

引用格式: 陈思思, 汪珂宇, 应利平, 等. 蛙投放密度对稻蛙综合种养模式土壤团粒结构和养分及水稻产量的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(4): 765–773. CHEN Sisi, WANG Keyu, YING Liping, *et al.* Effects of frog density on soil aggregate structure, soil nutrient and rice yield in rice-frog integrated farming model[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(4): 765–773.

蛙投放密度对稻蛙综合种养模式土壤团粒结构和养分及水稻产量的影响

陈思思¹, 汪珂宇², 应利平¹, 鲁燕君¹, 林敏¹, 凌强²

(1. 杭州市临安区农林技术推广中心 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学 环境与资源学院 浙江 杭州 311300)

摘要: 【目的】分析稻蛙综合种养模式对土壤团粒结构和土壤养分及水稻 *Oryza sativa* 产量的影响, 为构建稻蛙综合种养模式提供理论依据。【方法】2023 年 4—9 月在浙江省杭州市临安区进行田间试验, 设置 4 种蛙投放处理: 低密度 (T1, 0.9 万只·hm⁻²)、中密度 (T2, 1.2 万只·hm⁻²)、高密度 (T3, 1.8 万只·hm⁻²) 和对照处理 (单作水稻, ck), 分析不同蛙投放密度处理下土壤团粒结构、土壤养分及水稻产量的差异。【结果】与对照相比, 稻蛙综合种养模式显著降低土壤容重, 显著提高土壤水稳性大团聚体质量分数 ($P<0.05$), 且随着蛙投放密度的增加, 土壤水稳性大团聚体质量分数呈上升趋势。稻蛙综合种养模式对土壤全氮质量分数影响不显著, 土壤铵态氮质量分数随蛙投放密度的增加呈下降趋势, 但显著提高土壤硝态氮质量分数 ($P<0.05$)。T1 处理显著降低土壤全磷和速效磷质量分数, 但随蛙投放密度的增加, 土壤全磷和速效磷质量分数均呈增加趋势。中高密度处理显著降低土壤速效钾质量分数 ($P<0.05$)。稻蛙综合种养模式显著降低土壤有机质质量分数 ($P<0.05$), 尤其在 T2 和 T3 处理中下降幅度较大。稻蛙综合种养模式中水稻有效穗数、结实率和产量均显著低于对照 ($P<0.05$), 其中, T3 处理产量下降幅度最小, 为 15.49%。综合效益而言, 稻蛙综合种养模式均显著高于对照处理 ($P<0.05$), 且随着投放密度的增加, 综合效益呈增加趋势。【结论】高密度蛙投放处理稻蛙综合种养模式的土壤团粒结构改善最为明显, 土壤养分仍能保持一定水平, 水稻产量下降幅度较小, 综合效益最为显著, 是推荐的适宜稻蛙综合种养模式。建议可在非稻蛙共生期提高氮肥与钾肥以及有机肥施用量, 维持养分平衡, 稳定水稻穗数, 促进丰产。图 4 表 1 参 37

关键词: 稻蛙综合种养; 土壤团粒结构; 土壤养分; 水稻产量

中图分类号: S511 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)04-0765-09

Effects of frog density on soil aggregate structure, soil nutrient and rice yield in rice-frog integrated farming model

CHEN Sisi¹, WANG Keyu², YING Liping¹, LU Yanjun¹, LIN Min¹, LING Qiang²

(1. Hangzhou Lin'an District Agroforestry Technology Promotion Center, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. College of Environment and Resources, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] The objective is to analyze the impact of the rice-frog integrated farming model on soil aggregate structure, soil nutrients, and rice (*Oryza sativa*) yield, and provide a theoretical basis for constructing rice-frog integrated farming model. [Method] Field experiments were conducted in Lin'an District, Hangzhou City of Zhejiang Province from April to September in 2023 to analyze the differences in soil aggregate structure, soil nutrients, and rice yield under different frog density treatments: low density (T1, 0.9×10⁴ individuals·hm⁻²); medium density (T2, 1.2×10⁴ individuals·hm⁻²); high density (T3, 1.8×10⁴ individuals·hm⁻²);

收稿日期: 2024-12-24; 修回日期: 2025-03-26

基金项目: 杭州市农业产业技术专家团队项目 (202306TD11); 浙江农林大学科研发展基金资助项目 (2021FR023)

作者简介: 陈思思 (ORCID: 0009-0009-4150-5316), 农艺师, 从事农业技术推广研究。E-mail: 61344848@qq.com。

通信作者: 凌强 (ORCID: 0000-0002-7938-5593), 讲师, 博士, 从事农业资源高效利用与保护研究。

E-mail: lingybh@163.com

and control treatment (ck), rice monoculture. [Result] Compared with ck, rice-frog integrated treatments significantly ($P<0.05$) reduced soil bulk density and increased the content of soil water-stable macroaggregates which increased with frog density, but had no significant effect on total nitrogen content. Soil ammonium nitrogen content decreased with increasing frog density, while soil nitrate nitrogen content significantly increased. T1 treatment significantly reduced soil total phosphorus and available phosphorus contents, but with the increase of frog density, both soil total phosphorus and available phosphorus contents increased. Medium and high density treatments significantly decreased soil available potassium content. Rice-frog integrated farming model significantly reduced soil organic matter content, especially in T2 and T3 treatments where the decrease was greater. The number of effective panicles, seed setting rate, and rice yield were all significantly lower than those of ck, and the yield decreased by 15.49% in T3 treatment. However, in terms of comprehensive benefits, the comprehensive cultivation model of rice and frog was significantly higher than ck, and the comprehensive benefits increased with increasing frog density. [Conclusion] The rice-frog integrated farming model under high-density treatment has the most significant improvement in soil aggregate structure, and soil nutrients can still maintain at a certain level. The decrease in rice yield is relatively small, and the comprehensive benefits are the most significant. It is recommended as a suitable model for rice-frog integrated cultivation. It is suggested to increase the application rates of nitrogen, potassium and organic fertilizers during non-farming period to maintain nutrient balance, stabilize the number of rice panicles, and promote high yield. [Ch, 4 fig. 1 tab. 37 ref.]

Key words: rice-frog integrated farming model; soil aggregate structure; soil nutrient; rice yield

稻田综合种养是利用水稻 *Oryza sativa* 与水生动物生态位互补, 通过互生互养, 实现稻田物质和能量多级循环利用的农业模式, 具有较高经济和生态价值^[1-9]。据统计, 截至 2023 年, 全国稻田综合种养模式面积已达 299.33 万 hm^2 , 且其规模在不断发展。已有研究表明: 合理的稻田综合种养模式能够提高水稻品质, 形成物种间互利共生关系, 减少化肥、杀虫剂和除草剂使用量, 有效降低农业温室气体排放量和面源污染风险^[1, 3, 10-17], 同时显著提升稻田综合收入, 实现生态效益和经济效益双赢^[2, 10, 18-28]。在稻蛙综合种养模式中, 蛙类生物活动能够疏松土壤、降低土壤容重、增加土壤孔隙度、促进水稻养分吸收和根系生长^[19-20]。此外, 稻蛙综合种养还显著提升稻田土壤微生物数量和酸性磷酸酶活性^[21-23], 促进稻田土壤中难溶性磷转化与利用, 从而提升稻田土壤肥力^[24-25]。与此同时, 蛙类生物活动还能刺激水稻茎干基部生长, 促使水稻植株更加健壮^[26], 改善稻米外观与品质, 增加水稻有效分蘖数、穗粒数和结实率^[16, 27]。然而, 也有研究表明: 稻田养蛙会降低水稻有效分蘖数和结实率等, 造成水稻产量下降^[28-29]。这与稻田动物放养密度紧密相关。放养密度过低, 可能无法充分发挥动物生态效应, 降低种养系统整体效益^[27]; 放养密度过高可能导致动物与水稻之间资源竞争加剧, 从而影响水稻正常生长和综合效益^[30]。因此, 研究稻田综合种养中动物不同投放密度对整个系统的影响规律, 有助于优化资源配置、平衡生态效益与经济效益。

尽管稻蛙综合种养模式发展潜力大, 技术较为成熟, 但目前关于不同投放密度对稻田土壤物理性质、土壤养分和水稻产量影响的研究报道仍较少。因此, 本研究通过大田试验, 探究不同放养密度下蛙类对稻田土壤团粒结构特征、土壤养分特征和水稻产量的影响, 为稻蛙综合种养模式的优化应用和可持续发展提供理论参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验区位于浙江省杭州市临安区龙岗镇娘娘畈 ($30^{\circ}09'38''\text{N}$, $119^{\circ}07'01''\text{E}$)。该区属于亚热带季风气候, 2023 年降水量为 1012.1 mm, 年平均气温为 15.8°C 。试验地土壤基本性状: 土壤 pH 为 5.40, 有机

质为 $22.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮为 $1.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷为 $25.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾为 $36.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

田间试验采用随机区组设计。试验开始于 2023 年 4 月, 共设置 4 种处理方式: 常规种植水稻处理 (ck), 蛙投放低密度处理 ($0.9 \text{ 万只} \cdot \text{hm}^{-2}$, T1), 中密度处理 ($1.2 \text{ 万只} \cdot \text{hm}^{-2}$, T2) 和高密度处理 ($1.8 \text{ 万只} \cdot \text{hm}^{-2}$, T3), 其中, 稻蛙综合种养模式处理于 5 月投放黑斑蛙 *Pelophylax nigromaculatus*, 并于 2023 年 9 月 30 日前全部抓获。每种处理设置 3 个重复试验小区, 所有处理的水稻均在相同时间种植和收割。在施肥和农药管理方面, 对照处理施肥方式为当地常规模式, 使用三元复合肥 (氮:磷:钾质量比为 18:8:18), 施用量为 $375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。稻蛙综合种养模式水稻全生育期不施肥不使用农药, 水分管理同当地常规水平保持一致。

1.3 土壤与水稻样品采集与测定

在水稻排水收割后, 土地较干时采集土壤样品, 采集不同处理表层 0~20 cm 土样。各处理小区按照 5 点棋盘布局混合取样, 每个处理 3 个重复。采集土样带回实验室后风干, 去除植物根系, 用于后续土壤团粒结构和土壤养分测定。

土壤团粒结构数据测定。①土壤容重: 采用容积为 100 cm^3 环刀田间采样, 带回实验室后 $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒量, 称量后计算土壤容重; ②土壤水稳性大团聚体: 将 2 kg 土壤样品装入塑料包装盒, 带回实验室后采用湿筛法测定。

土壤养分测定。①全氮: 采用凯氏定氮法, 将土壤样品与试剂混合加热消化, 经滴定后根据消耗酸量计算其质量分数。②土壤硝态氮: 采用紫外分光光度法, 将土壤样品提取过滤后测定吸光度, 根据标准曲线计算其质量分数。③土壤铵态氮: 采用靛酚蓝比色法, 用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 氯化钾溶液提取土壤样品, 与靛酚蓝试剂反应, 测定吸光度并根据标准曲线计算其质量分数。④土壤全磷: 采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法, 将土壤样品与氢氧化钠熔融提取后, 测定吸光度并根据标准曲线计算其质量分数。⑤土壤速效磷测定: 采用 Olsen 法, 用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 碳酸氢钠溶液提取土壤样品后, 测定吸光度并根据标准曲线计算其质量分数。⑥土壤速效钾: 采用醋酸铵浸提-火焰光度法, 用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 醋酸铵溶液提取土壤样品后, 测定钾发射强度并根据标准曲线计算其质量分数。⑦土壤有机质: 采用重铬酸钾氧化-外加热法, 将土壤样品与重铬酸钾溶液和硫酸混合后滴定, 根据消耗量计算其质量分数。⑧土壤 pH: 采用 pH 计电位法, 将土壤样品与水按 1.0:2.5 质量比混合, 振荡均匀后静置, 测定 pH。⑨水稻产量与综合效益: 在水稻成熟后, 随机选取 1 m^2 代表性样方, 收割水稻并脱粒。将脱粒后稻谷晒干至恒量后, 称量后计算水稻产量。同时, 记录结实率、千粒重等数据。综合效益根据当前稻米和稻蛙实际产量经济效益进行统计。

1.4 数据处理

应用 SPSS 20.0 和 Excel 2016 进行数据处理与分析。采用多重比较检验法 (Duncan's 法) 对不同处理中指标差异性进行显著性检验, 显著水平为 0.05。使用 Origin 2023 绘图。

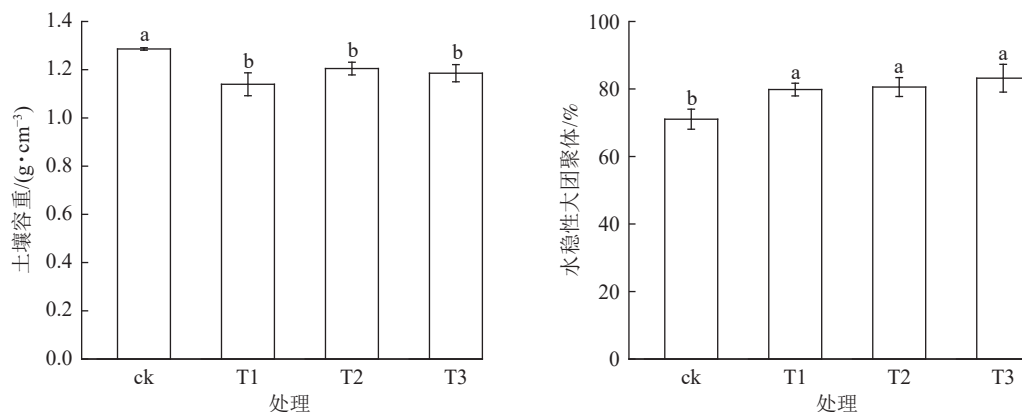
2 结果与分析

2.1 不同蛙投放密度处理对土壤容重和水稳性大团聚体的影响

由图 1 可知: 相比 ck, 各蛙投放密度处理均显著降低土壤容重 ($P < 0.05$), 但 3 个蛙投放密度处理 (T1、T2、T3) 之间无显著差异。与 ck 相比, 各蛙投放密度处理均显著提高了土壤水稳性大团聚体质量分数 ($P < 0.05$), 且随着蛙投放密度的增加, 土壤水稳性大团聚体质量分数呈上升趋势 (T1 为 79.83%, T2 为 80.57%, T3 为 83.20%), 但 3 个蛙投放密度处理间无显著差异。

2.2 不同蛙投放密度处理对土壤全氮、铵态氮和硝态氮的影响

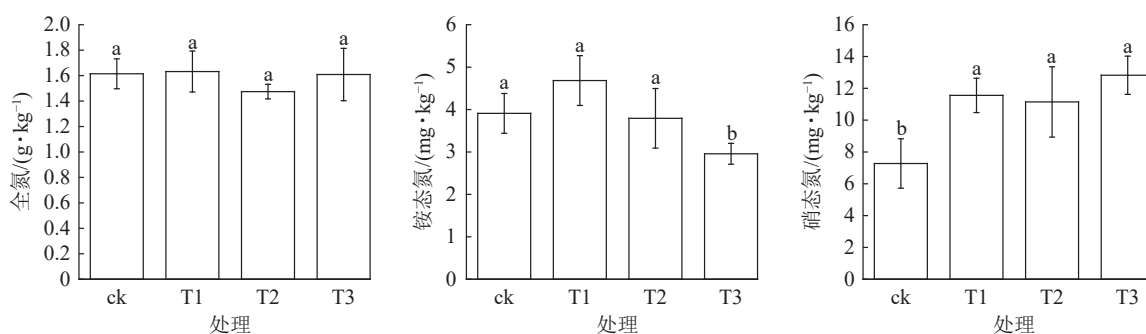
由图 2 可知: 相比 ck, 不同蛙投放密度处理对全氮质量分数无显著差异, 虽然 T2 处理全氮质量分数低于其他蛙投放密度处理和对照, 但差异不显著。不同处理下铵态氮质量分数差异较大, T1 处理的铵态氮最高, 为 $4.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 高于 ck 处理的 $3.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。T2 处理的铵态氮质量分数与 ck 相近, 差异不显著。T3 处理的铵态氮最低, 显著低于 ck、T1、T2 处理 ($P < 0.05$)。不同蛙投放密度处理显著提高了土壤硝态氮质量分数 ($P < 0.05$), 其中, T3 处理的硝态氮最高, 为 $12.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其次是 T1 ($11.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 T2 处理 ($11.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 3 个蛙投放密度处理之间差异不显著。



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图1 不同蛙投放密度处理对土壤容重和水稳性大团聚体的影响

Figure 1 Effects of different frog densities on soil bulk density and water stable macroaggregates



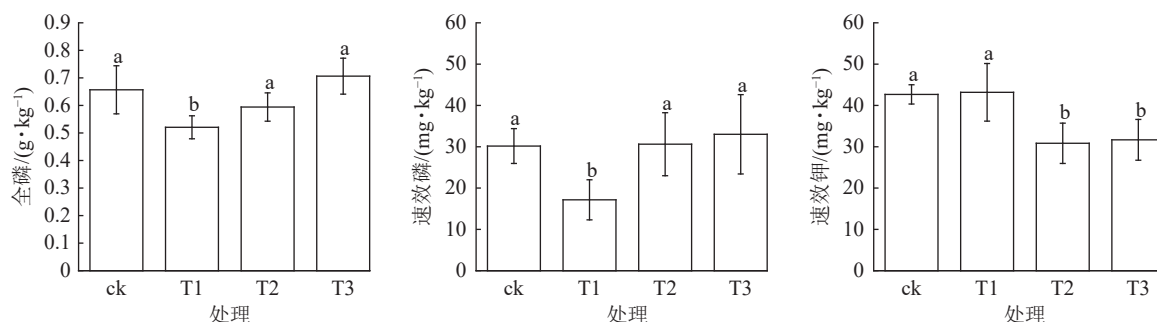
不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图2 不同蛙投放密度处理对土壤全氮、铵态氮和硝态氮的影响

Figure 2 Effects of different frog densities on soil total nitrogen, ammonium nitrogen, and nitrate nitrogen

2.3 不同蛙投放密度处理对土壤全磷、速效磷和速效钾的影响

由图3可知: T1处理全磷质量分数显著低于ck、T2、T3处理 ($P < 0.05$), T2和T3处理全磷质量分数与ck差异不显著。随着蛙投放密度的增加, 全磷质量分数呈增加趋势。除T1处理外, 各蛙投放密度处理速效磷与ck相比差异不显著, T1处理显著降低了速效磷质量分数 ($P < 0.05$), T2和T3处理速效磷质量分数均高于对照组, 其中T3处理速效磷最高。与ck相比, T1处理速效钾质量分数略有增加, 但差异不显著, T2和T3处理速效钾质量分数均显著低于ck和T1处理 ($P < 0.05$)。



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图3 不同蛙投放密度处理对土壤全磷、速效磷和速效钾的影响

Figure 3 Effects of different frog densities on soil total phosphorus, available phosphorus, and available potassium

2.4 不同蛙投放密度处理对土壤有机质和pH的影响

由图4可知: 与ck相比, 各蛙投放密度处理显著降低了土壤有机质质量分数 ($P < 0.05$), T2和T3处理土壤有机质降低幅度较大, 但各蛙投放密度处理 (T1、T2、T3) 之间无显著差异, 随着蛙投放密

度的增加，土壤有机质呈现下降趋势。与 ck 相比，所有蛙投放密度处理均导致土壤 pH 显著下降 ($P<0.05$)，但不同处理 (T1、T2、T3) 之间差异不显著。

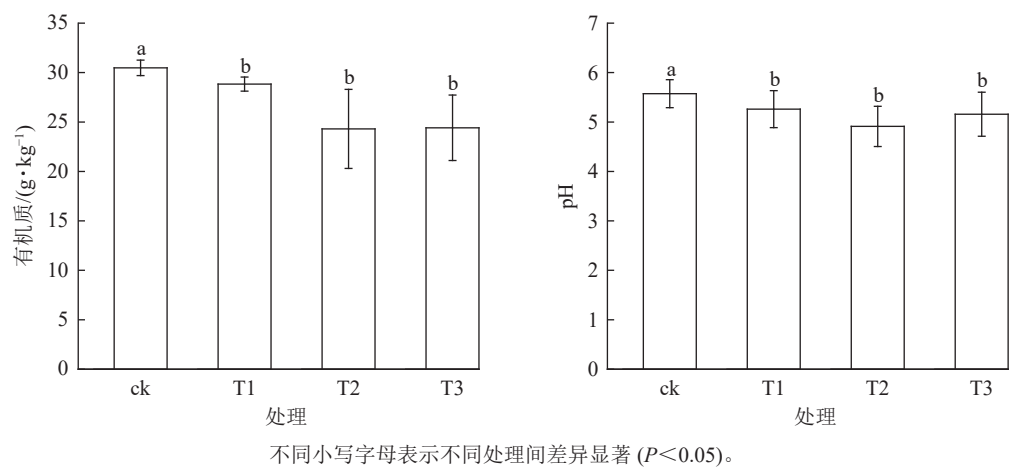


图 4 不同蛙投放密度处理对土壤有机质和 pH 的影响
Figure 4 Effects of different frog densities on soil organic matter and pH

2.5 水稻产量及其构成因素和综合效益分析

由表 1 可知：不同蛙投放密度处理有效穗数显著低于 ck ($P<0.05$)，各蛙投放密度处理之间有效穗数差异不显著。各蛙投放密度处理每穗粒数与 ck 间差异不显著，ck 结实率显著高于各蛙投放密度处理 ($P<0.05$)，各蛙投放密度处理之间千粒重差异不显著。对照组水稻产量最高，显著高于各蛙投放密度处理 ($P<0.05$)。在 3 个蛙投放处理中，T3 处理产量最高，其次为 T2 和 T1，但三者间差异不显著。各蛙投放密度处理综合效益纯利润显著高于 ck ($P<0.05$)，且随着投放密度增加，呈显著增加趋势。

表 1 不同处理中水稻产量及其构成因素变化

处理	产量构成因子					综合效益 纯利润/(元·hm ⁻²)
	有效穗数/(×10 ⁴ 穗·hm ⁻²)	每穗粒数/(粒·穗 ⁻¹)	结实率/%	千粒重/g	产量/(kg·hm ⁻²)	
T1	163.76 b	139.86 a	78.42 b	22.59 a	6 086.05 b	52 240.80 c
T2	161.32 b	137.39 a	79.98 b	23.28 a	6 190.11 b	68 796.05 b
T3	165.73 b	142.56 a	78.24 b	22.49 a	6 236.02 b	79 235.40 a
ck	178.47 a	137.38 a	82.30 a	24.38 a	7 379.27 a	7 568.40 d

说明：不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 稻蛙综合种养模式对土壤团粒结构的影响

已有研究发现：稻田动物活动如钻洞、筑穴能有效疏松土壤，增加土壤孔隙度，改善土壤的通气性，改变土壤团聚体分形维数，进而改善土壤物理性质^[31-33]。本研究结果表明：与 ck 相比，不同蛙投放密度处理显著改善了土壤团粒结构，低密度处理显著降低了土壤容重和土壤水稳性大团聚体质量分数，土壤水稳性大团聚体质量分数随着蛙投放密度的增加呈现增加趋势。这表明稻蛙综合种养模式系统能有效促进土壤团聚体的形成与稳定^[9]。在本研究中，虽然土壤水稳性大团聚体质量分数显著增加，但土壤有机质质量分数显著下降。水稳性团聚体稳定性不仅受土壤有机质影响，还受到土壤矿物质和微生物活性影响，稻蛙活动促进了土壤颗粒之间黏结作用，但并未显著增加土壤有机质积累或转化，可能是蛙类活动有助于土壤团聚体形成，但同时可能加速了有机质分解过程^[22]，导致土壤有机质降低。

3.2 稻蛙综合种养模式对土壤养分质量分数的影响

与 ck 相比，不同蛙投放密度处理对土壤全氮质量分数的影响较小。此结果与已有研究结果一致，即蛙投放密度变化对全氮的影响较为有限，可能是因为全氮受到多种因素综合调控^[20-22]。然而铵态氮和

硝态氮质量分数表现出明显差异,低密度蛙投放处理提高了铵态氮质量分数,表明低密度蛙投放处理蛙类生物活动可能促进了铵态氮释放。研究表明:通过动物活动或土壤微生物活动可增加土壤的氮转化速率,尤其是铵态氮释放^[20]。然而,本研究中,随着蛙投放密度增加,土壤铵态氮质量分数呈下降趋势,高密度蛙投放处理铵态氮质量分数降低最为显著,这表明较高密度处理可能对铵态氮积累具有抑制作用,可能是由于高密度蛙投放处理中蛙活动过度,抑制了氮源有效积累。各蛙投放密度处理硝态氮质量分数均显著高于对照组。硝态氮通常是植物易于吸收的氮源,因此,高密度蛙投放处理通过其活动可能促进了氮素转化过程^[34],使土壤中硝态氮质量分数显著提高。

高密度蛙投放处理中全磷和速效磷质量分数均高于低密度处理,这可能是高密度处理中蛙活动通过有效促进土壤微生物繁殖,促进了土壤中难溶性磷转化和利用^[22]。然而,在低密度蛙投放处理中,土壤全磷和速效磷质量分数显著低于ck,尤其是速效磷减少了约13%,表明低密度处理对磷素影响有限,可能原因是低密度处理中蛙数量太少,导致粪便累积少,整体活动影响不够,难以有效地促进稻田磷素积累和转化。相比ck,T2和T3处理速效钾质量分数显著降低,可能与稻蛙活动导致土壤结构的变化有关,较高密度蛙投放处理通过其生物扰动作用可能加速了钾流失,或通过改变土壤结构影响了钾吸附和释放过程^[32,34-35]。本研究还发现:不同蛙投放密度处理对土壤有机质质量分数具有显著影响,尤其在高密度蛙投放处理下,土壤有机质质量分数显著下降。这与朱练峰等^[19]研究结果相似。土壤有机质减少可能与稻蛙活动促进了土壤有机质的矿化过程有关,蛙粪内含有丰富易降解有机质^[22],从而加速土壤有机质整体矿化速率。所有蛙投放密度处理土壤pH均显著低于ck,但各蛙投放密度处理间差异不显著。土壤pH轻微下降可能与稻蛙活动中有机物分解过程中酸性物质的释放有关,但这种变化不足以显著影响土壤酸碱度。尽管本研究分析了不同蛙投放密度处理对土壤物理化学性质的短期影响,但其长期效应仍需进一步探讨,如土壤有机质积累与分解、养分循环动态以及土壤结构稳定性需要更长时间观测,从而揭示稻蛙综合种养模式对土壤结构和土壤养分的累积效应和可持续性影响。

3.3 稻蛙综合种养模式对水稻产量和综合效益的影响

稻蛙综合种养模式中的蛙类粪便能够给水稻提供一定养分供给,蛙类活动影响稻田土壤结构、养分积累和转化过程,且蛙类能够捕食稻田中的害虫,从而与常规水稻管理相比,大大减少了水稻生育期内化肥农药的施用量,或者不施用化肥农药,有效提升稻米品质^[26-29]。但稻蛙综合种养模式需要给蛙类留出一定的饲料投放平台面积(一般不超过总面积的10%),使得水稻种植面积减少,降低水稻总产量。已有研究均表明:相比常规水稻种植模式,稻蛙综合种养模式水稻产量均有所减少,减少幅度为23.45%~28.16%^[19-20,28]。本研究结果表明:常规水稻产量要显著高于稻蛙综合种养模式,稻蛙综合种养模式的水稻产量降低幅度为15.49%~17.52%,但随着蛙投放密度的增加,水稻产量呈现上升趋势,这与李兴华等^[27]的研究结果一致。从产量构成因子看,稻蛙综合种养模式降低了水稻有效穗数和结实率,从而导致水稻产量降低,这与已有研究结果类似。在不施肥的条件下,仅靠青蛙粪便分解提供养分不能满足水稻生长发育^[28]。本研究高密度蛙投放处理土壤铵态氮、速效钾和有机质显著低于ck。因此可在非稻蛙生育期提高氮肥、钾肥和有机质施用量,或者使用缓释肥和炭基肥等新型肥料^[11-12],维持养分平衡,保障水稻产量。虽然单作水稻模式生产成本显著低于稻鱼综合种养模式,但是综合效益远不如稻鱼综合种养模式^[15,25,36-37]。本研究结果也得到类似结论,且在高密度蛙投放处理下,综合效益最为显著。

4 结论

相较于常规施肥及低、中密度蛙投放处理,高密度蛙投放处理稻蛙综合种养模式下土壤团粒结构改善最为明显。虽然该模式下土壤铵态氮、有机质、速效钾等降低,但土壤全氮、全磷、硝态氮、速效磷等土壤养分仍能保持一定水平,且水稻产量下降幅度较低、中密度蛙投放处理小,提升稻田综合经济效益最为显著,同时减少了化肥和农药使用,降低了环境面源污染风险。因此,高密度蛙投放处理是本研究中推荐的最适宜稻蛙综合种养模式。

5 参考文献

- [1] 郑华斌,贺慧,姚林,等.稻田饲养动物的生态经济效应及其应用前景[J].湿地科学,2015,13(4):510-517.

- ZHENG Huabin, HE Hui, YAO Lin, *et al.* Ecological economic effects and its prospects of raising animals in paddy field[J]. *Wetland Science*, 2015, **13**(4): 510–517.
- [2] 李兴华, 涂军明, 陈展鹏, 等. 稻蛙绿色种养模式研究及其可持续发展策略[J]. *农学学报*, 2020, **10**(12): 98–103.
LI Xinghua, TU Junming, CHEN Zhanpeng, *et al.* Rice-frog planting and raising mode and its sustainable development strategy[J]. *Journal of Agriculture*, 2020, **10**(12): 98–103.
- [3] 章家恩, 韦生宝, 刘兴, 等. 稻渔综合种养研究进展与展望[J]. *华南农业大学学报*, 2024, **45**(6): 812–824.
ZHANG Jiaen, WEI Shengbao, LIU Xing, *et al.* Research progress and prospect of integrated rice-fish coculture[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2024, **45**(6): 812–824.
- [4] LI Yifan, WU Tiaoyan, WANG Shaodong, *et al.* Developing integrated rice-animal farming based on climate and farmers choices[J/OL]. *Agricultural Systems*, 2023, **204**: 103554[2024-11-24]. DOI: [10.1016/j.agsy.2022.103554](https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103554).
- [5] CUI Jinlan, LIU Hongbin, WANG Honyuan, *et al.* Rice-animal co-culture systems benefit global sustainable intensification[J/OL]. *Earths Future*, 2023, **11**(2): e2022EF002984[2024-11-24]. DOI: [10.1029/2022EF002984](https://doi.org/10.1029/2022EF002984).
- [6] CLAVERO M, LÓPEZ V, FRANCH N, *et al.* Use of seasonally flooded rice fields by fish and crayfish in a Mediterranean wetland[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2015, **213**: 39–46.
- [7] JI Zijun, ZHAO Lufeng, ZHANG Taojie, *et al.* Coculturing rice with aquatic animals promotes ecological intensification of paddy ecosystem[J/OL]. *Journal of Plant Ecology*, 2023, **16**(6): rtad014[2024-11-24]. DOI: [10.1093/jpe/rtad014](https://doi.org/10.1093/jpe/rtad014).
- [8] LIU Jianfang, ZHANG Qian, WANG Qianyi, *et al.* Gross ecosystem product accounting of a globally important agricultural heritage system: the Longxian rice-fish symbiotic system[J/OL]. *Sustainability*, 2023, **15**(13): 10407[2024-11-24]. DOI: [10.3390/su151310407](https://doi.org/10.3390/su151310407).
- [9] ZHANG Zhen, DU Linsen, XIAO Zhiyu, *et al.* Rice-crayfish farming increases soil organic carbon[J/OL]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2022, **329**: 107857[2024-11-24]. DOI: [10.1016/j.agee.2022.107857](https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.107857).
- [10] 许超, 靳联娟, 黄利国, 等. 稻-蛙生态共生关键技术及效益分析[J]. *四川农业科技*, 2020(5): 58–60.
XU Chao, JIN Lianjuan, HUANG Ligu, *et al.* Key technologies and benefits analysis of rice-frog ecological symbiosis[J]. *Sichuan Agricultural Science and Technology*, 2020(5): 58–60.
- [11] 任依, 姜培坤, 鲁长根, 等. 炭基肥与有机肥替代部分化肥对青紫泥水稻土微生物丰度及酶活性的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2022, **39**(4): 860–868.
REN Yi, JIANG Peikun, LU Changgen, *et al.* Effects of biochar-based fertilizer and organic fertilizer substituting chemical fertilizer partially on soil microbial abundances and enzyme activities[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2022, **39**(4): 860–868.
- [12] 姚权, 唐旭, 肖谋良, 等. 缓释氮肥配施有机肥对稻麦轮作体系作物生长和土壤养分的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2025, **42**(1): 175–184.
YAO Quan, TANG Xu, XIAO Mouliang, *et al.* Effects of slow release nitrogen fertilizer combined with organic fertilizer on crop growth and soil nutrient content in rice-wheat rotation system[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, **42**(1): 175–184.
- [13] 孔德雷, 姜培坤. “双碳”背景下种植业减排增汇的途径与政策建议[J]. *浙江农林大学学报*, 2023, **40**(6): 1357–1365.
KONG Delei, JIANG Peikun. Approaches and policy recommendations for reducing emissions and increasing carbon sinks in crop industry under the background of carbon peak and carbon neutrality[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40**(6): 1357–1365.
- [14] GUO Lijin, LIN Wei, CAO Cougui, *et al.* Integrated rice-crayfish farming system does not mitigate the global warming potential during rice season[J/OL]. *Science of the Total Environment*, 2023, **867**: 161520[2024-11-24]. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2023.161520](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161520).
- [15] XU Qiang, DAI Linxiu, GAO Pinglei, *et al.* The environmental, nutritional, and economic benefits of rice-aquaculture animal coculture in China[J/OL]. *Energy*, 2022, **249**: 123723[2024-11-24]. DOI: [10.1016/j.energy.2022.123723](https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123723).
- [16] SUN Xinjia, WANG Haolin, WANG Feijie, *et al.* Effects of different fertilization patterns on the dietary composition of *Procambarus clarkii* in a rice-crayfish coculture system[J/OL]. *Aquaculture Reports*, 2023, **33**: 101801[2024-11-24]. DOI: [10.1016/j.aqrep.2023.101801](https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101801).
- [17] DUAN Yuanliang, LI Qiang, ZHANG Lu, *et al.* Toxic metals in rice-fish co-culture systems and human health[J/OL].

- Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, **241**: 113797[2024-11-24]. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2022.113797](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113797).
- [18] 徐曼, 邓正春, 顾振华, 等. 稻蛙绿色生态种养技术及效益分析[J]. 作物研究, 2020, **34**(4): 384–387.
XU Man, DENG Zhengchun, GU Zhenhua, *et al.* Green ecological breeding technology and benefit analysis of rice and frog[J]. *Crop Research*, 2020, **34**(4): 384–387.
- [19] 朱练峰, 房伟平, 庄雪浩, 等. 稻蛙共作对土壤理化特性和水稻产量的影响[J]. 中国稻米, 2023, **29**(5): 23–27.
ZHU Lianfeng, FANG Weiping, ZHUANG Xuehao, *et al.* Effects of rice-frog co-cultivation on the physicochemical characteristics of the soil and grain yield[J]. *China Rice*, 2023, **29**(5): 23–27.
- [20] 王华君, 王新其, 丁国平, 等. 基于蛙稻生态种养模式氮肥运筹对水稻农艺性状及产量的影响[J]. 上海农业学报, 2016, **32**(6): 82–86.
WANG Huajun, WANG Xinqi, DING Guoping, *et al.* Effects of nitrogen application on agronomic traits and yield of rice based on eco-planting and breeding of rice and frog model[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2016, **32**(6): 82–86.
- [21] 林海雁, 黄倩霞, 邵紫依, 等. 养殖虎纹蛙稻田土壤酶活性及主要养分含量特征[J]. 核农学报, 2018, **32**(4): 802–808.
LIN Haiyan, HUANG Qianxia, SHAO Ziyi, *et al.* Characterization of soil enzymatic activities and main nutrient contents in paddy field for eco-planting and breeding rice and frog[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, **32**(4): 802–808.
- [22] 周雪芳, 朱晓伟, 陈泽恺, 等. 稻蛙生态种养对土壤微生物及无机磷含量的影响[J]. 核农学报, 2016, **30**(5): 971–977.
ZHOU Xuefang, ZHU Xiaowei, CHEN Zekai, *et al.* Effect of eco-planting and breeding of rice and frog on soil microorganisms and soluble phosphorus contents[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2016, **30**(5): 971–977.
- [23] 郭文啸, 赵琦, 朱元宏, 等. 蛙稻生态种养模式对土壤微生物特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, **46**(5): 57–60.
GUO Wenxiao, ZHAO Qi, ZHU Yuanhong, *et al.* Effects of eco-planting and breeding patterns of rice and frog on soil microbial characteristics[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, **46**(5): 57–60.
- [24] 孟祥杰, 黄璜, 陈灿, 等. 稻田不同种养模式对土壤肥力的影响[J]. 湖南农业科学, 2021(2): 45–48.
MENG Xiangjie, HUANG Huang, CHEN Can, *et al.* Effect of different cultivation modes on soil fertility in paddy field[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2021(2): 45–48.
- [25] 李金龙, 徐永福, 王冬武, 等. 黑斑蛙养殖模式对稻田土壤肥力、土壤酶活性的影响及其经济效益[J]. 作物研究, 2019, **33**(5): 428–431, 436.
LI Jinglong, XU Yongfu, WANG Dongwu, *et al.* Effects of breeding models of *Rana nigromaculata* on soil fertility and enzyme activity in paddy field and economic benefit analysis[J]. *Crop Research*, 2019, **33**(5): 428–431, 436.
- [26] 陈灿, 黄璜, 郑华斌, 等. 稻田不同生态种养模式对稻米品质的影响[J]. 中国稻米, 2015, **21**(2): 17–19.
CHEN Can, HUANG Huang, ZHENG Huabin, *et al.* Effects of different mode of ecological planting and raising on rice quality[J]. *China Rice*, 2015, **21**(2): 17–19.
- [27] 李兴华, 陈展鹏, 蔡正军, 等. 稻田套养不同密度黑斑蛙对水稻产量和土壤肥力的影响初探[J]. 湖北农业科学, 2023, **62**(5): 5–7.
LI Xinghua, CHEN Zhanpeng, CAI Zhengjun, *et al.* Effects of different densities of *Pelophylax nigromaculatus* on rice yields and soil fertility in paddy fields[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2023, **62**(5): 5–7.
- [28] 郭天荣, 刘瑞琪, 曾晴, 等. 稻蛙种养对水稻功能叶片和籽粒养分含量及产量构成的影响[J]. 分子植物育种, 2022, **20**(15): 5205–5212.
GUO Tianrong, LIU Ruiqi, ZENG Qing, *et al.* Effects of rice-frog co-cultivation on nutrient contents in rice leaves and brown rice and yield components[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2022, **20**(15): 5205–5212.
- [29] 彭翔, 戴林秀, 李京咏, 等. 稻田综合种养对长江中下游地区水稻产量和稻米品质影响的文献研究[J]. 中国稻米, 2022, **28**(4): 55–60.
PENG Xiang, DAI Linxiu, LI Jingyong, *et al.* Effects of comprehensive planting-breeding in paddy fields on yield and quality of rice in the middle and lower reaches of the yangtze river[J]. *China Rice*, 2022, **28**(4): 55–60.
- [30] 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.

- [31] 倡国涵, 彭成林, 徐祥玉, 等. 稻虾共作模式对涝渍稻田土壤理化性状的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, **25**(1): 61–68.
- SI Guohan, PENG Chenglin, XU Xiangyu, *et al.* Effect of integrated rice-crayfish farming system on soil physico-chemical properties in waterlogged paddy soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, **25**(1): 61–68.
- [32] 张晓龙, 杨倩楠, 李祥东, 等. 不同稻田生态种养模式对土壤理化性质及综合肥力的影响[J]. 福建农业学报, 2023, **38**(2): 202–209.
- ZHANG Xiaolong, YANG Qiannan, LI Xiangdong, *et al.* Effects of crop/animal co-cultivations on physiochemical properties and fertility of rice paddy soil[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2023, **38**(2): 202–209.
- [33] 汤伟, 陈灿, 黄璜. 不同稻田种养模式对土壤与水体理化性状及水稻产量的影响分析[J]. 作物研究, 2021, **35**(5): 490–495.
- TANG Wei, CHEN Can, HUANG Huang. Effects of different rice cultivation patterns on soil and water physical and chemical properties and rice yield[J]. *Crop Research*, 2021, **35**(5): 490–495.
- [34] 刘宇, 曹锦滔, 陈佳琪, 等. 稻田生态种养对土壤性质影响研究进展[J]. 环境生态学, 2021, **3**(12): 34–37.
- LIU Yu, CAO Jintao, CHEN Jiaqi, *et al.* Progress on effects of ecological planting and rearing on soil properties in rice fields[J]. *Environmental Ecology*, 2021, **3**(12): 34–37.
- [35] 李文博, 刘少君, 叶新新, 等. 稻田综合种养模式对土壤生态系统的影响研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2021, **37**(10): 1292–1300.
- LI Wenbo, LIU Shaojun, YE Xinxin, *et al.* effects of the co-culture of rice and aquatic animals on soil eco-system: a review[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, **37**(10): 1292–1300.
- [36] 龙丽, 贺慧, 黄璜, 等. 稻田综合种养模式对稻田土壤生态环境效应影响比较分析[J/OL]. 农学学报. 2024-09-20 [2024-11-24]. <https://link.cnki.net/urlid/11.6016.S.20240919.1103.002>.
- LONG Li, HE Hui, HUANG Huang, *et al.* Comparative analysis of impact of integrated rice farming systems on soil ecological environment of paddy fields[J/OL]. *Journal of Agriculture*, 2024-09-20 [2024-11-24]. <https://link.cnki.net/urlid/11.6016.S.20240919.1103.002>.
- [37] 窦志, 张耀元, 郭威, 等. 稻渔综合种养对土壤和水稻影响的研究进展[J]. 华南农业大学学报, 2024, **45**(6): 836–845.
- DOU Zhi, ZHANG Yaoyuan, GUO Wei, *et al.* Research progress on the influence of integrated farming of rice and aquatic animal on soil and rice[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2024, **45**(6): 836–845.