

吴玲云,马天桥,张万洋,等.稻-鸭-虾模式下稻田土壤肥力变化特征[J].华中农业大学学报,2025,44(3):84-90.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.03.010

稻-鸭-虾模式下稻田土壤肥力变化特征

吴玲云^{1,2},马天桥^{1,2},张万洋^{1,2},汪金平^{2,3},李小坤^{1,2}

1. 华中农业大学资源与环境学院,武汉 430070; 2. 华中农业大学双水双绿研究院,武汉 430070;
3. 华中农业大学植物科学技术学院,武汉 430070

摘要 为探究稻-鸭-虾种养模式对稻田土壤肥力的影响,于2022—2023年采用田间试验和取样测试分析的方法,比较了稻-鸭-虾种养模式和水稻单作模式下水稻收获后的土壤物理、化学和生物学性质,结合模糊综合评价法和简单线性评分法,综合评价了2种模式下的土壤综合肥力。结果显示:稻-鸭-虾模式种养2 a后,土壤微生物量氮含量显著降低了53.27%;土壤有机质、全氮、速效钾以及微生物量碳含量呈上升趋势,土壤pH值、速效氮、速效磷、酸性磷酸酶和碱性磷酸酶含量呈下降趋势,但均无显著差异。与水稻单作模式相比,除了微生物量氮含量,其他指标均呈不同程度降低的趋势。从土壤肥力角度来看,稻-鸭-虾种养模式和水稻单作模式均无显著差异,但稻-鸭-虾种养模式稻田土壤肥力指数呈上升趋势,增幅为7.94%,而水稻单作模式土壤肥力指数降低,且2023年稻-鸭-虾种养模式土壤肥力指数比水稻单作模式高3.03%。结果表明,2 a种养条件下稻-鸭-虾模式稻田土壤肥力无显著变化。

关键词 稻田综合种养; 土壤性质; 土壤肥力; 土壤肥力指数

中图分类号 S511; S966.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)03-0084-07

水稻作为我国主要的粮食作物,在保障国家粮食安全及全球粮食供给等方面发挥重要作用。作为人口大国,我国面临着粮食短缺、环境质量退化、农业生产用水和土地资源有限等多重挑战。在这种背景下,食品需求持续攀升,粮食产量需不断提高,农业生产的压力日益增加^[1]。因此,如何在确保粮食产量稳步增长的同时,减少化学肥料的过量使用,维持土壤养分平衡,降低环境风险,是亟需解决的问题^[2]。稻田综合种养作为一种水稻生产创新模式,可以减少污染、提高稻田生产力,对生态保护和增加农民收益具有重要意义。稻田综合种养模式是将水稻种植与水生动物(如鱼、虾、蟹、鸭等)养殖相结合,通过动物和植物生态位的互补效应,实现物质和能量的多级循环利用,这种搭配不仅具有显著的经济价值,还能带来良好的生态效益,共同促成一种高产、高效、环保的水稻生产新模式^[3]。研究证实,稻田综合种养模式有助于稳定水稻产量,提高经济效益,同时还能维持农田生物多样性^[4-5],降低农业面源污染的潜在风险,对改善农田生态环境

具有重要作用^[6]。

以往的研究主要集中在稻田综合种养模式下的土壤性状、水稻生长、病虫草害防治、生物多样性、水体理化性状和生态环境,其中土壤性状是最基础也是核心的研究方向^[7-8]。研究表明,稻田综合种养模式不仅能改善土壤物理性质,还能提高土壤养分含量。稻田中投喂的饲料残留物及水产动物的排泄物会增加土壤中有机质和其他有效养分的含量^[9-10]。刘赫群等^[11]研究表明,稻田综合种养模式会导致土壤容重下降、大团聚体含量上升等,从而改善了土壤结构。稻田综合种养模式对土壤生物学性质也会产生积极的影响。稻蛙共作模式中,土壤微生物量碳、氮含量均呈上升趋势^[12]。

目前,关于稻田综合种养体系下土壤生态系统的研究大都停留在单一种养模式上,而对稻田养虾和稻鸭共育相结合的种养模式下土壤肥力演变特征的研究则较为稀缺。因此,本研究以稻-鸭-虾种养模式为研究对象,与水稻单作模式作对比,明确稻-鸭-虾模式种养2 a后土壤物理、化学和生物学性质的变

收稿日期:2024-08-27

基金项目:湖北洪山实验室重大项目(2021hszd002)

吴玲云:E-mail:lingyunwu@webmail.hzau.edu.cn

通信作者:李小坤,E-mail:lixiaokun@mail.hzau.edu.cn

化情况,阐明该种养模式对土壤肥力的影响,以期为稻-鸭-虾种养模式养分管理和可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验地点位于湖北省监利市横台村华中农业大学双水双绿基地($30^{\circ}54'00''N, 112^{\circ}55'48''E$)。监利市地处江汉平原,属亚热带季风气候,年均气温为 $15.9\sim16.6^{\circ}C$,年均降水量为 $1100\sim1300\text{ mm}$,土壤类型为湖积物发育而成的潮土性水稻土。其中供试水稻品种为华墨香5号,鸭品种为武禽10肉鸭,虾品种为克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)。试验前稻田耕层($0\sim20\text{ cm}$)土壤基础理化性质为:容重 1.12 g/cm^3 ,pH 7.23,有机质 14.71 g/kg ,全氮 1.36 g/kg ,速效氮 12.08 mg/kg ,速效磷 4.94 mg/kg ,速效钾 160.80 mg/kg 。

1.2 试验设计

本试验于2022年4月至2023年11月开展,以稻-鸭-虾种养模式(rice-duck-crayfish model, CDR)为研究对象,以水稻单作模式(rice monoculture model, RM)作为对照。每种处理3个重复,一共6个田块,平均每个田块面积约为 0.22 hm^2 ,水稻种植株行距为 $15\text{ cm}\times30\text{ cm}$ 。

稻-鸭-虾种养模式管理:分为养虾季(4—6月)和水稻季(6—10月)。在养虾季,小区周围开挖围沟作为虾沟,水位没过田埂成塘块,平均塘块面积为 0.34 hm^2 ,4月在塘块中投放虾苗,投放密度为 400 kg/hm^2 (规格为 3.5 g/尾),精准投放饲料,饲料投喂量约为 1500 kg/hm^2 ,5月开始捕捞成虾,6月捕捞成虾完毕,未成熟的幼虾随水迁移至虾沟中,在整田、插秧、晒田控蘖及复水后再次进入稻田活动,同时在各小区边缘围起 0.4 m 的尼龙防逃网。在水稻季,稻田四周搭建尼龙网围栏,各个田块设有单个鸭棚,供鸭休憩和喂食,为了避免饲料进入稻田土壤和水体,饲料以稻田自然饲料为主,根据稻田饲料实际情况适量喂食稻谷粒,其投入量约为 500 kg/hm^2 。各单元设置独立的进水口和出水口,以此保证试验田水环境一致又互相独立。在水稻移栽后 $10\sim15\text{ d}$,将室内培育 20 d 的雏鸭以密度为 180 只/hm^2 (规格为 200 g/只)置于稻田,实行鸭稻共作,在鸭入场前将育雏场所和用具进行消毒处理。放鸭时间为每日上午09:00至10:00。鸭稻共育时保持适当水层,根据鸭

大小和水稻生长状况合理保持水层高度,抽穗时将鸭赶出田外再排水搁田。整个生育期内不施农药。另外该模式仅施用基肥,基肥采用复合肥(N-P-K: 17-17-17),其中氮肥用量为 50 kg/hm^2 。

水稻单作模式管理:基肥采用复合肥(N-P-K: 17-17-17),总氮肥用量为 150 kg/hm^2 ,追肥采用47%的尿素,基追肥比例为5:5。灌溉方式为当地传统淹灌,除了晒田和收获期田间自然晒干且不灌水外,其余时期田面水保持 10 cm 。

1.3 样品采集及指标测定

不同种养模式的水稻收获后分别采集 $0\sim20\text{ cm}$ 的土壤,采用环刀法测定土壤容重,即用一定容积的环刀切割未搅动的自然状态土样,使土样充满其中,然后烘干称量再计算单位容积的烘干土质量。在田间按“S”型进行5点采样,取回的土样分成2份,一部分作为新鲜样品经湿筛法(过孔径 $250\text{ }\mu\text{m}$ 筛)处理后置于冰箱保存;另一部分土样经风干、剔除杂质、磨细,分别过 $850\text{ }\mu\text{m}$ 和 $149\text{ }\mu\text{m}$ 孔径筛后用于各项指标测定。pH值采用电位法(水土质量比为2.5:1)进行测定;土壤有机质和全氮采用Elementar元素分析仪进行测定;土壤速效氮采用KCl浸提-SEAL AUTALYTICAL流动注射分析仪测定;土壤速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法;速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度计法;微生物量碳和微生物量氮分别采用氯仿熏蒸-K₂SO₄提取-总有机碳分析仪(TOC仪)和氯仿熏蒸-K₂SO₄提取-过硫酸盐氧化法测定^[13];酸性磷酸酶和碱性磷酸酶用MUB缓冲液提取-紫外分光光度计比色测定,其中酸性磷酸酶用pH值为6.5的MUB缓冲液提取,而碱性磷酸酶则用pH值为11的MUB缓冲液提取^[14]。

1.4 土壤肥力评价方法

土壤理化性质采用模糊综合评价法^[15],具体步骤如下:

(1)隶属度值 F_i 的确定。本研究通过隶属度函数计算参评指标的隶属度值大小,从而体现出各指标对土壤肥力的贡献率。根据土壤理化指标与作物生长的关系,选取抛物线型和“S”型函数,其公式如下:

抛物线型隶属度函数:

$$F_i = \begin{cases} 1.0 - 0.9(x - x_3)/(x_4 - x_3) & x_3 < x < x_4 \\ 1.0 & x_2 \leq x \leq x_3 \\ 0.1 + 0.9(x - x_1)/(x_2 - x_1) & x_1 < x < x_2 \\ 0.1 & x \leq x_1, x \geq x_4 \end{cases} \quad (1)$$

“S”型隶属度函数:

$$F_i = \begin{cases} 1.0 & x \geq x_4 \\ 0.1 + 0.9(x - x_1)/(x_4 - x_1) & x_1 < x < x_4 \\ 0.1 & x \leq x_1 \end{cases} \quad (2)$$

式(1)~(2)中, x 表示指标实际测定值, F_i 是第 i 个指标的隶属度值, x_1, x_2, x_3, x_4 分别表示该指标的下限临界值、下限最优值、上限最优值、上限临界值。其中土壤容重、pH 采用抛物线型隶属函数, 有机质、全氮、速效氮、速效磷、速效钾采用“S”型隶属函数。参照全国第二次土壤普查分级标准确定各参评指标的函数类型及拐点取值(表1)。

生物学指标采用简单线性评分法^[16], 计算公式如下:

$$F_i = x_i/x_{\max} \quad (3)$$

式(3)中, x_i 表示第 i 个指标的实际测定值, x_{\max} 为指标最高测定值。

2) 权重 W_i 的确定。依据相关系数法进行计算, 即某评价指标和其他指标间的相关系数均值与所有评价指标相关系数均值总和的比值。

3) 土壤肥力综合指数(integrated fertility index, IFI, 公式中记作 I_{IF})按下式计算^[17]:

$$I_{IF} = \sum_{i=1}^n F_i \times W_i (i=1, 2, 3 \dots n) \quad (4)$$

式(4)中, n 为土壤指标个数; F_i, W_i 分别为各个指标的隶属度值和权重值。土壤质量越高则土壤肥力指数越高。

表1 各指标所属隶属度函数类型及拐点值

Table 1 Membership function type and inflection point value of each index

指标 Index	函数类型 Type of function	x_1	x_2	x_3	x_4
容重/(g/cm ³) Bulk density	抛物线型 Parabolic type	0.9	1.0	1.2	1.5
pH		4.5	5.5	6.5	7.5
有机质/(g/kg) Soil organic matter		10		40	
全氮/(g/kg) Total nitrogen		0.5		2	
速效氮/(mg/kg) Available nitrogen	“S”型 “S” type	2.5		60	
速效磷/(mg/kg) Available phosphorus		5		20	
速效钾/(mg/kg) Available potassium		50		150	

1.5 数据统计分析

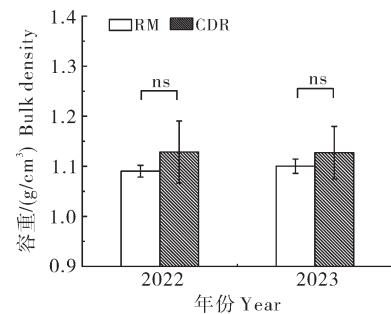
试验数据采用 Excel 2019 和 SPSS 25.0 进行统计分析, 采用独立样本 t 检验对土壤性质进行方差分

析, 并使用 Origin 2022 绘图。

2 结果与分析

2.1 稻-鸭-虾种养模式下稻田土壤容重的变化

由图1可知, 2022—2023年, 稻-鸭-虾种养模式下稻田土壤容重含量不变, 土壤容重略高于水稻单作模式, 分别高出 3.67%、2.72%。与基础土壤相比, 稻-鸭-虾模式种养 2 a 后, 土壤容重增加了 0.89%, 变化不明显。



ns 表示同一年份不同处理间差异不显著, 下同。ns indicates that difference between different treatments is not significant, the same as below.

图1 稻-鸭-虾模式和水稻单作模式下土壤容重

Fig.1 Soil bulk density in rice-duck-crayfish system and rice monoculture system

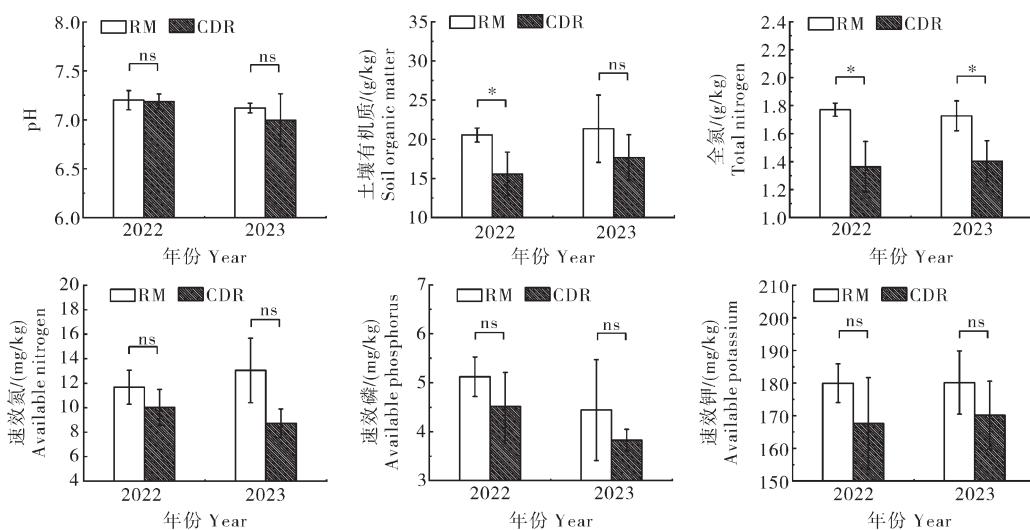
2.2 稻-鸭-虾种养模式下稻田土壤理化性质分析

由图2可知, 稻-鸭-虾种养模式下, 2023年稻田土壤有机质、全氮、速效钾含量分别较 2022 年增长 12.76%、2.94%、1.53%, 呈现上升趋势; 而 pH 值、速效氮、速效磷含量分别较 2022 年降低 2.64%、13.06%、15.49%, 呈现下降趋势; 但 2 a 间该模式下土壤理化指标间均无显著差异。

与基础土壤相比, 稻-鸭-虾种养模式种养 2 a 后, 土壤有机质、全氮、速效钾含量分别提高了 20.12%、2.94%、5.84%, pH、速效氮、速效磷含量分别降低了 3.18%、27.81%、29.32%。2022 年稻-鸭-虾种养模式下土壤有机质和全氮含量显著低于水稻单作模式, 分别降低了 24.20% 和 23.16%; 2023 年稻-鸭-虾种养模式下土壤全氮含量显著低于水稻单作模式, 降幅为 19.08%, pH、有机质等其他土壤理化指标均低于水稻单作模式, 但无显著差异。

2.3 稻-鸭-虾种养模式下稻田土壤生物学性质分析

由图3可知, 稻-鸭-虾模式种养 2 a, 微生物量碳含量增加了 49.60%, 而微生物量氮含量降低了 53.27%, 且达到显著水平; 酸性磷酸酶和碱性磷酸酶活性分别减少了 9.64%、20.43%。稻-鸭-虾种养模式下, 与水稻单作模式相比, 2022 年稻田微生物量



表示同一年份不同处理间差异显著($P < 0.05$),下同。 indicates significant difference between different treatments($P < 0.05$),the same as below.

图2 稻-鸭-虾模式和水稻单作模式下土壤理化性质

Fig. 2 Soil physical and chemical properties in rice-duck-crayfish system and rice monoculture system

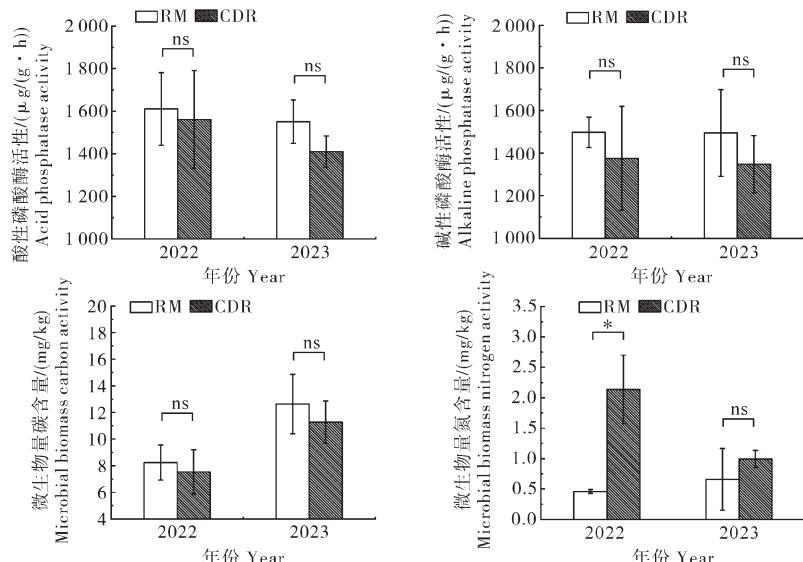


图3 稻-鸭-虾模式和水稻单作模式下土壤生物学性质

Fig. 3 Soil biological properties in rice-duck-crayfish system and rice monoculture system

氮含量显著增加,增幅高达365.22%,而其他指标均无显著差异。

2.4 稻田土壤肥力指数变化特征

通过模糊综合评价法和简单线性评分法计算的土壤肥力指数如图4所示,2 a种养条件下,稻-鸭-虾种养模式与水稻单作模式的土壤肥力指数均无显著差异。从2 a的土壤肥力指数变化和比较来看,稻-鸭-虾种养模式的土壤肥力指数增长了7.94%,而水稻单作模式的土壤肥力指数降低了5.71%。另外,2022年稻-鸭-虾种养模式的土壤肥力指数低于水稻单作模式,而2023年呈现相反趋势。

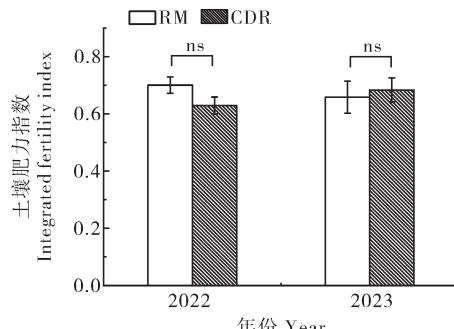


图4 稻-鸭-虾模式和水稻单作模式下土壤肥力指数

Fig. 4 Soil integrated fertility index in rice-duck-crayfish system and rice monoculture system

3 讨 论

土壤的理化性质可以直接反映其肥力状况,进而影响作物的生长情况^[18]。本研究结果表明,稻-鸭-虾种养模式下稻田土壤pH呈现下降的趋势,这可能是由于鸭在田间活动导致杂草生长受阻,使植物与微生物等对NH₄⁺的吸收能力降低,进而使光合作用过程中的CO₂含量降低,致使pH值降低^[19]。Li等^[20]研究表明稻田综合种养体系随着年限的增加,土壤有机质含量会逐渐升高。这与本研究结果一致,其原因可能是由于种养过程中投喂的饲料未被动物充分利用,残留在土壤中,从而增加了土壤有机质的含量。速效养分极易受到环境的影响,研究表明长期的稻虾共作模式会降低稻田中的磷含量,灌水和排水也会影响土壤速效磷的养分含量,造成径流养分流失,从而速效磷含量会降低^[21]。这与本研究结果类似,2 a的种养试验中,稻-鸭-虾模式土壤速效磷含量降低了15.49%。

土壤微生物是土壤生态系统中最为活跃的组分,参与养分循环转化、有机质转化等关键的土壤过程,在维持土壤生态系统功能中发挥着重要作用,其中土壤微生物量碳氮和土壤酶是土壤微生物活性的重要评价指标^[22-24]。本研究2 a的种养试验中,稻-鸭-虾模式下稻田土壤微生物量氮含量显著下降了53.27%。微生物量氮含量变化比较复杂,稻田综合种养技术虽然有助于提高土壤养分和促进微生物生长,但是由于这种模式长期处于淹水环境,土壤中会有酸类物质的大量累积,这不仅抑制水稻根系的发育和影响水稻的生长,还会被微生物作为有效碳源转化为CH₄等温室气体^[25]。

土壤肥力指数可以较全面地反映土壤的肥力特征,科学合理地评价土壤肥力对实现稻田的可持续利用具有重要意义。本研究采用模糊综合评价法和线性评分法分析了稻-鸭-虾种养模式以及水稻单作模式的土壤综合肥力指数。已有研究表明,在2 a的大田试验下,稻-鸭-虾生态复合种养模式有利于改善土壤的物理结构,提高土壤肥力,能够优化稻田土壤环境质量^[26]。本研究2 a的种养试验中,稻-鸭-虾模式与水稻单作模式的土壤肥力指数无显著差异,2023年稻-鸭-虾模式下稻田土壤肥力指数要略高于水稻单作模式。在稻-鸭-虾模式稻田土壤用肥量低于水稻单作模式的情况下,其土壤肥力却与水稻单作模式差异不大,其可能的原因如下:(1)稻-鸭-虾模式利用鸭和虾在水稻田中活动,促进了生态平衡,这

些动物可以帮助控制杂草和害虫,减少对化肥和农药的需求^[27];(2)稻田综合种养水产动物的养殖密度和饲料投入可以增加稻田水体的养分含量,使得该模式下水分管理更为科学,能够确保水稻在生长过程中的水分需求,达到优化养分吸收的作用^[28]。因此,即使在较低施肥量下,稻-鸭-虾模式也能保持土壤肥力。

综上所述,2 a的种养试验中,无论是稻-鸭-虾种养模式还是水稻单作模式,其土壤肥力指数均无显著差异,且稻-鸭-虾模式的土壤指标与水稻单作模式相比也多数无显著差异。就稻-鸭-虾模式而言,稻田土壤肥力指数存在小幅度上升,而水稻单作的土壤肥力有下降趋势,并且在第2年稻-鸭-虾种养模式稻田土壤肥力指数要高于水稻单作模式。本研究仅通过2 a的田间试验揭示稻-鸭-虾种养模式下稻田土壤肥力的变化,后续可以继续开展定位研究,关注该模式下稻田土壤肥力的中长期演变规律。

参考文献 References

- [1] TILMAN D, BALZER C, HILL J, et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture [J]. PNAS, 2011, 108(50): 20260-20264.
- [2] 陶玥玥,王海候,金梅娟,等.小麦产量与土壤养分对水生植物源有机氮替代率的响应[J].土壤学报,2019,56(1):156-164. TAO Y Y, WANG H H, JIN M J, et al. Response of wheat yield and soil nutrients to substitution of organic nitrogen with aquatic plant residue [J]. Acta pedologica sinica, 2019, 56(1): 156-164 (in Chinese with English abstract).
- [3] 陈晓云,孙文涛,于凤泉,等.稻蟹生态种养模式对稻田土壤肥力及生产效益的影响[J].土壤通报,2021,52(5):1165-1172. CHEN X Y, SUN W T, YU F Q, et al. Effect of rice-crab co-culture system on soil fertility and economic benefits [J]. Chinese journal of soil science, 2021, 52(5): 1165-1172 (in Chinese with English abstract).
- [4] 程建平,汪本福,张枝盛,等.湖北省稻田综合种养现状和技术创新与产业化发展思考[J].湖北农业科学,2017,56(22):4217-4220. CHENG J P, WANG B F, ZHANG Z S, et al. Present situation and technique innovation and industrialization of rice-aquaculture integrated cultivation in Hubei Province [J]. Hubei agricultural sciences, 2017, 56(22): 4217-4220 (in Chinese with English abstract).
- [5] 李昕升,王思明.江苏稻田养鱼的发展历史及生物多样性分析[J].华中农业大学学报(社会科学版),2014(1):139-144. LI X S, WANG S M. History of raising fish in paddy field in Jiangsu Province and analysis on the biodiversity [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (social sciences edition), 2014(1):139-144 (in Chinese with English abstract).

- [6] 周兴兵, 刘茂, 张力, 等. 稻田养鱼模式下减量施氮对杂交中稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 中国稻米, 2020, 26(1): 80-83. ZHOU X B, LIU M, ZHANG L, et al. Effects of reduced nitrogen application rate on grain yield and nitrogen use efficiency of mid-season hybrid rice under rice-fish system [J]. China rice, 2020, 26(1): 80-83 (in Chinese with English abstract).
- [7] 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 X Y, FENG J X, WEI S B, 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 (in Chinese with English abstract).
- [8] 吕广动, 黄璜, 王忍, 等. 紫云英还田耦合稻鱼共生对双季水稻群体生长特性及产量的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(12): 4057-4067. LÜ G D, HUANG H, WANG R, et al. Effects of Chinese milk vetch returning to the field coupled with rice-fish symbiosis on population growth and yield of double cropping rice [J]. Chinese journal of ecology, 2020, 39(12): 4057-4067 (in Chinese with English abstract).
- [9] 王昂, 王武, 马旭洲, 等. 养蟹稻田水环境部分因子变化研究[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(17): 3514-3519. WANG A, WANG W, MA X Z, et al. Study on the changes of water environmental factors in rice-crab culture system [J]. Hubei agricultural sciences, 2011, 50(17): 3514-3519 (in Chinese with English abstract).
- [10] LIU C H, HU N J, SONG W X, et al. Aquaculture feeds can be outlaws for eutrophication when hidden in rice fields: a case study in Qianjiang, China [J/OL]. International journal of environmental research and public health, 2019, 16(22): 4471 [2024-08-27]. <https://doi.org/10.3390/ijerph16224471>.
- [11] 刘赫群, 李嘉尧, 成永旭, 等. 虾稻共作对稻田土壤线虫群落结构的影响[J]. 土壤, 2017, 49(6): 1121-1125. LIU H Q, LI J Y, CHENG Y X, et al. Effects of rice-crayfish co-culture on nematode communities in rice paddy soil [J]. Soils, 2017, 49(6): 1121-1125 (in Chinese with English abstract).
- [12] 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 W X, ZHAO Q, ZHU Y H, et al. Effect of frog and rice ecological farming model on soil microbial characteristics [J]. Jiangsu agricultural sciences, 2018, 46(5): 57-60 (in Chinese).
- [13] FREY S D, KNORR M, PARRENT J L, et al. Chronic nitrogen enrichment affects the structure and function of the soil microbial community in temperate hardwood and pine forest [J]. Forest ecology and management, 2004, 196: 159-171.
- [14] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986: 74-339. GUAN S Y. Soil enzyme and its research methods [M]. Beijing: Agricultural Press, 1986: 274-339 (in Chinese).
- [15] 于寒青, 徐明岗, 吕家珑, 等. 长期施肥下红壤地区土壤熟化肥力评价[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1772-1778. YU H Q, XU M G, LÜ J L, et al. Variations of soil fertility level in red soil region under long-term fertilization [J]. Chinese journal of applied ecology, 2010, 21(7): 1772-1778 (in Chinese with English abstract).
- [16] 包玲凤, 杨明英, 尹兴盛, 等. 基于最小数据集的保山市植烟土壤质量评价与障碍诊断[J]. 西南农业学报, 2023, 36(3): 612-622. BAO L F, YANG M Y, YIN X S, et al. Quality evaluation and obstacle diagnosis of soil planted with tobacco based on minimum data set in Baoshan city [J]. Southwest China journal of agricultural sciences, 2023, 36(3): 612-622 (in Chinese with English abstract).
- [17] 包耀贤, 徐明岗, 吕粉桃, 等. 长期施肥下土壤肥力变化的评价方法[J]. 中国农业科学, 2012, 45(20): 4197-4204. BAO Y X, XU M G, LÜ F T, et al. Evaluation method on soil fertility under long-term fertilization [J]. Scientia agricultura sinica, 2012, 45(20): 4197-4204 (in Chinese with English abstract).
- [18] GÜSEWELL S, GEESNER M O. N: P ratios influence litter decomposition and colonization by fungi and bacteria in microcosms [J]. Functional ecology, 2009, 23(1): 211-219.
- [19] 余经纬, 黄巍, 李玉成, 等. 稻田生态综合种养模式对土壤理化性质及腐殖质的影响[J]. 生物学杂志, 2020, 37(3): 81-85. YU J W, HUANG W, LI Y C, et al. Effects of ecological comprehensive planting and breeding patterns on soil physical and chemical properties and humus in paddy fields [J]. Journal of biology, 2020, 37(3): 81-85 (in Chinese with English abstract).
- [20] LI M J, LI R H, ZHANG J E, 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.
- [21] LI X Y, LI H Y, YANG L M, et al. Assessment of soil quality of croplands in the corn belt of Northeast China [J/OL]. Sustainability, 2018, 10(1): 248 [2024-08-27]. <https://doi.org/10.3390/su10010248>.
- [22] GRIFFITHS B S, PHILIPPOT L. Insights into the resistance and resilience of the soil microbial community [J]. FEMS microbiology reviews, 2013, 37(2): 112-129.
- [23] LI Z L, TIAN D S, WANG B X, et al. Microbes drive global soil nitrogen mineralization and availability [J]. Global change biology, 2019, 25(3): 1078-1088.
- [24] 王宁, 罗佳琳, 赵亚慧, 等. 不同麦秸还田模式对稻田土壤微生物活性和微生物群落组成的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(1): 125-133. WANG N, LUO J L, ZHAO Y H, et al. Effects of different models of wheat straw return on paddy soil microbial activities and community compositions [J]. Journal of agro-environment science, 2020, 39(1): 125-133 (in Chinese with English abstract).
- [25] 邵继海, 陈杰锋, 胡婷. 林氏念珠藻对酸化稻田水稻产量和土壤细菌群落结构与功能的影响[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2022, 50(6): 22-28. SHAO J H, CHEN J F, HU T. Effects of *Nostoc linckia* on rice grain yield and the structure

- and functions of bacterial community in acidified paddy soil[J]. Journal of Henan Normal University (natural science edition), 2022, 50(6): 22-28 (in Chinese with English abstract).
- [26] 余经纬.稻-虾-鸭生态复合种养模式下土壤质量及经济效益的提升效果研究[D].合肥:安徽大学, 2019. YU J W. Study on the improvement of soil quality and economic benefit under rice-crayfish-duck ecological complex cultivation model[D]. Hefei: Anhui University, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [27] 杨勇,胡小军,张洪程,等.稻渔(蟹)共作系统中水稻安全优质高效栽培的研究 V.病虫草发生特点与无公害防治[J].江苏农业科学, 2004, 32 (6) : 21-26. YANG Y, HU X J, ZHANG H C, et al. Study on safe, high quality and efficient cultivation of rice in rice-fish (crab) co-cropping system V. occurrence characteristics and pollution-free control of diseases and pests[J]. Jiangsu agricultural sciences, 2004, 32(6): 21-26 (in Chinese).
- [28] 丁伟华,李娜娜,任伟征,等.传统稻鱼系统生产力提升对稻田水体环境的影响[J].中国生态农业学报, 2013, 21(3) : 308-314. DING W H, LI N N, REN W Z, et al. Effects of improved traditional rice-fish system productivity on field water environment [J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2013, 21 (3): 308-314 (in Chinese with English abstract).

Characteristics of changes in soil fertility in paddy field under model of rice-duck-crayfish

WU Lingyun¹, MA Tianqiao¹, ZHANG Wanyang¹, WANG Jinping², LI Xiaokun¹

1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Shuangshui Shuanglü Institute, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

3. College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract The effects of the rice-duck-crayfish (CDR) model on soil fertility in paddy fields were studied by using field experiments and sampling tests from 2022 to 2023. The physical, chemical, and biological properties of soil after harvesting rice were compared between CDR and the rice monoculture (RM) model. The fertility of soil under two models was comprehensively evaluated by combining fuzzy comprehensive evaluation method and simple linear scoring method. The results showed that the content of microbial biomass nitrogen in soil significantly decreased by 53.27% after 2 years of CDR. The content of organic matter, total nitrogen, available potassium, and microbial biomass carbon in soil had an increasing trend, while the pH, the content of available nitrogen, available phosphorus, acid phosphatase, and alkaline phosphatase in soil had a decreasing trend, but there was no significant difference. All indexes except for the content of microbial biomass nitrogen had a decreasing trend to varying degrees compared with RM. There was no significant difference between CDR and RM in term of soil fertility. However, CDR had an upward trend in the soil fertility index of paddy fields, with an increase of 7.94%, while the soil fertility index of RM decreased, and the soil fertility index of CDR was 3.03% higher than that of RM in 2023. It is indicated that there was no significant change in soil fertility in paddy fields under two years of CDR.

Keywords integrated farming in paddy field; soil properties; soil fertility; soil fertility index

(责任编辑:葛晓霞)