

引用格式: 苗苗, 殷徐康, 王寅, 等. 中国稻鸭共作的创意模式、生态效应及机制研究[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(3): 631–644. MIAO Miao, YIN Xukang, WANG Yin, *et al.* Creative model, ecological effects, and mechanism of rice-duck co-culture system in China[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(3): 631–644.

中国稻鸭共作的创意模式、生态效应及机制研究

苗苗¹, 殷徐康², 王寅¹, 任晋东³, 卢立志³, 赖齐贤¹, 张小明⁴,
耿玮¹, 刘书悦¹, 汤勇¹

(1. 浙江省农业科学院 农村发展研究所, 浙江 杭州 310021; 2. 武汉大学 经济与管理学院, 湖北 武汉 430072; 3. 浙江省农业科学院 畜牧兽医研究所, 浙江 杭州 310021; 4. 浙江省农业科学院 作物与核技术利用研究所, 浙江 杭州 310021)

摘要: 稻鸭共作作为一种创意农业技术模式, 本质上是对传统水稻种植体系的生态技术回应。通过梳理中国稻鸭共作的发展进程, 创新构建“水-土-粮-经-碳”系统协同框架并阐明其机理, 进而从调水、护土、稳产、增收、固碳层面分析其生态效应及影响机制。研究表明: ①中国稻鸭共作经历了理念植入与技术萌芽、技术引进与产业塑形、规范建设与技术推广、技术迭代与创意发展 4 个时期, 深度融合并驱动了创意农业技术迭代升级, 为农业可持续发展提供创新范式。②稻鸭共作显著优化水体理化性质, 同时促进土壤结构改良, 丰富土壤菌落与水体生物多样性, 实现水土环境的生态调控和协同改善。③稻鸭共作有效促进了水稻产量与品质及鸭肉风味的提升, 在降低生产成本的同时提高了种养综合收益, 为创意农业技术模式的价值实现提供了实践路径。④稻鸭共作显著抑制甲烷(CH₄)排放并小幅影响其他温室气体释放, 综合作用下使系统的全球增温潜势整体下降, 有助于缓解农业生产对气候变化的负面影响。未来在产业发展和生态可持续层面仍待突破若干关键科学问题, 以期提高稻鸭共作的适应性与可持续性。图 4 表 1 参 84

关键词: 稻鸭共作; “水-土-粮-经-碳”系统; 创意农业模式; 生态效应; 影响机制

中图分类号: S181; F307.1 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)03-0631-14

Creative model, ecological effects, and mechanism of rice-duck co-culture system in China

MIAO Miao¹, YIN Xukang², WANG Yin¹, REN Jindong³, LU Lizhi³, LAI Qixian¹, ZHANG Xiaoming⁴,
GENG Wei¹, LIU Shuyue¹, TANG Yong¹

(1. Institute of Rural Development, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, Zhejiang, China; 2. School of Economics and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China; 3. Institute of Animal Husbandry and Veterinary, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, Zhejiang, China; 4. Institute of Crop and Nuclear Technology Utilization, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, Zhejiang, China)

Abstract: Rice-duck co-culture is a creative agricultural technology model that essentially responds to the ecological technology of the traditional rice cultivation system. By reviewing the development of rice-duck co-culture in China, this study aims to construct a collaborative framework of “water-soil-grain-economy-carbon” system, clarify its mechanism, and analyze its ecological effects and impact mechanism from the perspectives of water regulation, soil conservation, stable production, income increase and carbon sequestration. The research revealed: (1) The co-culture of rice and duck in China experienced 4 phases: concept implantation

收稿日期: 2025-02-02; 修回日期: 2025-04-18

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32372862); 浙江省重点研发计划项目(2024C02004)

作者简介: 苗苗 (ORCID: 0009-0002-3090-5946), 从事农业资源与环境经济研究。E-mail: miaomiao@mail.zaas.ac.cn。通信作者: 汤勇 (ORCID: 0009-0000-6251-0223), 研究员, 从事创意农业技术模式研究。E-mail: zaastangy@163.com

and technology germination, technology introduction and industry shaping, standardization and promotion, and technological upgrade and creative development. It was deeply integrated into creative agricultural technology and drove its iterative upgrading, providing an innovative paradigm for sustainable agricultural development. (2) The co-culture of rice and duck significantly optimized the physical and chemical properties of water bodies, while promoting soil structure amelioration, enriching soil colonies and water body biodiversity, and achieving ecological regulation and collaborative improvement of water and soil environments. (3) The co-culture of rice and duck effectively promoted the improvement of rice yield and quality, as well as the flavor of duck meat. While reducing production costs, it also increased the comprehensive income of planting and breeding, providing a practical path for the realization of the value of creative agricultural technology models. (4) The rice-duck co-culture system significantly suppressed CH_4 emissions and slightly affected the release of other greenhouse gases, resulting in an overall decrease in the global warming potential of the system, which helped to mitigate the negative effects of agricultural production on climate change. Therefore, in the future, several key scientific issues still need to be addressed in terms of industrial development and ecological sustainability in order to enhance the adaptability and sustainability of rice-duck intercropping. [Ch, 4 fig. 1 tab. 84 ref.]

Key words: rice-duck co-culture; water-soil-grain-economy-carbon; creative agriculture model; ecological effects; impact mechanism

水稻 *Oryza sativa* 是全球粮食安全体系的核心要素, 为超过 35 亿人口提供主要膳食能量, 其营养供给量占人类膳食碳水化合物 20% 以上^[1]。中国是世界人口大国, 水稻是中国 65% 以上人口的主食, 在粮食生产体系中占据重要地位, 安全稳定且可持续的水稻生产是保障国家粮食安全的根本条件^[2]。当前, 中国水稻生产受到人多地少的资源禀赋约束, 种植者往往通过长期大量投入化肥、农药等农业化学品来追求增产。世界银行数据显示, 2023 年中国农田单位面积化肥施用量为 $397.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 施用强度为全球平均水平的 2.96 倍。化学品的大量投入对稻田生态环境造成了严重破坏, 导致生态系统服务功能持续退化, 稻田生物多样性降低, 土壤有机质下降, 最终对稻田综合生产能力产生影响^[3]。因此, 推动水稻生产从管理粗放的单一系统向高效生态的综合系统转型尤为迫切。

稻鸭共作作为创意农业技术模式之一, 是以水田为基础、优质稻生产为中心、家鸭野养为特点的自然和人为干预相结合的稻鸭共育复合生态系统, 其本质是对传统水稻种植体系多重矛盾的生态技术的回应^[4-5]。作为最早开展稻作和野鸭驯化的国家之一, 中国在 20 世纪 90 年代从日本引入稻鸭共作模式, 目前该模式已在南方稻区各省份广泛推广和应用^[6]。与单一水稻种植模式相比, 稻鸭共作模式可以促进形成良性循环的食物链和生态链, 从而生产出绿色食品、无公害稻米和鸭肉, 最终实现水稻和肉鸭产业的提质增效和固碳减排^[7]。由此可见, 稻鸭共作系统更有利于人与自然和谐共生及农业可持续发展^[8]。

近年来, 学界对稻鸭共作的研究大多聚焦在其对水稻生长及产量的影响^[9-11]、对土壤理化性质及病虫害防控的效应^[12-14]、固碳减排效能^[15-18]等方面, 而缺乏在系统综合的体系和框架下分析稻鸭共作的机理与效应, 更未能从更深层次提出该技术发展的前瞻性思考。基于此, 本研究贡献在于: 一是基于生命周期评估, 系统梳理中国稻鸭共作创意模式的发展进程及技术要点; 二是创新提出“水-土-粮-经-碳”系统协同框架, 将对稻鸭共作的单一技术问题拓展为多元化问题, 从调水、护土、稳产、增收、固碳 5 个层面阐述稻鸭共作的生态效应及影响机制; 三是科学展望稻鸭共作技术未来研究方向, 以期构建稻田综合利用的中国方案提供技术支撑与实践参考。

1 中国稻鸭共作创意模式的发展进程

1.1 理念植入与技术萌芽期 (1949 年至 1980 年代末期)

中国稻田养鸭技术起源于明清时期, 距今已传承千余年^[19]。明神宗万历年间, 陈经纶所著《治蝗笔记》中记载了“养鸭治蝗”技术理念, 该书籍最早提出将“鸭治蝗虫”的方法运用到稻田治理中, 标志

着稻田养鸭技术在中国正式萌芽^[20]。此后较长一段时间,中国稻鸭共作以流动放牧为主,将水稻收割之后的稻田作为棚鸭养殖场地^[7]。这一阶段,农户逐步形成了稻鸭种养的理念与意识,主要凭借农谚与传统经验进行技术传播。但由于当时种稻与养鸭的技术相互分离,因而并未形成系统的综合种养技术体系。

1.2 技术引进与产业塑形期 (1990 年代初期至 2000 年代初期)

稻鸭共作是日本在借鉴中国稻田养鸭的基础上发展起来的,最早于 1988 年由日本福岡农民古野隆雄提出,时称“合鸭农法”^[21]。1990 年代,中国江苏省镇江市率先引入稻鸭共作模式,由此开启中国稻鸭综合种养创新实践。在这一阶段,中国以国际技术引入与本土化推广为核心,实现了从传统农法到技术体系的转型,基本形成了稻鸭共作产业雏形。但受中国整体农业技术进步水平限制,该阶段稻鸭共作技术规范尚不完善,技术适用和推广范围也局限于南方稻区。

1.3 规范建设与技术推广期 (2000 年代中期至 2010 年代中期)

继现代稻鸭共作模式引入镇江并推广应用后,中国稻鸭共作技术体系不断完善,推广应用范围迅速扩大^[22]。各省积极探索制定地方性技术规程,实施水稻综合种养政策补贴,促进稻鸭共作从经验性生产向标准化、规范化的技术模式转变。2003 年,在湖南省益阳市召开了“南方优质高效无公害稻米生产示范观摩会”,并将稻鸭共作列为无公害稻米生产核心技术^[7]。同年,江西省制定了《稻鸭共栖生产绿色大米操作技术规程》。2005 年,浙江省和江苏省相继制订了《稻鸭生态共育》系列技术标准。这一阶段,稻鸭共作以政策驱动下的标准化和规模化发展特征,基本形成了行业技术规程,并逐步完善了政策扶持和补贴机制,实现了稻鸭共作由点及面的拓展式发展。

1.4 技术迭代与创意发展期 (2010 年代末期至今)

创意农业的产生与发展为稻鸭共作的迭代升级提供了重要契机。2012 年,浙江省率先在全国有组织开展创意农业研究与推广工作。自 2016 年以来,创意农业已在全国范围内得到广泛推进与深入实施。在此背景下,如何推动现代农业技术向养生、养胃、养心、养智、养眼(即“五养”),以及理念创意、科技创新、产品创制、模式创优、文化创建(即“五创”)转变,成为新时期农业技术创新的题中之义,而稻鸭共作正是在创意农业蓬勃发展的过程中顺势迭代。这一阶段,《稻鱼鸭综合种养技术规程》获批立项,成为中国首个针对稻鱼鸭综合种养的国家标准;2011 年,贵州侗乡稻鱼鸭系统被联合国粮食及农业组织(FAO)认定为全球重要农业文化遗产,标志着稻鸭共作地方经验跃升为全球典范。综上所述,中国稻鸭共作系统经历了从传统农作经验向现代创意模式的转变,并在不断的经验验证和政策推动下,现已形成了完整的技术链条,为其在更广泛的农业可持续发展框架下发挥作用奠定了基础。

2 “水-土-粮-经-碳” 框架下稻鸭共作的效应与机制分析

为进一步厘清稻鸭共作模式区别于传统种植方式的机制与效应,本研究建构稻鸭共作的“水-土-粮-经-碳”系统协同框架,进而阐明该协同系统的生态效应及影响机制,探究如何通过各机制的协同作用实现农业可持续发展。

2.1 稻鸭共作中“水-土-粮-经-碳”系统协同机制

稻鸭共作通过多维度生物互作与生态调控形成协同效应,其核心机制体现在:一是促进“水-土-碳”物质循环(图 1)。首先,鸭子田间行为扰动水体,促进水中溶解氧交换,加之鸭子机械踩踏提高土壤通气性,促进氧气通过水-土界面传递至土壤中,从而提升土壤氧化还原电位和微生物群落丰富度,在抑制甲烷(CH_4)的产生同时提高土壤有机质的含量。此外,鸭粪作为外源有机质输入土壤后,经微生物分解并进一步释放二氧化碳(CO_2),同时提供氮素来源,从而加速硝化-反硝化过程,并影响氧化亚氮(N_2O)排放。二是形成“水稻-鸭群-微生物转化”能量传递。在稻鸭共作系统中,水稻通过光合作用积累有机物质,为鸭群提供食物和栖息环境。鸭子作为中层消费者,捕食杂草和害虫,并通过鸭粪向土壤输入有机物和营养盐,为微生物活动提供底物和能量。土壤和水体中的微生物群落分解鸭粪及水稻残体,释放温室气体和营养物质,确保系统可持续生产。三是产生“水-土-粮-经-碳”系统协同效应。稻鸭共作系统中,水系统为稻田提供灌溉和水环境调控,鸭子在水中活动不仅改善水质,还促进水体与土壤的养分和气体交换;土系统通过鸭子踩踏和排泄物输入改善土壤结构与通气性,进而增加有机质含

量,为水稻根系提供更好的生长环境,并促进粮食产量与品质的提升;经济系统则依托水稻种植和鸭子养殖的系统协同,减少农药、化肥和田间管理成本,增加农产品价值,从而提升经济效益;同时,水稻通过光合作用固碳,鸭子活动改善氧化还原条件,微生物分解有机质调控温室气体排放,共同减缓水稻生产对气候变化的影响。综上,稻鸭共作系统通过上述机制形成多链条耦合生态网络,并推动“资源节约-生态友好-技术共振-经济增值”的创意农业发展。

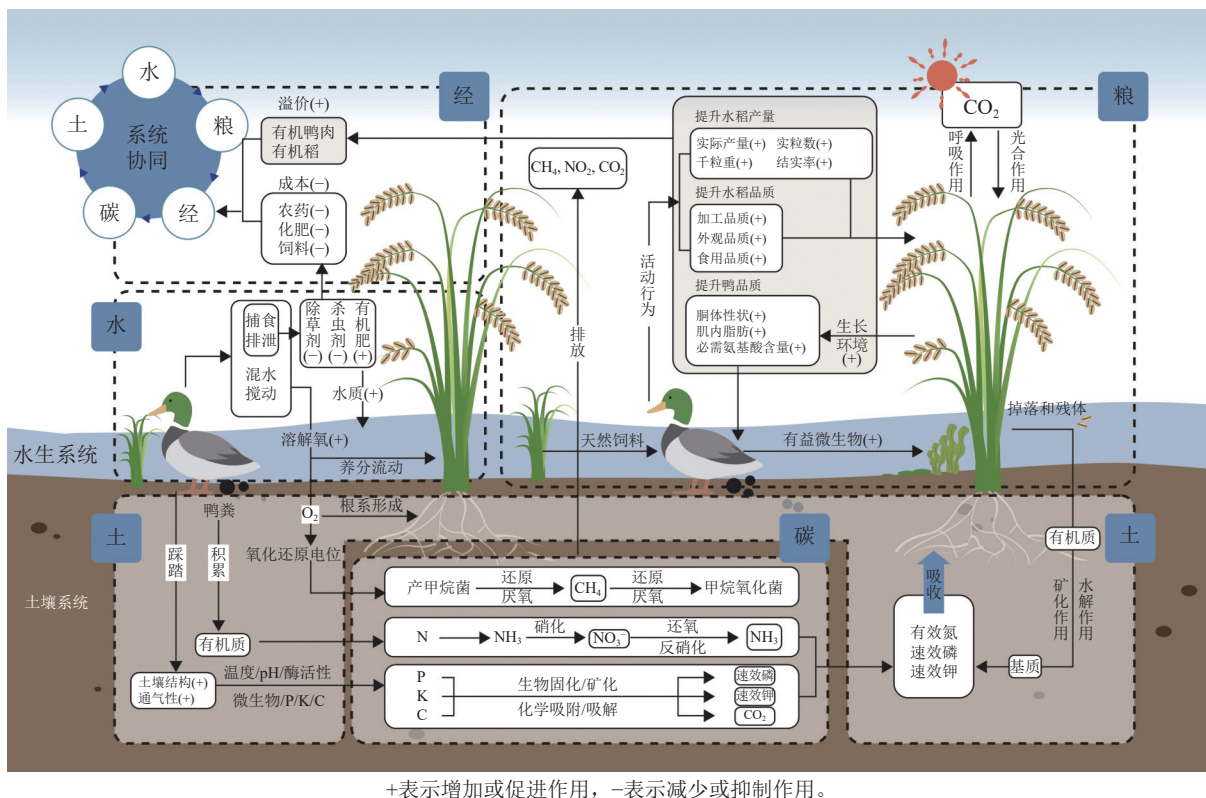


图1 稻鸭共作“水-土-粮-经-碳”系统协同机制

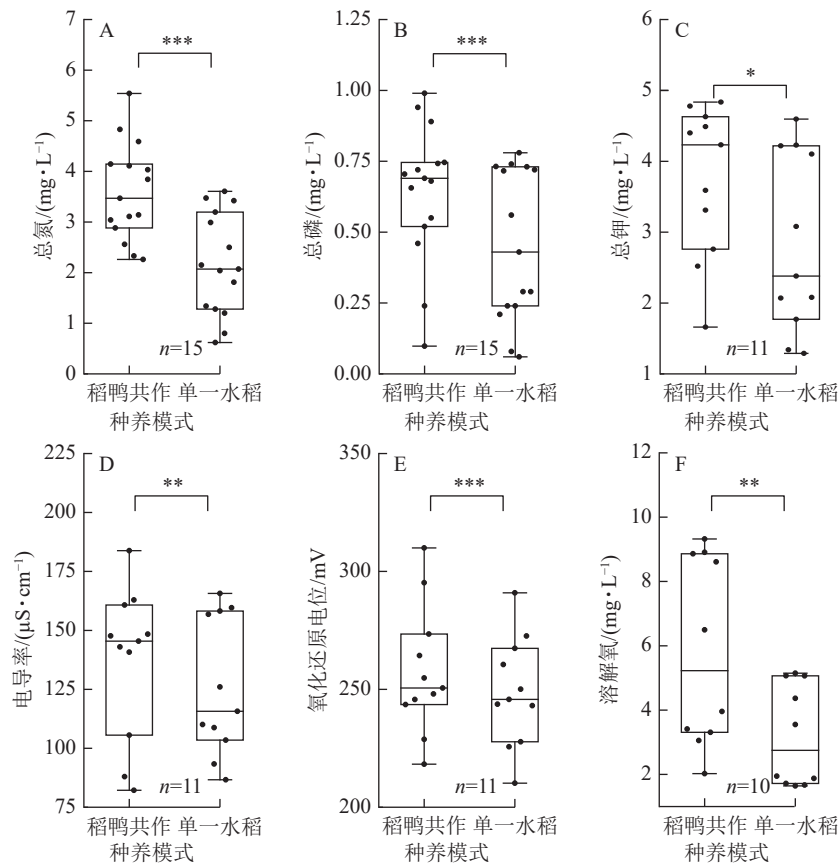
Figure 1 Diagram of the “water-soil-grain-economy-carbon” synergistic mechanism in the rice-duck integrated farming system

2.2 稻鸭共作的“调水”效应及影响机制

水系统是稻田生态系统的重要组成部分,其环境质量与农业可持续性密切相关,而不同种植模式可能会对水体污染负荷及生态功能产生显著影响。基于此,本研究参考 FENG 等^[23]和 YU 等^[24]的研究方法,从科睿唯安 (WOS) 和中国知网 (CNKI) 文献库搜集整理相关文献数据进行组间差异分析,比较稻鸭共作和单一水稻模式下稻田水体理化性质指标的差异,并使用 t 检验法检验差异显著性。结果表明:与单一水稻模式相比,稻鸭共作模式下稻田水体中总氮 ($P<0.01$, 图 2A)、总磷 ($P<0.01$, 图 2B)、总钾 ($P<0.10$, 图 2C) 质量浓度分别平均上升了 39.69%、29.19% 和 24.39%。与此同时,稻鸭共作模式下的稻田水体电导率 ($P<0.05$, 图 2D)、氧化还原电位 ($P<0.01$, 图 2E) 和溶解氧质量浓度 ($P<0.05$, 图 2F) 等水体物理指标平均显著上升了 8.97%、3.47% 和 80.83%。总体而言,稻鸭共作对稻田水系统具有重要影响,主要体现在水体理化性质、面源污染和生物群落多样性 3 个方面。

2.2.1 稻鸭共作对于水体理化性质的影响 pH、电导率、溶解氧质量浓度等是水体理化性质的主要指标。稻鸭共作模式对水体理化性质的改善机制主要体现在以下方面:鸭子的田间活动会搅动水体,从而增加水体与空气的交换,使水体溶解氧增加^[18]。同时,鸭子的搅水行为也增加了水体的混浊度,使水体中悬浮颗粒和溶解物质上升,进而提高水体电导率水平,有利于水稻健壮生长^[18, 25]。此外,鸭子的排泄物和饲料残渣增加了水体中溶解性固体含量,使水体中的总氮、总磷和总钾质量浓度提高,为水稻生长提供了充足的营养元素^[26]。综上所述,稻鸭共作通过鸭子的活动、排泄物和饲料残渣等因素共同作用于稻田水,既改善了水体的理化性质,又促进了水稻生长发育和复合生态系统的健康和稳定。

2.2.2 稻鸭共作对面源污染的影响 稻鸭共作对面源污染的影响较为复杂。在传统稻田种植中,化肥和



使用*t*检验方法检验稻鸭共作与单一水稻系统中稻田水体理化性质的组间差异显著性。*、**、***分别表示在0.10、0.05、0.01的水平上差异显著。箱体中部的横线表示50%分位数，下边缘和上边缘分别对应25%和75%分位数。下须表示非异常的最小值，上须表示非异常的最大值。数据主要来自文献[13-14, 18, 27-28]。

图 2 稻鸭共作模式对稻田水体理化性质的影响

Figure 2 Impact of the rice-duck integrated farming system on the physicochemical properties of paddy water

农药的大量使用是导致面源污染的主要原因之一，而在稻鸭共作系统中，鸭粪作为有机肥可以直接替代部分化肥，从而降低因化肥投入而导致的氮、磷、钾污染风险^[29-30]。此外，稻田生态系统能够通过土壤吸收和植物利用来消纳部分有机质及微量元素，进而达到稻田水质的净化作用。然而，如果鸭粪未经处理直接施用于稻田，且施用量过大或管理不当，可能会导致稻田水体中氮、磷等营养物质质量浓度过高，进而引发稻田周围水域污染问题^[25]。因此，在推广稻鸭共作模式时，需要强化田间水分管理，确保养分有效吸收，降低潜在的环境风险。

2.2.3 稻鸭共作对生物群落多样性的影响 稻鸭共作影响稻田水体生物群落多样性的原理在于：鸭子游动和觅食行为对水体产生物理扰动，进而改变水体的流动性和底泥结构，并影响底栖动物和浮游生物的生存及繁殖。稻鸭共作会减少稻田水体底栖动物的种类，但在水稻生育前期，其生物多样性指数和均匀度指数却高于常规稻田，这表明稻鸭共作在一定程度上改变了稻田生物多样性及群落结构^[31-32]。此外，稻鸭共作表现出显著的控制杂草危害和减少水稻病虫害的潜力^[33]，原因在于鸭子的踩踏行为可破坏杂草生长，使杂草群落的丰富度降低，并改变其结构和分布^[34]。综上所述，稻鸭共作通过物理扰动、影响生物群落结构和功能以及改变杂草群落多样性等机制，共同促进稻田生态系统的多样性和稳定性。

2.3 稻鸭共作的“护土”效应及影响机制

稻田土壤的理化性质直接影响其养分循环、微生物活性及作物生产力，不同种植模式可能通过改变土壤养分和酶活性，对土壤质量及生态功能产生影响^[35]。与前文使用相同方法，分析稻鸭共作模式对稻田土壤理化性质和有机质的影响，结果表明：与传统单一水稻模式相比，稻鸭共作模式对土壤有机质、速效磷、速效钾等主要土壤养分指标，以及脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶等主要土壤酶活性指标均有显著提升作用 ($P < 0.05$)，分别提高了 4.11%、14.85%、11.61%、25.34%、39.69%、46.82%。总体而言，稻鸭共作对稻田土壤质量的提升机制主要体现在土壤养分、土壤细菌群落和土壤酶活性 3 个方面。

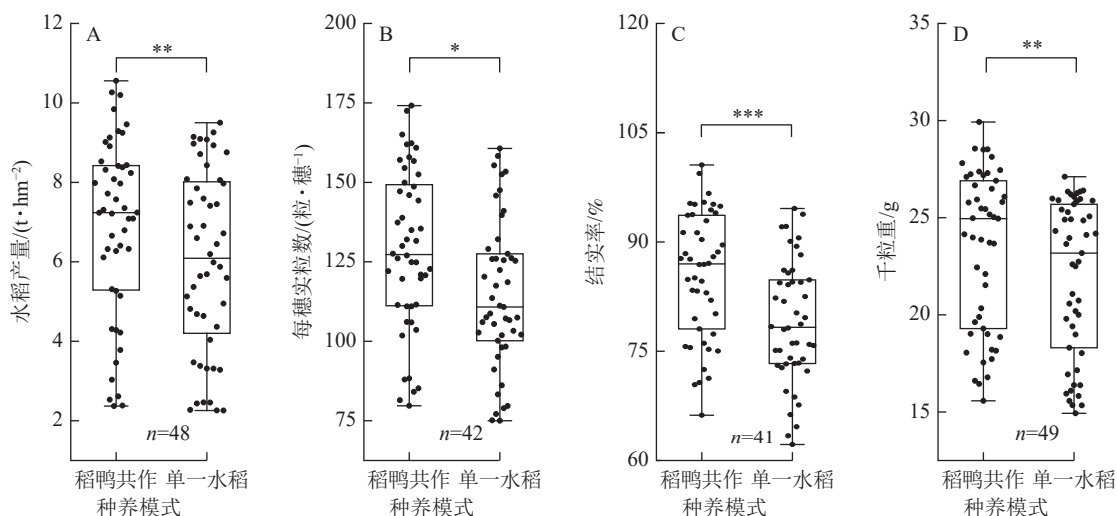
2.3.1 稻鸭共作对土壤养分的影响 稻鸭共作系统可以促进土壤养分保持和循环利用。原因在于：鸭子踩踏可以起到疏松土壤的效果，从而降低土壤容重，增加总孔隙度，减少板结，进而加速有机物质的分解和养分循环^[36]。同时，鸭子排泄物在土壤微生物的分解作用下，可以有效增加碱解氮、速效磷、速效钾等养分，提升土壤肥力^[11]。此外，鸭子在稻田中活动时，会捕食褐飞虱 *Nilaparvata lugens*、二化螟 *Chilo suppressalis*、纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* 等害虫^[37]，能够有效减少农药使用量，降低农药使用对土壤肥力的破坏^[38]。因此，稻鸭共作有助于增加土壤有机质和养分，降低农药施用量，进而显著改善土壤肥力和理化性质，最终促进土壤健康管理和可持续利用。

2.3.2 稻鸭共作对土壤细菌群落的影响 稻鸭共作能够提升土壤细菌群落的丰富度和多样性，从而促进土壤养分的转化与平衡，其原理在于：影响土壤细菌群落组成的主要是 pH、土壤容重、全氮和硝态氮等因素。前述分析表明：稻鸭共作系统中的速效养分较高，因此土壤菌落多样性更为丰富^[39]。同时，稻鸭共作使土壤理化性质得到改善，使得土壤酸碱平衡得以维持，为土壤细菌的生存和繁殖提供了更适宜的环境^[40]。此外，稻鸭共作模式下，土壤细菌群落的结构组成更为复杂，变形菌门 *Proteobacteria* 等有益细菌门的数量显著增加，既提高了土壤碳氮循环效率，又保证了土壤环境的安全性和稳定性^[41-42]。综上，稻鸭共作通过改善土壤理化性质、增强土壤微生物的代谢活性等机制，提高了土壤细菌群落的多样性。

2.3.3 稻鸭共作对土壤酶活性的影响 稻鸭共作系统通过提升土壤中脲酶、脱氢酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、磷酸酶的活性，促进系统内部物质循环^[43]，其原理在于：土壤酶作为土壤生物化学反应的催化剂，其活性水平直接影响土壤养分转化效率和生态功能。脲酶活性的提升有助于土壤中氮素的转化和利用，从而促进水稻对氮肥的吸收^[39]；脱氢酶活性的增强则有效促进了土壤微生物代谢活动，有利于还原性物质的分解和土壤中有毒物质的释放；过氧化氢酶活性的提高能够增强土壤的氧化还原能力，进而改善土壤的通气性和结构^[14]。总体而言，稻鸭共作系统构建了可持续的土壤生物化学循环体系，通过促进土壤酶活性的动态变化和增强土壤的氧化还原能力，显著提升了土壤的生态功能和肥力水平。

2.4 稻鸭共作的“稳产”效应及其影响机制

2.4.1 稻鸭共作对水稻产量的影响 水稻的产量是生产者普遍关心的重要问题，也是鸭稻共作技术能否大面积推广应用的关键所在^[44]。基于文献数据绘制箱线图，比较稻鸭共作和单一水稻模式下水稻产量主要指标的差异^[23](图 3)。结果表明：与传统单一水稻模式相比，稻鸭共作模式下水稻产量 ($P<0.05$, 图 3A)、每穗实粒数 ($P<0.10$, 图 3B)、结实率 ($P<0.01$, 图 3C) 和千粒重 ($P<0.05$, 图 3D) 等反映水稻产量的主要指标分别显著上升了 13.99%、12.36%、8.30% 和 6.67%。



使用t检验分析稻鸭共作与单一水稻模式下水稻产量指标的差异显著性。*、**、*** 分别表示在0.10、0.05、0.01的水平上差异显著。箱体中部的横线表示50%分位数，下边缘和上边缘分别对应25%和75%分位数。下须表示非异常的最小值，上须表示非异常的最大值。数据主要来自文献[9, 11, 25, 27-28, 45-48]。

图3 稻鸭共作模式对水稻产量的影响

Figure 3 Impact of the rice-duck integrated farming system on rice yield

稻鸭共作对水稻产量的提升作用主要体现在以下几个方面：在稻田养鸭过程中，鸭子的游动、觅食等田间活动可改善水稻群体结构，减少无效分蘖且提高成穗率，并增强群体基部透光率^[45-46]，从而有利于增加水稻的分蘖以及整株的光合总面积，最终提高水稻产量^[47-48]。同时，鸭子的中耕浑水作用促进土壤氧气交换，增加水稻干物质质量和氮素积累，增强齐穗期根系活力，进而提高灌浆期叶片光合效率，最终通过增加实粒数和千粒重实现增产^[49]。此外，鸭子的杂食性可清除 90% 以上的杂草，减少杂草与水稻的营养竞争，间接促进产量提升^[50]。综合以上因素，与传统水稻种植方式相比，稻鸭共作通过改善土壤养分循环、控制杂草和害虫竞争，最终提高水稻产量^[51]。

2.4.2 稻鸭共作对稻米品质的影响 除了对水稻产量有积极影响外，稻鸭共作还通过生态互作机制对稻米品质产生多维度优化作用。在文献数据整理的基础上进一步探析稻鸭共作模式对稻米品质的影响。研究发现：与单一水稻模式相比，稻鸭共作模式显著提升了稻米品质指标中的加工品质（糙米率、精米率和整精米率分别提高 1.50%、1.76% 和 5.43%）、食用品质（胶稠度提高 6.31%）和外观品质（垩白率和垩白度分别下降 24.16 % 和 26.46 %），即稻鸭共作对稻米品质具有显著改善和提升作用。

梳理文献后发现主要作用机制包括以下几个方面：鸭粪作为有机肥可以为水稻生长提供氮、磷、钾等养分^[52]，同时鸭子通过搅动土壤，改善土壤物理结构，提升土壤氧化还原电位，增强土壤保肥能力，从而提高水稻籽粒的充实度与品质^[53]。鸭子通过捕食褐飞虱等有害动物，显著降低虫害基数和纹枯病 *Rhizoctonia solani* 等病害发生率，因而能有效减少农药施用^[54]。农药和化肥使用量的减少有助于改善土壤有机酸、酶活性等指标，使稻米在化学组分上呈现出更高的安全性和健康属性^[55]。LI 等^[56] 的研究进一步发现：稻鸭共作除了有助于提升精米率、胶稠度等一般品质外，还可以促进稻米中 2-乙酰基-1-吡咯啉生物合成酶 (2-AP) 的形成和积累，进一步丰富稻米风味。

2.4.3 稻鸭共作对鸭肉品质的影响 饲养方式是鸭肉品质的决定性因素^[57]。稻鸭共作不仅可以提升粮食产量和质量，其天然开放的饲养模式对生产高品质鸭肉也大有裨益^[58]。例如，卢跃红等^[59] 研究显示：与常规养殖模式相比，稻田养鸭能够提高鸭肉中各种营养物质的含量，鸭胸肌中棕榈酸、饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸的含量相较于对照组分别提高了 14.32%、1.35%、3.47%。陈亚迎等^[60] 研究也证实：稻鸭共作模式可降低料重比，并改善鸭子肌肉营养成分。

稻鸭共作模式对鸭肉品质的作用机制如下：首先，鸭群在开阔水域的高强度活动促使肌肉中快缩肌纤维向慢缩肌纤维转化，使得肌内脂肪均匀分布并提升肌肉密度与嫩度^[61]。其次，稻田生态系统中丰富的田螺、水蚯蚓等底栖生物提供多不饱和脂肪酸，结合水生植物的类黄酮等抗氧化物质，可以协同降低饱和脂肪酸比例并抑制脂质氧化^[62]。最后，自然光照通过视丘-垂体轴调节褪黑素分泌节律，在配合稻田水温刺激后，可以降低皮质酮等应激激素水平，减少肌纤维间脂肪异常沉积，促进鸭肉肉质紧实化^[63]。总体而言，稻鸭共作模式从生物、化学和物理等多个层面协同作用，使得鸭肉表现出更高的蛋白质含量、合理的脂肪分布和更优的风味口感。

2.5 稻鸭共作的“增收”效应及其影响机制

2.5.1 稻鸭共作对生产成本的影响 稻鸭共作可以实现成本结构的生态化重构，对降低水稻和鸭子生产成本均有积极影响^[64]。鸭群通过摄食行为对害虫、杂草进行生物防控并通过鸭粪排泄物与稻田系统形成封闭式养分循环，直接削减了农药和化肥投入成本^[54]。例如，秦钟等^[65] 和武向文等^[66] 均发现：相较于常规水稻种植，鸭稻共作模式下农药和化肥成本可以降低 80% 以上。鸭类的采食、排泄等行为可部分代替除草、中耕、追肥等农事作业，从而降低劳动力成本^[16]。袁伟玲等^[16] 的研究表明：稻鸭共作模式下稻田的劳动力成本下降 210 元·hm⁻²。此外，稻田系统中的杂草和昆虫也为鸭子提供了天然无公害的食物来源，从而降低养鸭所需的饲料成本。李俊营等^[67] 发现：稻鸭共作系统下平均日饲料消耗量为 75.70 g·只⁻¹。综合以上因素，稻鸭共作下水稻生产与鸭子养殖形成良性互补和循环，其综合生产成本低于常规生产模式。

2.5.2 稻鸭共作对产品价值的影响 稻鸭共作模式促进了生态产品的价值实现，其机制可归因于农产品品质提升与市场溢价效应。首先，该模式显著减少了农药和化肥投入，使水稻可以满足中国、欧盟及日本等主要市场的有机认证标准^[54]，提升产品溢价和市场认可度，使稻鸭米售价相较于普通大米溢价

300%~500%^[65, 68]。其次, 稻鸭共作通过改善畜产品品质进一步增强市场溢价效应。由于稻田鸭的生长环境好、生长周期长, 鸭肉符合绿色食品标准^[59], 因此稻田鸭在市场上具有价格优势^[62], 售价远高于普通鸭。此外, 通过纵向深加工与横向业态融合, 其产业链可向上下游延伸, 既能将鸭毛加工为羽绒制品、将稻壳转化为生物质燃料, 也能将鸭蛋腌制为特色食品, 提升副产品附加值^[69-70]。

2.5.3 稻鸭共作对综合收益的影响 稻鸭共作模式可显著降低农药、化肥及人工成本, 同时依托有机认证与产品溢价效应, 延伸出多元化副产品及多重收益^[71]。为探究稻鸭共作模式对综合经济收益的影响, 本研究对已有文献进行梳理和整合^[26, 72-73], 系统衡量了稻鸭共作和单一水稻模式在投入、产出和收益方面的差异。结果表明: 稻鸭共作模式提高了水稻产业的综合经济效益。与单一水稻模式相比, 稻鸭共作的农业投入成本更低, 产量和单价更高, 因此水稻整体收益 (73 700 元·hm⁻²) 更高, 加之鸭肉收益为 9 570 元·hm⁻², 稻鸭共作模式下农户总收益 (83 270 元·hm⁻²) 和净收益 (73 359 元·hm⁻²) 分别是单一水稻模式下总收益 (25 680 元·hm⁻²) 和净收益 (19 913 元·hm⁻²) 的 3.24 和 3.68 倍 (表 1)。

表 1 不同生产模式下综合经济收益的比较分析

Table 1 Comparative analysis of comprehensive economic benefits under different production models

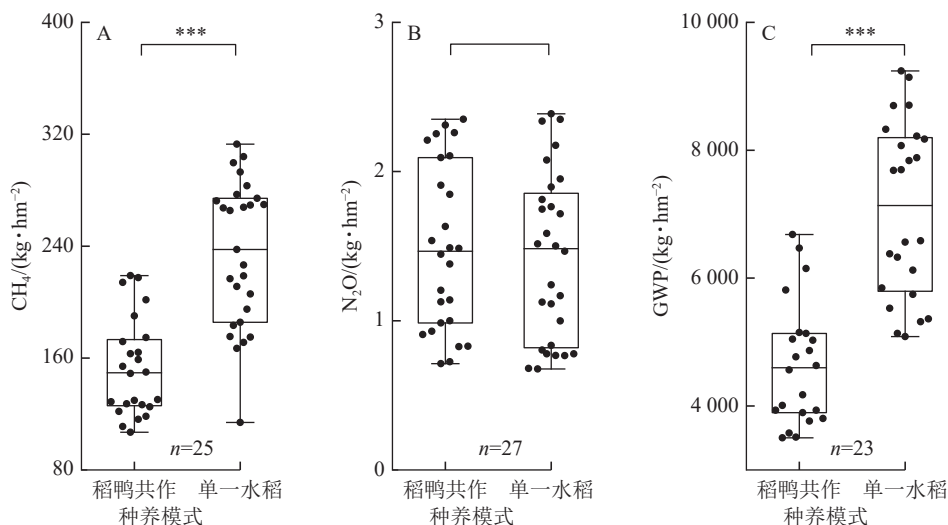
种养模式	投入/(元·hm ⁻²)							产出/(kg·hm ⁻²)		收益/(元·hm ⁻²)			净收益/(元·hm ⁻²)
	化肥	农药	鸭苗	饲料	施肥	管护	合计	稻米	鸭肉	稻米	鸭肉	合计	
稻鸭共作	1 262	409	661	4 996	861	1 722	9 911	7 370	638	73 700	9 570	83 270	73 359
单一水稻	1 577	1 042	0	0	2 303	845	5 767	7 337	0	25 680	0	25 680	19 913

说明: 表中仅列示稻鸭共作和单一水稻模式的差别性主要支出。设定单一水稻模式的稻米市场价为 3.5 元·kg⁻¹, 稻鸭共作模式的稻米市场价为 10.0 元·kg⁻¹, “稻田鸭”市场价为 15.0 元·kg⁻¹。数据主要来自文献^[26, 72-73]。

2.6 稻鸭共作的“固碳”效应及其影响机制

CO₂、CH₄ 和 N₂O 是引发气候变暖的主要温室气体, 而稻田生态系统则是上述温室气体的重要来源^[65]。图 4 展示了基于已有相关文献数据^[23] 计算的不同种植模式下稻田生态系统 CH₄、N₂O 和全球增温潜势 (GWP) 的差异。可以发现: 与单一水稻系统相比, 稻鸭共作系统下 CH₄ 排放量显著降低 34.86%($P < 0.01$, 图 4A)。N₂O 排放量增长了 4.41%, 但未通过显著性检验 ($P > 0.10$, 图 4B)。综合各类温室气体排放情况, 稻鸭共作使稻田系统的 GWP 显著下降了 34.15%($P < 0.01$, 图 4C), 从而缓解了水稻生产对气候变化影响。由于 CO₂ 样本量过少, 不具有统计学意义, 因此这里不作相关数据分析。

2.6.1 稻鸭共作对 CH₄ 排放的影响 稻田 CH₄ 年均排放量占全球 CH₄ 年均总排放量的 10%~13%, 是重要的人工碳源之一^[74]。稻鸭共作主要通过以下途径影响稻田 CH₄ 排放: 首先, 鸭子的稻田活动可以搅动



使用 t 检验分析稻鸭共作与单一水稻模式下水稻碳排放指标的差异显著性。*、**、*** 分别表示在 0.10、0.05、0.01 的水平上差异显著。箱体中部的横线表示 50% 分位数, 下边缘和上边缘分别对应 25% 和 75% 分位数。下须表示非异常的最小值, 上须表示非异常的最大值。数据主要来自文献^[12, 15, 56, 78, 80-81]。

图 4 稻鸭共作模式对水稻碳排放的影响

Figure 4 Impact of rice-duck integrated farming system on rice-related carbon emissions

水体和土壤,增加水体与土壤的氧气交换,破坏 CH_4 产生所需的厌氧环境,抑制产甲烷菌的活性,从而减少 CH_4 的生成^[75]。其次,鸭子觅食活动还会抑制杂草和藻类生长,防止植物残体在厌氧条件下成为产甲烷菌的底物^[76-77]。此外,稻田水位深度也是影响 CH_4 排放的重要因素。稻鸭共作模式下,稻田水位的加深有利于降低土壤温度,并削弱液相扩散和弱气泡2条传输通道,导致 CH_4 排放降低^[78]。最后,鸭粪作为有机肥替代部分化学肥料,其在好氧条件下分解后更易生成 CO_2 而非 CH_4 ,有效避免了化肥生产和使用中的碳排放^[79]。

2.6.2 稻鸭共作对 N_2O 和 CO_2 排放的影响 已有研究表明:稻鸭共作对稻田 N_2O 和 CO_2 排放的影响具有不确定性^[15,80]。一方面,稻鸭共作作为绿色农业关键技术,可以通过生物防控和养分循环直接削减农药和化肥投入^[54],进而降低由农业化学品导致的碳排放。徐南昌等^[81]的研究表明:稻鸭共作模式下水稻农药用量减少 $868.2\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$,化肥用量减少 $345.0\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。另一方面,鸭粪作为氮源的补充,含有高质量浓度的铵态氮,为土壤中硝化和反硝化过程提供了充足底物,会导致 N_2O 排放增加^[75]。同时,鸭子栖息和活动加速了土壤与大气的交换,增加了土壤与氧气接触的机会,在改善土壤的氧化还原状况的同时促进了土壤微生物的好氧呼吸,进而增加稻田 CO_2 排放量。

2.6.3 稻鸭共作的综合温室效应 稻鸭共作模式下,鸭子的田间活动在降低稻田 CH_4 排放的同时增加了 N_2O 和 CO_2 排放,因此,稻鸭共作的综合增温效应还需要进一步确定。展茗等^[82]通过田间试验发现: CH_4 是引起稻田温室效应的主体,其贡献率在60%左右。SHENG等^[83]和王强盛等^[84]的研究也得到类似的结论,发现稻鸭共作模式下,虽然 N_2O 和 CO_2 排放有所增加,但 CH_4 排放量大幅降低,最终导致GWP也大幅下降。因此,综合 CH_4 、 N_2O 和 CO_2 三大温室气体的变化情况和增温效应,稻鸭共作有助于实现农业绿色发展。

3 研究结论

本研究通过创新构建“水-土-粮-经-碳”系统协同框架,对中国稻鸭共作创意模式的发展进程、生态效应及其机制进行分析,得出结论如下:①中国稻鸭共作经历了理念植入与技术萌芽、技术引进与产业塑形、规范建设与技术推广、技术迭代与创意发展4个时期,既精准契合现代农业技术演进脉络,也为农业可持续发展提供了创新范式。②稻鸭共作显著优化了电导率以及溶解氧和养分质量浓度等水体理化性质,同时改良了土壤结构,增强了土壤酶活性,增加了土壤的微生物多样性,并通过水土界面物质交换强化了系统的生态调控功能,实现了田间水土环境的协同改善。③稻鸭共作促进了水稻产量与稻米品质的提升以及鸭肉风味的改善,有效提升了农产品市场竞争力和溢价潜力,在降低生产成本的同时提高了综合收益,为创意农业的价值实现提供了实践路径。④稻鸭共作显著抑制 CH_4 排放并小幅影响其他温室气体释放,综合作用下使稻田生态系统的GWP整体下降,有助于缓解农业生产对气候变化的负面影响,为农业碳中和提供生态化解决方案。未来在产业发展和生态可持续层面仍待突破若干关键科学问题,以期提高稻鸭共作的适应性与可持续性。

4 参考文献

- [1] HE Xueqing, BATÁRY P, ZOU Yi, *et al.* Agricultural diversification promotes sustainable and resilient global rice production [J]. *Nature Food*, 2023, 4(9): 788–796.
- [2] 丁存振, 纪祥宇. 全球粮食供应链韧性测度及其演化研究[J]. *地理科学进展*, 2025, 44(1): 103–116.
DING Cunzhen, JI Xiangyu. Resilience of the global grain supply chain and change [J]. *Progress in Geography*, 2025, 44(1): 103–116.
- [3] GAO Yujing, CUI Jinglan, ZHANG Xiuming, *et al.* Cost-effective adaptations increase rice production while reducing pollution under climate change [J]. *Nature Food*, 2025, 6(3): 260–272.
- [4] SUH J. Theory and reality of integrated rice-duck farming in Asian developing countries: a systematic review and SWOT analysis [J]. *Agricultural Systems*, 2014, 125: 74–81.
- [5] 王强盛. 稻田种养结合循环农业温室气体排放的调控与机制[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(5): 633–642.
WANG Qiangsheng. Regulation and mechanism of greenhouse gas emissions of circular agriculture ecosystem of planting and breeding in paddy [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(5): 633–642.

- [6] 王强盛, 王晓莹, 杭玉浩, 等. 稻田综合种养结合模式及生态效应[J]. *中国农学通报*, 2019, **35**(8): 46–51.
WANG Qiangsheng, WANG Xiaoying, HANG Yuhao, *et al.* Combination modes and ecological effects of planting-breeding ecosystem in rice field [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, **35**(8): 46–51.
- [7] 梁玉刚, 赵杨, 戴力, 等. 稻鸭共育模式综述[J]. *生态学杂志*, 2022, **41**(11): 2254–2262.
LIANG Yugang, ZHAO Yang, DAI Li, *et al.* Rice-duck farming: a review [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, **41**(11): 2254–2262.
- [8] GAO Hui, DAI Linxiu, XU Qiang, *et al.* Transforming agrifood systems in a win-win for health and environment: evidence from organic rice-duck coculture [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, **103**(2): 968–975.
- [9] 甄若宏, 王强盛, 何加骏, 等. 稻鸭共作对水稻产量和品质的影响[J]. *农业现代化研究*, 2008, **29**(5): 615–617.
ZHEN Ruohong, WANG Qiangsheng, HE Jiajun, *et al.* Effects of rice-duck integrated farming on rice yield and quality [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2008, **29**(5): 615–617.
- [10] PERNOLLET C A, SIMPSON D, GAUTHIER-CLERC M, *et al.* Rice and duck, a good combination? Identifying the incentives and triggers for joint rice farming and wild duck conservation[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, **214**: 118–132.
- [11] LI Meijuan, LI Ronghua, ZHANG Jia'en, *et al.* Effects of the integration of mixed-cropping and rice-duck co-culture on rice yield and soil nutrients in southern China [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, **100**(1): 277–286.
- [12] ZHAN Ming, CAO Cougui, WANG Jinping, *et al.* Dynamics of methane emission, active soil organic carbon and their relationships in wetland integrated rice-duck systems in Southern China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, **89**(1): 1–13.
- [13] TENG Qing, HU Xuefeng, CHENG Chang, *et al.* Ecological effects of rice-duck integrated farming on soil fertility and weed and pest control [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, **16**(10): 2395–2407.
- [14] 兰国俊, 胡雪峰, 程畅, 等. 稻鸭共生对土壤养分和水稻病虫害防控的影响[J]. *土壤学报*, 2021, **58**(5): 1299–1310.
LAN Guojun, HU Xuefeng, CHENG Chang, *et al.* Effects of raising duck in paddy field on soil nutrients and rice pests and diseases control [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, **58**(5): 1299–1310.
- [15] ZHANG Jia'en, OUYANG Ying, HUANG Zhaoxiang. Characterization of nitrous oxide emission from a rice-duck farming system in south China [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2008, **54**(2): 167–172.
- [16] 袁伟玲, 曹凑贵, 李成芳, 等. 稻鸭、稻鱼共作生态系统 CH_4 和 N_2O 温室效应及经济效益评估[J]. *中国农业科学*, 2009, **42**(6): 2052–2060.
YUAN Weiling, CAO Cougui, LI Chengfang, *et al.* Methane and nitrous oxide emissions from rice-fish and rice-duck complex ecosystems and the evaluation of their economic significance [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, **42**(6): 2052–2060.
- [17] LONG Pan, HUANG Huang, LIAO Xiaolan, *et al.* Mechanism and capacities of reducing ecological cost through rice-duck cultivation [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2013, **93**(12): 2881–2891.
- [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] 李桂萍, 许小妹, 卢立志. 稻鸭共作及其环境效应[J/OL]. *浙江农业学报*, 2024-10-17[2025-03-02]. <https://link.cnki.net/urlid/33.1151.S.20241017.1114.008>.
LI Guiping, XU Xiaomei, LU Lizhi. Rice-duck farming and its environmental effects[J/OL]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2024-10-17[2025-03-02]. <https://link.cnki.net/urlid/33.1151.S.20241017.1114.008>.
- [20] 张波, 丘俊超, 罗琤琤, 等. 从“稻田放鸭”到“稻田养鸭”: 明清时期“稻田养鸭”技术与特点——以广东地区为中心[J]. *农业考古*, 2015(1): 34–40.
ZHANG Bo, QIU Junchao, LUO Zhengzheng, *et al.* From “releasing ducks in paddy fields” to “raising ducks in paddy fields”: the technology and characteristics of “raising ducks in paddy fields” in the Ming and Qing Dynasties: centered on Guangdong region [J]. *Agricultural Archaeology*, 2015(1): 34–40.
- [21] 刘星辰, 杨振山. 日本稻作生态农业发展途径与模式[J]. *经济地理*, 2011, **31**(11): 1891–1896.
LIU Xingchen, YANG Zhenshan. Progress in the ecological development of paddy rice in Japan [J]. *Economic Geography*, 2011, **31**(11): 1891–1896.
- [22] 郑建初, 谭淑豪, 刘华周, 等. 中国稻鸭共作系统的理论与技术现状及其发展策略[J]. *江苏农业科学*, 2005(5): 1–5.
ZHENG Jianchu, TAN Shuhao, LIU Huazhou, *et al.* Current situation of theory, technology and development strategy of

- rice-duck co-cropping system in China [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2005(5): 1–5.
- [23] FENG Lei, WANG Ruiyi, WANG Rui, *et al.* Life cycle assessment of rice-duck co-culture systems[J/OL]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2024, **10**: 0166[2025-03-02]. DOI: [10.34133/ehs.0166](https://doi.org/10.34133/ehs.0166).
- [24] YU Haiyang, ZHANG Xuechen, SHEN Wanyu, *et al.* A meta-analysis of ecological functions and economic benefits of co-culture models in paddy fields[J/OL]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, **341**: 108195[2025-03-02]. DOI: [10.1016/j.agee.2022.108195](https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108195).
- [25] 全国明, 章家恩, 陈瑞, 等. 稻鸭共作对稻田水体环境的影响[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(9): 2023–2028.
QUAN Guoming, ZHANG Jia'en, CHEN Rui, *et al.* Effects of rice-duck farming on paddy field water environment [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, **19**(9): 2023–2028.
- [26] 续勇波, 白采禾, 陈玮, 等. 洱海流域有机肥替代化肥对稻鸭共育下水稻产量和田面水氮磷浓度的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024-11-11[2025-03-02] <https://link.cnki.net/urlid/12.1347.S.20241111.1057.002>.
XU Yongbo, BAI Caihe, CHEN Wei, *et al.* Effects of organic fertilizers replacing chemical fertilizers on rice yield and nitrogen and phosphorus concentrations under rice-duck co-cultivation in the Erhai watershed [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024-11-11[2025-03-02] <https://link.cnki.net/urlid/12.1347.S.20241111.1057.002>.
- [27] 纪力, 邵文奇, 陈富平, 等. 连年规模稻鸭共养对稻田土壤性状、稻米产量及品质的影响[J]. 中国农学通报, 2021, **37**(13): 1–7.
JI Li, SHAO Wenqi, CHEN Fuping, *et al.* Effects of successive years of rice-duck co-cultivation on soil properties, rice yield and quality in paddy field [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, **37**(13): 1–7.
- [28] 张印, 余政军, 王忍, 等. 鸭品种对稻鸭共生系统土壤理化性质、水稻产量及经济效益的影响[J]. 河南农业科学, 2021, **50**(12): 23–31.
ZHANG Yin, YU Zhengjun, WANG Ren, *et al.* Effects of different duck varieties on soil physical and chemical properties, rice yield and economic benefit of rice-duck symbiosis system [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2021, **50**(12): 23–31.
- [29] YANG Haishui, YU Degui, ZHOU Jiajia, *et al.* Rice-duck co-culture for reducing negative impacts of biogas slurry application in rice production systems [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, **213**: 142–150.
- [30] LI M J, LI R H, ZHANG J E, *et al.* Integration of mixed-cropping and rice-duck co-culture has advantage on alleviating the nonpoint source pollution from rice (*Oryza sativa* L.) production [J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2020, **18**(1): 1281–1300.
- [31] BAMBARADENIYA C, AMARASINGHE F. *Biodiversity Associated with the Rice Field Agro-ecosystem in Asian Countries: A Brief Review*[M]. Colombo: International Water Management Institute, 2003.
- [32] 王晓莹, 冯金侠, 韦生宝, 等. 不同年限稻鸭共作对水体藻类群落结构的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, **40**(9): 1860–1868.
WANG Xiaoying, FENG Jinxia, WEI Shengbao, *et al.* Effects of different durations of rice-duck farming on the structure of algal communities in water [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, **40**(9): 1860–1868.
- [33] LI Meijuan, LI Ronghua, ZHANG Jia'en, *et al.* A combination of rice cultivar mixed-cropping and duck co-culture suppressed weeds and pests in paddy fields [J]. *Basic and Applied Ecology*, 2019, **40**: 67–77.
- [34] BASHIR M A, XU Yang, WANG Hongyuan, *et al.* Integrated rice-crab co-culture system shows capability to reduce greenhouse gases emission and global warming potential[J/OL]. *Aquaculture*, 2025, **598**: 742047[2025-03-02]. DOI: [10.1016/j.aquaculture.2024.742047](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.742047).
- [35] JAHAN I, AHSAN A A, JAHANGIR M M R, *et al.* Changes in physico-chemical properties of paddy soil due to water and fertilizer management [J]. *Asian-Australasian Journal of Bioscience and Biotechnology*, 2020, **5**(2): 65–71.
- [36] ZHANG Wanyang, XU Mingshuang, LU Jianwei, *et al.* Integrated rice-aquatic animals culture systems promote the sustainable development of agriculture by improving soil fertility and reducing greenhouse gas emissions[J/OL]. *Field Crops Research*, 2023, **299**: 108970[2025-03-02]. DOI: [10.1016/j.fcr.2023.108970](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108970).
- [37] ZHANG Jia'en, ZHAO Benliang, CHEN Xin, *et al.* Insect damage reduction while maintaining rice yield in duck-rice farming compared with mono rice farming [J]. *Journal of Sustainable Agriculture*, 2009, **33**(8): 801–809.
- [38] VIPRIYANTI N U, LYULIANTI S P, PUSPAWATI D A, *et al.* The efficiency of duck rice integrated system for sustainable farming[J/OL]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, **892**(1): 012008[2025-03-02]. DOI: [10.1088/1755-1315/892/1/012008](https://doi.org/10.1088/1755-1315/892/1/012008).

- [39] HAN Ning, YANG Chaoran, LIU Mengting, *et al.* Long-term rice-duck farming promotes more complex and stable bacterial communities [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2024, **24**(4): 1739–1749.
- [40] 廖咏梅, 黄元腾吉, 韩宁宁, 等. 稻鸭共育模式下水稻根际土壤真菌和细菌种群多样性分析[J]. *南方农业学报*, 2019, **50**(1): 59–67.
- LIAO Yongmei, HUANG Yuantengji, HAN Ningning, *et al.* Analysis of population diversity of fungi and bacteria in rice rhizosphere soil under rice-duck farming model [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2019, **50**(1): 59–67.
- [41] 张军, 刘菁, 陈长青. 有机稻鸭共作对土壤理化性状和细菌群落空间分布的影响[J]. *生态学杂志*, 2020, **39**(3): 822–829.
- ZHANG Jun, LIU Jing, CHEN Changqing. Effects of organic rice-duck farming on soil physicochemical properties and spatial distribution of bacterial community [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39**(3): 822–829.
- [42] WANG Chao, YANG Qiannan, ZHANG Chi, *et al.* Rice-fish-duck system regulation of soil phosphorus fraction conversion and availability through organic carbon and phosphatase activity[J/OL]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, **10**: 979234[2025-03-02]. DOI: [10.3389/fenvs.2022.979234](https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.979234).
- [43] YAN Jun, YU Jingwei, HUANG Wei, *et al.* Initial studies on the effect of the rice-duck-crayfish ecological co-culture system on physical, chemical, and microbiological properties of soils: a field case study in Chaohu Lake Basin, southeast China[J/OL]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, **20**(3): 2006[2025-03-02]. DOI: [10.3390/ijerph20032006](https://doi.org/10.3390/ijerph20032006).
- [44] KHUMAIROH U, GROOT J C J, LANTINGA E A. Complex agro-ecosystems for food security in a changing climate [J]. *Ecology and Evolution*, 2012, **2**(7): 1696–1704.
- [45] 王强盛, 黄丕生, 甄若宏, 等. 稻鸭共作对稻田营养生态及稻米品质的影响[J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(4): 639–645.
- WANG Qiangsheng, HUANG Pisheng, ZHEN Ruohong, *et al.* Effect of rice-duck mutualism on nutrition ecology of paddy field and rice quality [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, **15**(4): 639–645.
- [46] 章家恩, 许荣宝, 全国明, 等. 鸭稻共作对水稻植株生长性状与产量性状的影响[J]. *资源科学*, 2011, **33**(6): 1053–1059.
- ZHANG Jia'en, XU Rongbao, QUAN Guoming, *et al.* Influence of rice-duck integrated farming on rice growth and yield characteristics [J]. *Resources Science*, 2011, **33**(6): 1053–1059.
- [47] AZIZI M, SYAMSUDDIN S, BASYAH B. Integration of rice-duck on growth and yield of paddy crops (*Oryza sativa* L.) [J/OL]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2023, **1183**(1): 012090[2025-03-02]. DOI: [10.1088/1755-1315/1183/1/012090](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1183/1/012090).
- [48] YANG Chaoran, HAN Ning, LIU Mengting, *et al.* Effects of long-term different-scale rice-duck farming on the growth and yield of paddy rice [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2024, **104**(6): 3729–3735.
- [49] 孙宇, 顾辉杰, 王培玉, 等. 稻鸭综合种养模式下水稻产量与效益分析[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2020, **41**(1): 71–75.
- SUN Yu, GU Huijie, WANG Peiyu, *et al.* An analysis of relative economic benefits in rice-duck farming fields [J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2020, **41**(1): 71–75.
- [50] 甄若宏, 王强盛, 张卫建, 等. 稻鸭共作对稻田主要病、虫、草的生态控制效应[J]. *南京农业大学学报*, 2007, **30**(2): 60–64.
- ZHEN Ruohong, WANG Qiangsheng, ZHANG Weijian, *et al.* Ecological control effects of rice-duck integrated farming on main diseases, insects and weeds in paddy fields ecosystem [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2007, **30**(2): 60–64.
- [51] HOSSAIN S T, SUGIMOTO H, AHMED G J U, *et al.* Effect of integrated rice-duck farming on rice yield, farm productivity, and rice-provisioning ability of farmers [J]. *Asian Journal of Agriculture and Development*, 2005, **2**(1/2): 79–86.
- [52] 陈帅君, 边嘉宾, 丁得亮, 等. 不同有机肥处理对水稻品质和食味的影响[J]. *中国稻米*, 2016, **22**(4): 42–45.
- CHEN Shuaijun, BIAN Jiabin, DING Deliang, *et al.* Effects of organic fertilizers on quality and palatability of rice [J]. *China Rice*, 2016, **22**(4): 42–45.
- [53] 全国明, 章家恩, 杨军, 等. 稻鸭共作对稻米品质的影响[J]. *生态学报*, 2008, **28**(7): 3475–3483.
- QUAN Guoming, ZHANG Jia'en, YANG Jun, *et al.* Impacts of integrated rice-duck farming system on rice quality [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(7): 3475–3483.
- [54] 魏守辉, 杨峻, 朱文达, 等. 稻鸭共作对稻田杂草的控制效果及其经济效益[J]. *湖北农业科学*, 2013, **52**(9): 2053–2056.
- WEI Shouhui, YANG Jun, ZHU Wenda, *et al.* Weed control efficacy and economic benefits of rice-duck farming in paddy

- rice fields [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, **52**(9): 2053–2056.
- [55] 王建林, 李婕, 曹元元. 稻鸭共生有机栽培模式对黄河三角洲稻米品质的影响[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(7): 2315–2320.
- WANG Jianlin, LI Jie, CAO Yuanyuan. Effects of rice-duck mutualistic organic farming on rice quality in the Yellow River Delta, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(7): 2315–2320.
- [56] LI Meijuan, LI Ronghua, LIU Shiwei, *et al.* Rice-duck co-culture benefits grain 2-acetyl-1-pyrroline accumulation and quality and yield enhancement of fragrant rice [J]. *The Crop Journal*, 2019, **7**(4): 419–430.
- [57] ABDEL-HAMID S E, SALEEM A S Y, YOUSSEF M I, *et al.* Influence of housing systems on duck behavior and welfare [J]. *Journal of Advanced Veterinary and Animal Research*, 2020, **7**(3): 407–413.
- [58] 卢跃红, 戴志明, 张曦, 等. 稻鸭共生对鸭肉品质的影响 (II) [J]. 黑龙江畜牧兽医, 2009(8): 17–18.
- LU Yuehong, DAI Zhiming, ZHANG Xi, *et al.* The effects of rice-duck symbiosis on the quality of duck meat (II) [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2009(8): 17–18.
- [59] 卢跃红, 戴志明, 张曦, 等. 稻鸭共生对鸭肉品质的影响 (I) [J]. 黑龙江畜牧兽医, 2009(6): 15–16.
- LU Yuehong, DAI Zhiming, ZHANG Xi, *et al.* The effects of rice-duck symbiosis on the quality of duck meat (I) [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2009(6): 15–16.
- [60] 陈亚迎, 吴永胜, 刘瀚扬, 等. 羊粪有机肥的稻鸭共作模式对成都麻鸭生产性能、屠宰性能及肌肉营养成分的影响[J]. 中国饲料, 2020(13): 105–108.
- CHEN Yaying, WU Yongsheng, LIU Hanyang, *et al.* Effects of integrated rice-duck co-farming with goat organic manure on growth performance, slaughter performance and muscle nutritional composition of Chengdu Sheldrake duck [J]. *China Feed*, 2020(13): 105–108.
- [61] 吕明斌, 赵敏, 吕尊周, 等. 肉鸭肉品质影响因素研究进展[J]. 中国家禽, 2016, **38**(22): 46–49.
- LÜ Mingbin, ZHAO Min, LÜ Zunzhou, *et al.* Research advances on influence factors of meat quality in duck [J]. *China Poultry*, 2016, **38**(22): 46–49.
- [62] HUO Weiran, WENG Kaiqi, GU Tiantian, *et al.* Effects of integrated rice-duck farming system on duck carcass traits, meat quality, amino acid, and fatty acid composition[J/OL]. *Poultry Science*, 2021, **100**(6): 101107[2025-03-02]. DOI: 10.1016/j.psj.2021.101107.
- [63] LIU Hehe, XIONG Xia, PU Fajun, *et al.* Stocking density affects transcriptome changes in the hypothalamic-pituitary-gonadal axis and reproductive performance in ducks [J]. *Italian Journal of Animal Science*, 2022, **21**(1): 955–966.
- [64] 唐世凯, 刘丽芳, 汤利, 等. 稻+鸭生物互作的综合经济效益研究[J]. 农学学报, 2019, **9**(10): 84–88.
- TANG Shikai, LIU Lifang, TANG Li, *et al.* Comprehensive economic benefits of rice-duck biological interaction [J]. *Journal of Agriculture*, 2019, **9**(10): 84–88.
- [65] 秦钟, 章家恩, 骆世明, 等. 稻鸭共作系统生态服务功能价值的评估研究[J]. 资源科学, 2010, **32**(5): 864–872.
- QIN Zhong, ZHANG Jia'en, LUO Shiming, *et al.* Estimation of ecological services value for the rice-duck farming system [J]. *Resources Science*, 2010, **32**(5): 864–872.
- [66] 武向文, 顾士光, 费全凤, 等. 上海地区稻鸭共作的生态与经济效益分析[J]. 中国植保导刊, 2015, **35**(9): 27–31.
- WU Xiangwen, GU Shiguang, FEI Quanfeng, *et al.* The analysis of the ecological and economic benefits of rice-duck mutualism in Shanghai area [J]. *China Plant Protection*, 2015, **35**(9): 27–31.
- [67] 李俊营, 刘伟, 钱立祥, 等. 稻鸭共生对枞阳媒鸭生产性能和血液生化指标的影响[J]. 中国家禽, 2018, **40**(7): 32–36.
- LI Junying, LIU Wei, QIAN Lixiang, *et al.* Effect of rice-duck ecosystem on production performance and blood biochemical indices of Zongyang Mei Duck [J]. *China Poultry*, 2018, **40**(7): 32–36.
- [68] 赵建设, 杨巧云, 谢凯权, 等. “稻鸭共作”模式的生态效益及其在生态农场应用的经济效益分析[J]. 中国农业科技导报, 2019, **21**(11): 149–156.
- ZHAO Jianshe, YANG Qiaoyun, XIE Kaiquan, *et al.* Analysis of ecological benefit of “rice-duck farming” model and its economic benefit in ecological farm [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2019, **21**(11): 149–156.
- [69] 欧明胜, 肖华, 李曾. 稻鸭共生特色产业发展趋势探讨[J]. 农村经济, 2007(4): 51–52.
- OU Mingsheng, XIAO Hua, LI Zeng. The discussion on the development trend of the characteristic industry of rice-duck symbiosis [J]. *Rural Economy*, 2007(4): 51–52.
- [70] 谢宁, 朱彬, 阮若卉, 等. 江西省毛鸭产业链的价格动态传导机制[J]. 中国家禽, 2021, **43**(6): 67–72.
- XIE Ning, ZHU Bin, RUAN Ruohui, *et al.* Study on the price transmission path of hairy duck industry chain in Jiangxi

- Province [J]. *China Poultry*, 2021, **43**(6): 67–72.
- [71] 谭淑豪, 刘青, 张清勇. 稻田综合种养土地利用的生态-经济效果——以湖北省稻虾共作为例[J]. *自然资源学报*, 2021, **36**(12): 3131–3143.
- TAN Shuhao, LIU Qing, ZHANG Qingyong. Study on the ecological-economic effects of rice-aquatic coculture land use pattern: the case of rice-crayfish coculture in Hubei Province [J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, **36**(12): 3131–3143.
- [72] ZHENG Huabin, HUANG Huang, LI Diqin, *et al.* Assessment of nomadic rice-duck complex ecosystem on energy and economy[J/OL]. *Ecological Processes*, 2014, **3**(1): 20[2025-03-02]. DOI: [10.1186/s13717-014-0020-y](https://doi.org/10.1186/s13717-014-0020-y).
- [73] QIAN Ping, QUAIS M K, ZHOU Wenwu, *et al.* Effects of integrated rice-duck farming on weed pressure, herbivore-predator interactions and economic benefits [J]. *Biocontrol Science and Technology*, 2022, **32**(6): 715–730.
- [74] 唐志伟, 张俊, 邓艾兴, 等. 我国稻田甲烷排放的时空特征与减排途径[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, **30**(4): 582–591.
- TANG Zhiwei, ZHANG Jun, DENG Aixing, *et al.* Spatiotemporal characteristics and reduction approaches of methane emissions from rice fields in China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, **30**(4): 582–591.
- [75] 温婷, 赵本良, 章家恩. 稻鸭共作中 CH₄ 和 N₂O 排放规律及影响因素[J]. *农业环境科学学报*, 2020, **39**(7): 1442–1450.
- WEN Ting, ZHAO Benliang, ZHANG Jia'en. Emission pathways and influencing factors for CH₄ and N₂O from rice-duck farming [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(7): 1442–1450.
- [76] 张卫星, 许立, 谢桐洲, 等. 稻鸭生态种养与低碳高效生产[J]. *浙江农业科学*, 2012(7): 923–926.
- ZHANG Weixing, XU Li, XIE Tongzhou, *et al.* The ecological cultivation of rice and ducks and low-carbon and high-efficiency production [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2012(7): 923–926.
- [77] 许国春, 刘欣, 王强盛, 等. 稻鸭种养生态系统的碳氮效应及其循环特征[J]. *江苏农业科学*, 2015, **43**(10): 393–396.
- XU Guochun, LIU Xin, WANG Qiangsheng, *et al.* The carbon and nitrogen effects and their circulation characteristics of the rice-duck farming ecosystem [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, **43**(10): 393–396.
- [78] XU Guochun, LIU Xin, WANG Qiangsheng, *et al.* Integrated rice-duck farming mitigates the global warming potential in rice season [J]. *Science of The Total Environment*, 2017, **575**: 58–66.
- [79] 赵本良, 沈启斌, 章家恩, 等. 根区施加鸭排泄物对水稻生长及甲烷排放的影响[J]. *生态科学*, 2017, **36**(6): 1–7.
- ZHAO Benliang, SHEN Qibin, ZHANG Jia'en, *et al.* Effects of duck excrement addition in root zone on rice growth and methane emission [J]. *Ecological Science*, 2017, **36**(6): 1–7.
- [80] 陈璐, 陈灿, 黄璜, 等. 厢作免耕下生态种养对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, **40**(6): 1354–1365.
- CHEN Lu, CHEN Can, HUANG Huang, *et al.* Effects of ecological planting symbiosis on CH₄ and N₂O emissions from rice fields under wide ridge cultivation with no-tillage [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, **40**(6): 1354–1365.
- [81] 徐南昌, 莫小荣, 张勇. 稻鸭共生对肥药的减量增效作用[J]. *浙江农业科学*, 2016, **57**(12): 2117–2119.
- XU Nanchang, MO Xiaorong, ZHANG Yong. Effect of rice-duck symbiosis on reduction and enhancement of fertilizer drugs [J]. *Zhejiang Agricultural Sciences*, 2016, **57**(12): 2117–2119.
- [82] 展茗, 曹凑贵, 汪金平, 等. 稻鸭复合系统的温室气体排放及其温室效应[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(2): 420–426.
- ZHAN Ming, CAO Cougui, WANG Jinping, *et al.* Greenhouse gas emissions from an integrated rice-duck system and its Global Warming Potentials (GWPs) [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(2): 420–426.
- [83] SHENG Feng, CAO Cougui, LI Chengfang. Integrated rice-duck farming decreases global warming potential and increases net ecosystem economic budget in central China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(23): 22744–22753.
- [84] 王强盛, 刘欣, 许国春, 等. 稻鸭共作对不同栽培环境稻季 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *土壤*, 2023, **55**(6): 1279–1288.
- WANG Qiangsheng, LIU Xin, XU Guochun, *et al.* Effects of rice-duck farming on CH₄ and N₂O emissions in rice season under different cultivation environments [J]. *Soils*, 2023, **55**(6): 1279–1288.