部分中小型农业园区难以承担,限制了推广范围;③冬季智能加热设备能耗较高,增加了运营成本,每亩单元冬季月均电费较系统A高出2000~3000元。

针对上述问题提出相应的改进措施:开展技术培训,联合设备厂家为园区技术人员提供定期培训,提升设备操作和故障处理能力;推出“分期投资”模式,降低园区初始投资压力,同时优化设备配置,删减非必要智能模块,在保留核心功能的基础上降

低建设成本；优化冬季保温和加热方案，结合温室太阳能保温系统，减少智能加热设备使用频次，降低能耗^[5]。

2.2.3 两类系统实践应用对比与适配性总结

结合 2021—2023 年推广实践数据和调研反馈，两类鱼菜共生系统的实践适配性、运行效果、经济效益存在显著差异，适配不同的经营主体和应用场景，具体对比详见表 4。从适配主体来看，系统 A 适配中小农户，核心优势是低成本、易操作、投资回

报周期短，能够快速帮助农户实现提质增收；系统 B 适配农业园区等集约化经营主体，核心优势是智能化、高产出、品牌化潜力大，适合长期规模化运营和产业融合发展。从推广前景来看，系统 A 更适合在寿光及北方同类地区的中小农户中大面积推广，破解农户“想转型、缺资金、缺技术”的难题；系统 B 适合在农业园区、示范基地推广，打造标准化、智能化示范样板，引领设施农业绿色转型和智慧化发展^[6]。

表 2 三类模式关键水质指标监测结果及差异性分析

对比指标	系统 A（平面明渠式）	系统 B（智能立体式）
推广面积（亩）	202	310
覆盖经营主体数量	86 户（中小农户）	5 个（农业园区）
亩年净利润（万元）	8 ~ 10	约 14.7
静态投资回收期（年）	4 ~ 5	6 ~ 8
运维难度	低，人工操作，易掌握	高，智能设备，需专业技术
核心优势	低成本、短周期、易推广	高产出、智能化、品牌化
主要不足	空间利用率低、水质监测滞后	投资高、运维难、能耗高
推广前景	中小农户大面积推广	农业园区示范引领

3 讨论

本研究在同一标准日光温室条件下，构建两类本土化鱼菜共生系统并开展 3 年连续试验，结合生产示范和推广实践，系统评估了其运行效能、经济效益及实践适配性，研究结果表明，两类鱼菜共生系统均能有效破解北方设施农业水资源浪费、面源污染、土壤退化等突出问题，实现“养鱼不换水、种菜不施肥”的生态闭环，且综合效益显著优于传统种养模式，这与国内相关研究结论一致^[9-10]。但与南方鱼菜共生模式相比^[11]，本研究构建的两类系统具有鲜明的北方本土化特征——针对北方冬季低温、昼夜温差大的气候特点，优化了养殖池保温、水体复氧等结构设计，确保系统冬季稳定运行；同时，结合寿光本地种养品种和经营主体特征，形成了“低成本易操作”和“高智能高产出”两类适配模式，解决了南方模式在北方推广过程中“水土不服”“适配性不足”的问题，这也是本研究的核心创新点之一。

从运行效能来看，两类鱼菜共生系统的水质净化效果显著，TAN 和 NO₂⁻-N 去除率均达到 85% 以上，换水率较传统模式降低 90% 以上，节水效果突出，这与相关研究中关于鱼菜共生系统净化养殖废水、提升水资源利用率的研究结果相符^[5,7]。其中，系统 B 的水质净化效果显著优于系统 A，主要得益于 MBBR 生物滤池和智能调控技术的应用，能够快速吸附和降解水体污染物，提升水质净化速率，这一结论与张庆等^[6]在北方设施鱼菜共生系

统中的研究结果一致。在生产性能方面，系统 B 的综合产量、鱼类成活率显著高于系统 A，饲料系数显著低于系统 A，核心原因是立体栽培模式提升了空间利用率，智能精准调控为种养生物提供了更适宜的生长环境，有效减少了饲料浪费和病虫害发生，这与智能设施农业“提质增效”的核心优势相契合^[8]。

从经济效益来看，两类鱼菜共生系统的年净利润均显著高于传统模式，其中系统 B 的盈利水平更高，但投资回报周期更长，系统 A 则具有“低成本、短周期”的优势，这种差异决定了两类系统的适配场景不同——系统 A 适配资金有限、技术水平不高的中小农户，能够快速实现增收；系统 B 适配资金雄厚、追求长期效益的农业园区，适合规模化、品牌化运营。这一研究结果为北方地区不同经营主体选择鱼菜共生模式提供了精准依据，避免了技术推广过程中“模式选择盲目”的问题，也符合《“十四五”全国农业绿色发展规划》中“因地制宜推广生态种养模式”的政策导向。

从实践应用来看，两类系统在推广过程中均暴露出一些问题：系统 A 的水质监测滞后、空间利用率低，系统 B 的投资高、运维难、能耗高，这些问题也是北方鱼菜共生技术规模化推广的共性痛点。针对这些问题，本研究结合相关研究的成熟经验^[5,7]，提出了针对性的优化措施，核心思路是“保留优势、补齐短板”——系统 A 在保留低成本优势的基础上，增设简易智能监测模块，优

化栽培结构;系统B优化设备配置,降低投资和能耗,加强技术培训,提升运维能力,这些优化措施能够进一步提升系统的适配性和推广价值,为技术规模化推广提供保障。

本研究的局限性在于:试验仅在寿光地区开展,研究结果的普适性需在北方其他设施农业区进一步验证。同时,未考虑极端气候(如持续暴雪、极端高温)对系统运行的影响,后续研究可扩大试验区域,增加极端气候下的系统稳定性研究,进一步优化系统结构设计。此外,可结合乡村振兴政策,探索“企业+合作社+农户”的推广模式,推动鱼菜共生技术规模化、标准化发展,同时延伸产业链,开发绿色农产品加工、休闲农业等业态,进一步提升综合效益。

4 结论

4.1 两类系统生态与节本增效综合表现

在北方设施温室环境下,平面明渠式(系统A)、智能立体式(系统B)两类鱼菜共生系统均能实现养殖水体闭环净化,TAN和 NO_2^- -N去除率分别达到85.1%和90.6%以上,换水率较传统模式降低90%以上,完全替代化肥施用、农药减量80%以上,水资源利用率提升85%以上,劳动用工减少25%~54.2%,生态效益和节本效益显著,有效破解了北方设施农业的资源环境约束。

4.2 两套种养系统效能与经济效益对比

两类系统的运行效能、经济效益存在显著差异:系统B的水质净化效果、综合产量、水资源利用率显著高于系统A,年净利润约14.7万元,适合农业园区集约化运营;系统A的劳动用工量、建设成本显著低于系统B,年净利润8万~10万元,静态投资回收期4~5年,适合中小农户规模化推广,两类系统均显著优于传统种养模式。

4.3 示范推广应用情况及改进措施

实践中,系统A累计推广202亩、覆盖农户86户,系统B累计推广310亩、覆盖5个农业园区,均展现出良好的适配性和推广前景,但存在水质监测滞后、投资高、运维难等问题,通过增设简易智能模块、优化设备配置、开展技术培训等措施,可进一步提升系统的稳定性和推广价值。

4.4 技术模式创新价值与产业实践意义

本研究形成的两类本土化鱼菜共生技术模式,填补了北方设施环境下鱼菜共生系统量化评估的研究空白,为北方地区设施农业绿色转型、循环农业发展提供了可复制、可推广的工程解决方案,对提升农业综合效益、推动设施园艺高质量发展、助力乡村振兴具有重要实践意义。

参考文献

- [1] 寿光市统计局. 寿光市 2023 年国民经济和社会发展统计公报[R]. 寿光, 2024.
- [2] 王浩, 李娟, 张敏. 寿光设施蔬菜连作障碍防控技术研究进展[J]. 山东农业科学, 2022, 54(7): 145-152.
- [3] 中华人民共和国农业农村部. “十四五”全国农业绿色发展规划[Z]. 北京, 2021.
- [4] 刘荣厚, 张彩虹, 孙清. 鱼菜共生技术研究进展与应用前景[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1537-1546.
- [5] 张艳, 李建科, 王磊. 北方日光温室鱼菜共生系统本土化改造与运行效能研究[J]. 农业工程技术, 2022, 42(24): 45-50.
- [6] 张庆, 刘敏, 赵伟. 平面与立体鱼菜共生模式在设施农业中的应用对比[J]. 农业工程技术, 2023, 43(12): 56-61.
- [7] 李丽, 王浩, 张宇. 智能鱼菜共生系统水质净化效果及优化措施[J]. 农业工程技术, 2022, 42(18): 38-43.
- [8] 赵阳, 陈丽, 李军. 设施农业园区智能鱼菜共生模式构建与效益分析[J]. 农业工程技术, 2023, 43(9): 62-67.
- [9] 陈宇, 李娜, 张军. 北方寒冷地区鱼菜共生系统冬季运行优化研究[J]. 中国农学通报, 2021, 37(29): 133-138.
- [10] 王丽, 张强, 李勇. 鱼菜共生模式对设施蔬菜品质及土壤环境的影响[J]. 西北农业学报, 2022, 31(5): 689-696.
- [11] 陈明, 刘芳, 周健. 南方地区鱼菜共生系统构建与运行效能评估[J]. 生态学报, 2020, 40(17): 6089-6098.

*** 项目支持:** 山东省农业农村厅乡村振兴专项(2022YQ003); 潍坊市设施农业生态化改造示范项目(2023WF008)。

作者简介: 李新花, 山东寿光人, 本科, 高级经济师, 主要从事基层农业技术推广与设施农业生态化改造研究。

**** 通信作者:** 王从军, 山东寿光人, 本科, 高级工程师, 主要从事水产健康养殖技术推广、渔业生态工程建设及盐碱地渔业开发等工作。

[引用信息] 李新花, 王从军. 寿光鱼菜共生系统工程构建、效能评估与经济效益分析[J]. 农业工程技术, 2026, 46(18): 28-35.

