

马林杰,张诚信,覃宝利,等. 秸秆及生物炭还田对稻虾共作模式水稻产量、氮肥利用率及土壤肥力的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(9): 1623-1632.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.09.006

# 秸秆及生物炭还田对稻虾共作模式水稻产量、氮肥利用率及土壤肥力的影响

马林杰<sup>1</sup>, 张诚信<sup>1</sup>, 覃宝利<sup>1</sup>, 杨 军<sup>1</sup>, 杨 婷<sup>1</sup>, 徐 荣<sup>1</sup>, 王守红<sup>1</sup>, 张家宏<sup>1</sup>, 寇祥明<sup>1</sup>, 陈选青<sup>2</sup>, 王 展<sup>3</sup>, 张旭晖<sup>4</sup>

(1.江苏里下河地区农业科学研究所,江苏 扬州 225007; 2.扬州银谷农业生态发展有限公司,江苏 扬州 225119; 3.扬州市气象局,江苏 扬州 225000; 4.江苏省气候中心,江苏 南京 210009)

**摘要:** 为了明确稻虾共作模式下促进水稻增产、氮肥利用率提高和土壤肥力提升的适宜的秸秆还田方式,本研究设置了5个处理[无秸秆还田和无氮肥施用(CK)、无秸秆还田(NS)、秸秆还田(S)、低量生物炭还田(LB)和高量生物炭还田(HB)],对比研究秸秆还田及生物炭还田处理在水稻产量、水稻生长、氮肥利用率和土壤肥力指标上的差异。结果表明,与NS处理相比,仅LB处理和HB处理显著增加了水稻不同生育时期的茎蘖数、叶片SPAD值、叶面积指数、成穗率、地上部生物量、氮吸收量和产量,但LB处理和HB处理之间差异不显著。与NS处理和S处理相比,水稻氮肥利用率指标在LB处理和HB处理下均显著提高,但LB处理和HB处理在氮肥偏生产力、氮肥籽粒生产效率、氮肥干物质生产效率上无显著差异。整体上看,LB处理和HB处理较NS处理显著提高氧化还原电位、pH、阳离子交换量、有机碳含量和氮磷钾有效性,但两者在土壤氧化还原电位和pH上差异不显著。综合各处理在水稻产量、氮肥利用率和土壤肥力上的表现,本研究认为,稻虾共作模式下低量生物炭还田(7.5 t/hm<sup>2</sup>)是促进水稻高产、氮肥利用率提高和土壤肥力提升的适宜的秸秆还田方式。

**关键词:** 稻虾共作; 生物炭; 水稻; 产量; 氮肥利用率; 土壤肥力

中图分类号: S314;S365 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2024)09-1623-10

## Effects of straw and biochar returning on rice yield, nitrogen use efficiency and soil fertility in a rice-crayfish integrated system

MA Linjie<sup>1</sup>, ZHANG Chengxin<sup>1</sup>, QIN Baoli<sup>1</sup>, YANG Jun<sup>1</sup>, YANG Ting<sup>1</sup>, XU Rong<sup>1</sup>, WANG Shouhong<sup>1</sup>, ZHANG Jiahong<sup>1</sup>, KOU Xiangming<sup>1</sup>, CHEN Xuanqing<sup>2</sup>, WANG Zhan<sup>3</sup>, ZHANG Xuhui<sup>4</sup>

(1.Jiangsu Lixiahe District Institute of Agricultural Sciences, Yangzhou 225007, China; 2.Yangzhou Yingu Agricultural Ecological Development Co., Ltd., Yangzhou 225119, China; 3.Yangzhou Meteorological Bureau, Yangzhou 225000, China; 4.Jiangsu Provincial Climate Center, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** In order to clarify the optimum straw returning mode for improving rice yield, nitrogen use efficiency and

收稿日期:2024-06-12

基金项目:国家自然科学基金项目(32101303);江苏现代农业产业技术体系专项[JATS(2023)253];扬州市重点研发计划项目(YZ2023046);扬州市生态农业重点实验室项目(YZ2023244)

作者简介:马林杰(1993-),男,安徽阜阳人,博士,助理研究员,主要从事生态农业研究。(E-mail)20212411@jaas.ac.cn

通讯作者:寇祥明,(E-mail)kouxiangming@163.com

soil fertility under the rice-crayfish integrated system, a field experiment was conducted to investigate the differences in the indicators of rice growth and yield, rice nitrogen use efficiency as well as soil fertility between straw returning treatment and biochar returning treatment. There were five treatments, including no straw returning and no nitrogen fertilizer application (CK), no straw returning (NS), straw returning (S), biochar returning at

low rate (LB) and biochar returning at high rate (HB). The results showed that the tiller number, leaf SPAD value and leaf area index at different rice growth stages as well as the percentage of productive tillers, aboveground biomass, nitrogen uptake and grain yield were only significantly increased under LB and HB treatments compared with NS treatment. But there were no significant differences in these indicators between LB and HB treatments. Indicators of rice nitrogen use efficiency were significantly increased under LB and HB treatments compared with NS and S treatments, but there were no significant differences in nitrogen partial factor productivity, nitrogen use efficiency for grain production and nitrogen use efficiency for dry matter production between LB and HB treatments. On the whole, LB and HB treatments resulted in the marked increases in soil redox potential, pH, cation exchange capacity, organic carbon content and availabilities of nitrogen, phosphorus and potassium compared with NS treatment. But there were no significant differences in soil redox potential and pH between LB and HB treatments. Therefore, by integrating the performances of various treatments on rice yield, nitrogen use efficiency and soil fertility, the optimum straw returning mode under the rice-crayfish integrated system is applying biochar at low rate ( $7.5 \text{ t/hm}^2$ ), which can improve rice yield, nitrogen use efficiency and soil fertility.

**Key words:** rice-crayfish integrated system; biochar; rice; yield; nitrogen use efficiency; soil fertility

中国水稻栽培面积和产量均位于世界前列,但受到较强的资源与环境约束。随着农业供给侧改革的深入,政府积极倡导种养结合,水稻结合克氏原螯虾的“稻虾共作”模式应运而生,该模式是一种以涝渍稻田为条件、种稻为中心、稻田养虾为特点的生态种养模式,有效提高了农田资源利用率和产出效益<sup>[1-2]</sup>。目前该模式生产面积为 $1.26 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,仅占 28%,未来发展空间巨大<sup>[1,3]</sup>。

毋庸置疑,稻虾共作模式下克氏原螯虾的排泄物和残饵能够成为水稻额外的养分来源<sup>[4-5]</sup>。然而,稻虾共作模式中克氏原螯虾的养殖要求淹水更深、淹水期更长,这会对水稻生长产生不利影响<sup>[6-7]</sup>。一方面,稻虾共作模式下淹水程度加剧使得土壤厌氧环境增强、还原性物质增加、氧化还原电位下降<sup>[1,4,8]</sup>,这会导致土壤潜育化风险加大,降低土壤供肥能力,甚至对水稻产生毒害作用<sup>[9-10]</sup>;另一方面,氮肥施用对水稻产量形成至关重要,中国水稻氮肥用量占世界总量的 25%,但水稻氮肥利用率不足 40%<sup>[11-12]</sup>。稻虾共作模式下淹水程度加剧会进一步造成氮肥淋溶损失,降低水稻氮肥利用率,对水稻产量形成产生不利影响<sup>[13-15]</sup>。水稻种植是稻虾共作模式依存的先决条件,水稻稳产才能实现该模式的健康发展。因此,如何优化稻虾共作模式下的农田管理措施以实现土壤肥力提升、水稻氮肥利用率提高和水稻产量增加的研究亟待开展。

水稻种植会产生丰富的秸秆资源,秸秆直接还田已成为常规水稻种植中常见的农田管理措施。另外,作物秸秆可在高温、低氧环境下裂解成具有结构稳定、孔隙多、碱性强等特点的生物炭<sup>[16-17]</sup>。前人

对常规水稻种植下秸秆及生物炭还田对土壤肥力、水稻氮肥利用率和产量的影响开展了大量研究。研究发现,常规水稻种植下秸秆还田不仅能够提升土壤氮磷钾供应能力,还能够提高水稻氮肥利用率和产量<sup>[18-19]</sup>。生物炭还田也在常规水稻种植下对土壤肥力、水稻氮肥利用率和水稻产量产生积极影响,且大量研究结果表明生物炭还田对土壤和水稻的积极影响强于秸秆还田<sup>[19-21]</sup>。虽然已有关于稻虾共作模式下秸秆还田影响土壤肥力、水稻氮肥利用率和产量的研究,但是缺乏关于秸秆还田与生物炭还田间的对比研究,导致该模式适宜的秸秆还田方式仍不明确。因此,本研究拟在稻虾共作模式下开展秸秆及生物炭还田对土壤肥力、水稻氮肥利用率和水稻产量影响的试验,探讨该模式下提升土壤肥力、提高水稻氮肥利用率和增加水稻产量的秸秆还田方式,为稻虾共作模式的健康发展提供科学指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点与供试材料

试验于 2022–2023 年在江苏省扬州市扬州银谷农业生态发展有限公司生产基地开展。试验地点属亚热带季风气候区,水稻生育期(6–10 月)内的总降雨量、日平均气温、日最高气温和日最低气温在 2022 年分别为 381.3 mm、27.8 °C、32.9 °C 和 23.7 °C,在 2023 年分别为 1 077.2 mm、26.7 °C、31.1 °C 和 23.5 °C。土壤类型为由湖积母质发育而来的黏土,质地为壤质黏土,其中耕层(0~20 cm)土壤有机碳含量、全氮含量、碱解氮含量、有效磷含量和速效钾含量分别为 18.2 g/kg、1.86 g/kg、168.3 g/kg、

16.4 g/kg和 175.7 g/kg。供试水稻品种为丰优香占, 供试虾品种为克氏原螯虾。

## 1.2 试验设计

在稻虾共作模式下分别设置无秸秆还田和无氮肥施用处理(CK)、无秸秆还田处理(NS)、秸秆还田处理(S)、低量生物炭还田处理(LB)和高量生物炭还田处理(HB), 共 5 个处理, 重复 3 次, 随机区组排列。各试验小区面积均为 100 m<sup>2</sup> (10 m×10 m), 在小区单侧开挖长宽 2.0 m、深 1.2 m 的沟。小区周围做宽和高均为 0.8 m 的田埂, 田埂四周采用聚乙烯塑料薄膜包裹。试验所用生物炭购买于南京勤丰秸秆科技有限公司, 由水稻秸秆在 500 °C 下裂解 1 h 所得, 其 pH 为 8.9。其中, 水稻秸秆的有机碳含量、全氮含量、全磷含量和全钾含量分别为 401.0 g/kg、5.7 g/kg、1.8 g/kg 和 18.5 g/kg; 生物炭的有机碳含量、全氮含量、全磷含量和全钾含量分别为 534.0 g/kg、10.6 g/kg、2.6 g/kg 和 24.9 g/kg。水稻收获后, 在 CK 和 NS 处理小区水稻秸秆被移除, 在 S 处理小区水稻秸秆被粉碎成 5 cm 长度后借助旋耕机翻埋入耕层。在 LB 和 HB 处理小区, 移除水稻秸秆后将对应生物炭均匀撒于田面, 借助旋耕机翻埋入耕层。基于试验地供试水稻品种的实际秸秆产量, S 处理的秸秆还田量为 10.0 t/hm<sup>2</sup>; LB 处理的生物炭还田量为 7.5 t/hm<sup>2</sup>, 碳投入量与 S 处理相同; HB 处理的生物炭还田量为 15.0 t/hm<sup>2</sup>, 碳投入量是 S 处理的 2 倍。

水稻分别于 2022 年 6 月 15 日和 2023 年 6 月 14 日按照秧龄 30 d、行株距 30 cm×20 cm 进行移栽。除 CK 外, 其他处理的水稻施氮(N)量均为 150 kg/hm<sup>2</sup>。所有处理的水稻施磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)量和施钾(K<sub>2</sub>O)量分别为 75 kg/hm<sup>2</sup>和 120 kg/hm<sup>2</sup>。试验中所用的氮肥、磷肥、钾肥分别为尿素(纯氮含量为 46.4%)、过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量为 12.0%)和氯化钾(K<sub>2</sub>O含量为 62.0%)。其中, 70%氮肥和 100%磷肥、100%钾肥均于水稻移栽前作为基肥施用, 其余 30%的氮肥于水稻分蘖期作为追肥施用。克氏原螯虾于水稻移栽后按照 1 尾 5 g 的规格和 1 hm<sup>2</sup>6×10<sup>4</sup> 尾的密度进行虾苗投放, 于水稻生长期按照 750 kg/hm<sup>2</sup> 的总量投喂由江苏富裕达粮食制品股份有限公司生产的克氏原螯虾专用饲料(粗蛋白含量为 30%), 并于水稻收获前进行捕捞。田间水分管理如下: 水稻移栽后保持 5 cm 水位, 拔节后维持 20 cm 水位, 抽穗后维持 40 cm 水位, 收获前 7 d 开始放水搁田。

## 1.3 测定项目与测定方法

1.3.1 水稻茎蘖动态、叶片 SPAD 值和叶面积指数的测定 从水稻移栽后第 5 d 开始, 在各小区定点选取 20 穴长势一致的水稻, 每 7 d 调查 1 次水稻茎蘖数, 直至分蘖盛期。之后, 再分别于水稻拔节期、抽穗期和成熟期调查 1 次水稻茎蘖数。另外, 依据每穴水稻的平均茎蘖数在每小区选取 3 穴代表性水稻, 利用 SPAD-502 型叶绿素含量测定仪测定水稻倒一叶 SPAD 值, 利用比叶重法测定叶面积<sup>[22]</sup>, 并计算叶面积指数。

### 1.3.2 水稻地上部生物量、氮吸收量和产量的测定

首先, 于水稻成熟期, 依据每穴水稻的平均茎蘖数在每小区选取 3 穴代表性水稻, 按照叶片、茎鞘和穗进行分离, 并置于烘箱内在 105 °C 下杀青 30 min, 70 °C 烘干至恒重, 称重后计算水稻地上部生物量。之后, 将水稻样品粉碎后采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 法进行消煮, 并采用 CleverChem 380 型流动分析仪测定植株氮含量<sup>[23]</sup>。最后, 结合水稻各部位干物质重和氮含量计算水稻氮吸收量。另外, 于水稻成熟期在每小区随机选取 3 点(每点 20 穴), 调查水稻有效穗数, 并依据每穴水稻的平均有效穗数选取 10 穴水稻考察产量构成因素(穗粒数、结实率和千粒重)。每小区连续收割 100 穴水稻, 脱粒、去杂、称重后依据 13.5% 的标准含水量换算为实际产量。

1.3.3 水稻氮肥利用率的测定 水稻氮肥利用率各参数计算公式如下<sup>[22, 24-25]</sup>: 氮肥偏生产力 = 施氮区产量/施氮量; 氮肥农学效率 = (施氮区产量 - 无氮区产量)/施氮量; 氮肥表观利用率 = (施氮区氮吸收量 - 无氮区氮吸收量)/施氮量×100%; 氮肥生理利用率 = (施氮区产量 - 无氮区产量)/(施氮区氮吸收量 - 无氮区氮吸收量); 氮肥贡献率 = (施氮区产量 - 无氮区产量)/施氮区产量×100%; 氮肥籽粒生产效率 = 产量/氮吸收量; 氮肥干物质生产效率 = 地上部生物量/氮吸收量。

1.3.4 土壤肥力指标的测定 于水稻收获后, 在各小区利用 TR-901 型土壤氧化还原电位(ORP)计原位测定土壤氧化还原电位, 利用环刀法原位测定土壤容重。另外, 利用 5 点采样法在各小区采集耕层土壤(0~20 cm)样品, 去杂混匀后风干。其中, 过 2.00 mm 筛的土壤用于测定土壤 pH(pH 计, 土水比 1.0:2.5)和碱解氮含量(碱解扩散法), 过 1.00 mm 筛的土壤用于测定土壤阳离子交换量(采用乙酸铵法测

定)和速效钾含量(采用乙酸铵-火焰光度计法测定),过 0.85 mm 筛的土壤用于测定土壤有效磷含量(采用碳酸氢钠法测定),过 0.15 mm 筛的土壤用于测定土壤有机碳含量(采用水合热重铬酸钾氧化-比色法测定)、全氮含量(采用开氏消煮法测定)、全磷含量(采用碳酸钠熔融法测定)和全钾含量(采用氢氧化钠熔融法测定)<sup>[23]</sup>。

### 1.4 数据统计与分析

利用 Microsoft Excel 2021 软件和 SPSS 22.0 软件进行数据统计与分析,运用最小显著差异法(LSD)进行数据的差异显著性检验。

表 1 秸秆及生物炭还田对稻虾共作模式水稻产量及其构成因素的影响

Table 1 Effect of straw and biochar returning on yield and yield components of rice under a rice-crayfish integrated system

年份	处理	穗数 ( $\times 10^4$ , 1 hm <sup>2</sup> )	每穗粒数	结实率 (%)	千粒重 (g)	实际产量 (t/hm <sup>2</sup> )
2022	CK	148.89c	225.42b	88.28a	24.26a	6.84c
	NS	178.89b	232.74ab	85.64c	24.42a	8.40b
	S	186.67b	236.87a	86.61bc	24.47a	8.70b
	LB	212.22a	240.12a	87.07ab	24.80a	9.34a
	HB	219.44a	238.78a	87.30ab	24.65a	9.70a
2023	CK	133.33c	222.54b	91.28a	27.23a	7.25c
	NS	165.56b	231.41ab	88.64c	26.72a	8.79b
	S	173.33b	234.03a	89.28bc	26.67a	9.17b
	LB	197.22a	237.33a	89.97b	26.49a	10.20a
	HB	200.56a	235.43a	90.30ab	26.68a	10.62a

CK:无秸秆还田和无氮肥施用处理;NS:无秸秆还田处理;S:秸秆还田处理;LB:低量生物炭还田处理;HB:高量生物炭还田处理。同一年份同一列数据后不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

### 2.2 水稻茎蘖动态

稻虾共作模式下,水稻分蘖盛期、拔节期和抽穗期的茎蘖数及最终的成穗率均在处理间呈现显著差异,2年趋势基本一致(表2)。在分蘖盛期,秸秆和生物炭还田处理的水稻茎蘖数均显著高于NS处理。在拔节期和抽穗期,水稻茎蘖数仅在LB和HB处理下较NS处理显著增加,但LB和HB处理之间无显著差异。另外,最终的成穗率也仅在LB和HB处理下较NS处理显著提高,其中LB和HB处理在2年内分别平均提高了7.14%和6.61%,但LB和HB处理之间无显著差异。

### 2.3 水稻叶片 SPAD 值和叶面积指数

稻虾共作模式下,与NS处理相比,水稻拔节期、抽穗期和成熟期S处理的水稻叶片SPAD值及叶面积指数均无显著变化,LB和HB处理的叶片

## 2 结果与分析

### 2.1 水稻产量及其构成因素

在2022年和2023年,稻虾共作模式下水稻实际产量及除千粒重外的其他产量构成因素均在不同处理间出现显著差异(表1)。与NS处理的水稻实际产量相比,S处理在2年内未出现显著增加,而LB和HB处理在2年内均显著增加( $P<0.05$ ),但LB和HB处理间无显著差异。进一步分析发现,LB和HB处理的水稻穗数和结实率在2年内均显著高于NS处理( $P<0.05$ )。

表 2 秸秆及生物炭还田对稻虾共作模式水稻茎蘖动态的影响

Table 2 Effect of straw and biochar returning on tillering dynamics of rice under a rice-crayfish integrated system

年份	处理	茎蘖数( $\times 10^4$ , 1 hm <sup>2</sup> )			成穗率 (%)
		分蘖盛期	拔节期	抽穗期	
2022	CK	217.78d	196.67c	158.89c	68.37b
	NS	259.44c	235.56b	188.89b	68.95b
	S	272.22b	241.67b	196.67b	69.10b
	LB	291.11a	263.33a	212.22a	72.90a
	HB	299.44a	270.56a	217.22a	73.29a
2023	CK	201.67d	194.44c	141.67c	66.25b
	NS	246.67c	232.78b	174.44b	67.52b
	S	256.11b	238.89b	182.78b	68.84b
	LB	273.89a	258.89a	208.33a	73.30a
	HB	279.44a	263.33a	212.22a	72.19a

各处理见表1注。同一年份同一列数据后不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。



SPAD 值及叶面积指数显著增加,但 LB 和 HB 处理之间无显著差异,2 年趋势基本一致(表 3)。与 NS 处理的叶片 SPAD 值相比,2 年内 LB 和 HB 处理在拔节期的 SPAD 值分别平均增加 10.67%和 14.35%,在抽穗期分别平均增加 12.86%和 17.74%,在成熟期分别

平均增加 21.11%和 27.18%。另外,与 NS 处理的叶面积指数相比,2 年内 LB 和 HB 处理在拔节期分别平均增加 12.62%和 17.72%,在抽穗期分别平均增加 12.84%和 17.40%,在成熟期分别平均增加 13.72%和 17.26%。

表 3 秸秆及生物炭还田对稻虾共作模式水稻叶片 SPAD 值和叶面积指数的影响

Table 3 Effect of straw and biochar returning on leaf SPAD value and leaf area index of rice under a rice-crayfish integrated system

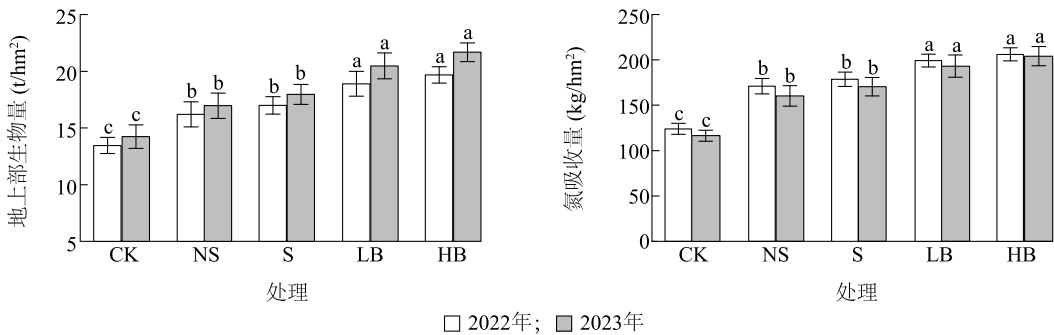
年份	处理	叶片 SPAD 值			叶面积指数		
		拔节期	抽穗期	成熟期	拔节期	抽穗期	成熟期
2022	CK	34.62c	36.13c	14.92c	2.92c	4.07c	2.76c
	NS	37.90b	39.83b	20.57b	4.28b	6.66b	3.68b
	S	38.40b	40.83b	21.37b	4.36b	6.79b	3.77b
	LB	41.13a	44.43a	24.70a	4.78a	7.43a	4.07a
	HB	42.33a	46.20a	25.93a	4.99a	7.76a	4.14a
2023	CK	33.83c	35.47c	14.60c	3.06c	4.22c	2.85c
	NS	37.52b	39.50b	20.63b	4.35b	6.73b	3.68b
	S	38.63b	41.03b	21.53b	4.46b	6.88b	3.89b
	LB	42.33a	45.10a	25.20a	4.94a	7.68a	4.30a
	HB	43.90a	47.20a	26.47a	5.17a	7.96a	4.49a

各处理见表 1 注。同一年份同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

2.4 水稻成熟期地上部生物量和氮素吸收量

由图 1 可知,稻虾共作模式下,水稻成熟期地上部生物量及氮吸收量均在处理间呈现显著差异,其中 LB 和 HB 处理相对较高,S 和 NS 处理其次,2 年趋势基本一致。与 NS 处理相比,S 处理的水稻地上部生物量并未出现显著增加,而 LB 和 HB 处理在

2 年内分别平均显著增加了 18.65%和 24.60%,但 LB 和 HB 处理间无显著差异。另外,与 NS 处理相比,S 处理的水稻氮吸收量未出现显著增加,而 LB 和 HB 处理在 2 年内分别平均显著增加了 18.20%和 23.93%,但 LB 和 HB 处理间无显著差异。



各处理见表 1 注。不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

图 1 秸秆及生物炭还田对稻虾共作模式水稻成熟期地上部生物量和氮吸收量的影响

Fig.1 Effect of straw and biochar returning on aboveground biomass and nitrogen uptake of rice at maturity stage under a rice-crayfish integrated system

2.5 水稻氮肥利用率

稻虾共作模式下,水稻氮肥利用率各指标均在处理间呈现显著差异,总体表现为 HB 处理>LB 处理>S 处理>NS 处理,2 年趋势基本一致(表 4)。与 NS 处

理相比,氮肥偏生产力、籽粒生产效率和氮肥干物质生产效率在 S 处理下未出现显著提高,而在 LB 和 HB 处理下出现显著提高,但 LB 和 HB 处理之间差异不显著。2 年内,LB 和 HB 处理相对于 NS 处理在氮肥

偏生产力上分别提高了 13.65% 和 18.20%, 在氮肥籽粒生产效率上分别提高了 6.51% 和 9.13%, 在氮肥干物质生产效率上分别提高了 11.16% 和 15.14%。另外, 氮肥农学效率、氮肥表观利用率、氮肥生理利用率和氮肥贡献率在 S、LB 和 HB 处理下均较 NS 处理显著提高, 且三者之间差异显著, 从高到低依次为 HB

处理>LB 处理>S 处理。2 年内, S、LB 和 HB 处理相对于 NS 处理在氮肥农学效率上分别提高了 21.89%、76.31% 和 101.59%, 在氮肥表观利用率上分别提高了 19.77%、67.47% 和 87.31%, 在氮肥生理利用率上分别提高了 15.72%、43.23% 和 55.92%, 在氮肥贡献率上分别提高了 16.40%、54.69% 和 68.31%。

表 4 秸秆及生物炭还田对稻虾共作模式水稻氮肥利用率的影响

Table 4 Effect of straw and biochar returning on nitrogen use efficiency of rice under a rice-crayfish integrated system

年份	处理	氮肥偏生产力 (kg/kg)	氮肥农学效率 (kg/kg)	氮肥表观 利用率(%)	氮肥生理利用率 (kg/kg)	氮肥贡献率 (%)	氮肥籽粒生产 效率(kg/kg)	氮肥干物质生产 效率(kg/kg)
2022	CK	—	—	—	—	—	55.18a	108.52a
	NS	55.99b	10.39d	31.37d	33.13d	18.59d	49.47c	95.00b
	S	57.98b	12.38c	36.45c	37.71c	21.30c	50.20c	98.17b
	LB	62.26a	16.67b	50.15b	44.87b	26.79b	52.05b	105.07a
	HB	64.70a	19.10a	54.72a	48.97a	29.02a	53.49ab	108.17a
2023	CK	—	—	—	—	—	56.80a	110.81a
	NS	58.59b	10.23d	32.13d	31.83d	17.45d	50.24c	96.84b
	S	61.11b	12.75c	39.63c	37.44c	20.63c	52.79bc	101.44b
	LB	68.02a	19.66b	56.25b	48.07b	28.84b	54.16ab	108.19a
	HB	70.80a	22.44a	64.32a	52.21a	31.50a	55.33a	112.74a

各处理见表 1 注。同一年份同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。—表示无数据。

## 2.6 土壤容重、氧化还原电位、pH 和阳离子交换量

在进行稻虾共作模式的 2 年内, 土壤容重在 S、LB 和 HB 处理下均较 NS 处理有所下降, 但仅在 2023 年 HB 处理下出现显著降低(表 5)。2 年内土壤氧化还原电位和 pH 在处理间从高到低表现为 HB 处理>LB 处理>NS 处理>S 处理, 阳离子交换量在处理间从高到低表现为 HB 处理>LB 处理>S 处理>NS 处理, 与 NS 处理的上述指标相比, S 处理均未出现显著差异(表 5)。土壤氧化还原电位和 pH 在 LB 处理下仅在 2023 年较 NS 处理显著提高, 而在 HB 处理下 2 年均较 NS 处理显著提高, 但 LB 和 HB 处理之间差异不显著。LB 和 HB 处理 2 年内土壤阳离子交换量均较 NS 处理显著提高, 且 HB 处理显著高于 LB 处理。

## 2.7 土壤养分含量及其有效性

在进行稻虾共作模式的 2 年内, 土壤养分含量及其有效性指标在处理间基本表现为 HB 处理>LB 处理>S 处理>NS 处理的变化趋势, 且处理间差异随年限延长而增大(表 6)。在 2023 年, 与 NS 处理相比, 土壤有机碳含量在 S 处理下未出现显著增加, 而在 LB 和 HB 处理下分别显著增加了 11.31% 和 20.71%, 其中 HB 处理显著高于 LB 处理; 与 NS 处理相比, 土

表 5 秸秆及生物炭还田对稻虾共作模式土壤容重、氧化还原电位、pH 和阳离子交换量的影响

Table 5 Effect of straw and biochar returning on soil volumetric weight, redox potential, pH and cation exchange capacity of soil under a rice-crayfish integrated system

年份	处理	容重 (g/cm <sup>3</sup> )	氧化还原 电位 (mV)	pH	阳离子 交换量 (cmol/kg)
2022	CK	1.34a	66.98bc	7.32b	19.86c
	NS	1.33a	67.68bc	7.33b	19.97c
	S	1.32a	65.68c	7.30b	20.59bc
	LB	1.30a	70.24ab	7.39ab	21.39b
	HB	1.28a	72.46a	7.44a	22.68a
2023	CK	1.33a	64.50b	7.29b	20.06c
	NS	1.32a	65.00b	7.30b	20.17c
	S	1.30a	62.80b	7.26b	21.02c
	LB	1.27ab	73.06a	7.43a	22.45b
	HB	1.21b	75.80a	7.51a	25.01a

各处理见表 1 注。同一年份同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

壤全氮含量、全磷含量和全钾含量在 S 和 LB 处理下未出现显著增加, 而在 HB 处理下分别显著增加 6.12%、11.48% 和 6.94%。与土壤有机碳含量相似, 在 2023 年 S 处理土壤碳氮比、碱解氮含量、有效磷含量和速效钾含量与 NS 处理无显著差异, 而在 LB 和 HB 处理下均

较 NS 处理显著增加,其中 HB 处理显著高于 LB 处理。在 2023 年,与 NS 处理相比, LB 和 HB 处理的土壤碳氮比分别显著增加了 7.83%和 14.04%,土壤碱解氮含量分别显著增加了 8.55%和 17.97%,土壤有效磷含量分别显著增加了 12.88%和 23.11%,土壤速效钾含量分别显著增加了 9.78%和 17.45%。

表 6 秸秆及生物炭还田对稻虾共作模式土壤养分含量及其有效性的影响

Table 6 Effect of straw and biochar returning on nutrient content and nutrient availability of soil under a rice-crayfish integrated system

年份	处理	有机碳含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	全钾含量 (g/kg)	碳氮比	碱解氮含量 (mg/kg)	有效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)
2022	CK	19.08b	1.94a	0.59b	12.36a	9.87b	174.56c	18.11c	177.99c
	NS	19.17b	1.95a	0.60b	12.42a	9.88b	172.78c	18.03c	175.54c
	S	19.61b	1.96a	0.61b	12.55a	10.02b	179.55bc	18.68bc	180.26bc
	LB	20.13ab	1.98a	0.63ab	12.74a	10.16ab	184.08ab	19.55b	185.67ab
	HB	21.23a	2.02a	0.66a	12.96a	10.53a	192.96a	21.04a	193.46a
2023	CK	19.16c	1.95b	0.60b	12.37b	9.81c	176.66c	18.29d	178.02c
	NS	19.27c	1.96b	0.61b	12.40b	9.83c	178.48c	18.48cd	176.95c
	S	20.11c	1.99b	0.61b	12.65b	10.20bc	184.35c	19.21c	185.43c
	LB	21.45b	2.03ab	0.64ab	12.93ab	10.60b	193.74b	20.86b	194.25b
	HB	23.26a	2.08a	0.68a	13.26a	11.21a	210.56a	22.75a	207.83a

各处理见表 1 注。同一年份同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

2.8 水稻产量及生长指标与土壤肥力指标间的相关性

总体而言,稻虾共作模式下,水稻产量及生长指标与土壤容重间存在负相关关系,而与其他土壤肥力指标间存在正相关关系(表 7)。其中,水稻实际产量、地上部生物量、成穗率和抽穗期叶片 SPAD 值与土壤容重呈显著或极显著负相关,而与其他土壤肥力指标呈显著或极显著正相关。另外,水稻抽穗

期叶面积指数与土壤氧化还原电位和 pH 的相关性不显著,但与土壤容重呈显著负相关,与阳离子交换量、有机碳含量、全氮含量、全磷含量、全钾含量、碳氮比、碱解氮含量、有效磷含量和速效钾含量呈显著正相关。除此之外,水稻分蘖盛期茎蘖数仅与土壤全磷含量、全钾含量和有效磷含量呈显著正相关,而与其他土壤肥力指标间的相关性不显著。

表 7 水稻产量及生长指标与土壤肥力指标间的 Pearson 相关性分析

Table 7 Pearson correlation analysis between the indicators of rice yield and growth and the indicators of soil fertility

指标	相关系数					
	实际产量	地上部生物量	茎蘖数	成穗率	叶片 SPAD 值	叶面积指数
容重	-0.845 1 **	-0.878 1 **	-0.554 1	-0.692 3 *	-0.829 6 **	-0.672 5 *
氧化还原电位	0.697 2 *	0.753 5 *	0.628 1	0.859 6 **	0.812 1 **	0.594 4
pH	0.720 5 *	0.779 8 **	0.618 3	0.847 7 **	0.827 4 **	0.600 0
阳离子交换量	0.844 5 **	0.886 8 **	0.626 0	0.757 8 *	0.870 6 **	0.689 2 *
有机碳含量	0.851 8 **	0.890 1 **	0.606 8	0.752 2 *	0.862 5 **	0.687 5 *
全氮含量	0.884 0 **	0.915 2 **	0.618 5	0.746 5 *	0.873 7 **	0.723 3 *
全磷含量	0.873 6 **	0.916 4 **	0.741 0 *	0.846 6 **	0.932 9 **	0.764 2 *
全钾含量	0.890 8 **	0.930 9 **	0.726 8 *	0.845 0 **	0.930 4 **	0.762 5 *
碳氮比	0.841 2 **	0.879 9 **	0.611 0	0.754 1 *	0.858 9 **	0.680 4 *
碱解氮含量	0.843 5 **	0.882 3 **	0.579 8	0.716 9 *	0.844 1 **	0.670 2 *
有效磷含量	0.861 8 **	0.902 9 **	0.637 8 *	0.782 3 **	0.883 1 **	0.704 0 *
速效钾含量	0.824 6 **	0.870 7 **	0.588 1	0.760 8 *	0.849 1 **	0.650 1 *

$n=10, R_{0.05}=0.6319, R_{0.01}=0.7646$ 。\* 和 \*\* 分别表示显著相关 ( $P<0.05$ ) 和极显著相关 ( $P<0.01$ )。表中水稻茎蘖数为分蘖盛期数据,叶片 SPAD 值和叶面积指数为抽穗期数据。

### 3 讨论

在常规水稻种植条件下,前人研究发现生物炭还田的水稻增产效应强于秸秆还田<sup>[19-21]</sup>。Shen 等<sup>[20]</sup>研究发现在双季稻种植制度下水稻秸秆生物炭还田的水稻产量显著高于水稻秸秆还田。在稻虾共作模式下,本研究也发现水稻秸秆还田的水稻增产效果并不明显,而水稻秸秆生物炭还田显著提高了水稻产量。水稻产量形成与其干物质积累密切相关<sup>[26-32]</sup>。稻虾共作模式下,水稻秸秆生物炭还田较水稻秸秆还田具有较高的水稻分蘖数、叶片 SPAD 值和叶面积指数,这会提升水稻群体的光合生产力,促进水稻干物质累积,其较高的地上部生物量恰好也证实了这一点。水稻氮肥利用率提高也对水稻生长及产量形成具有积极影响<sup>[33-34]</sup>。陈伟<sup>[35]</sup>在常规水稻种植条件下发现水稻氮肥偏生产力、农学效率和表观利用率在水稻秸秆生物炭还田条件下分别较水稻秸秆还田提高 5.98%、8.23%、20.57%,最终使得水稻地上部生物量和产量分别提高 8.60% 和 5.28%。与前人研究结果相似,本研究发现在稻虾共作模式下水稻秸秆生物炭还田较水稻秸秆还田具有更高的水稻氮肥利用率。

生物炭还田降低水稻氮肥损失是其提高水稻氮肥利用率的根本原因<sup>[36-37]</sup>。Huang 等<sup>[36]</sup>研究发现,木薯秸秆生物炭还田较不还田使水稻氮肥损失率降低了 9%~10%,水稻氮吸收量增加了 23%~27%。稻虾共作模式下土壤淹水时间较长、淹水水位较高,氮肥容易从土壤快速移动到田面水体中,导致氮肥损失加剧和氮肥利用率较低<sup>[38]</sup>。秸秆生物炭结构中具有丰富的孔隙和表面官能团,使得其具有较高的阳离子吸附能力<sup>[16-17]</sup>。本研究发现稻虾共作模式下水稻秸秆生物炭还田处理的土壤阳离子交换量显著高于水稻秸秆还田处理,这会增强土壤对铵态氮的吸附能力,进而减少水稻氮肥的损失率,促进水稻对氮素的吸收利用。水稻秸秆生物炭还田条件下土壤氮有效性较高(碱解氮含量较高),能够很好地证实这一点。

土壤自身的肥力水平对水稻维持良好生长及增产具有重要作用<sup>[39-40]</sup>。本研究发现,稻虾共作模式下,水稻地上部生物量和产量均与土壤容重呈极显著负相关,而与其他土壤肥力指标呈显著或极显著正相关。稻虾共作模式下,水稻秸秆生物炭还田降

低土壤容重的效果强于水稻秸秆还田,水稻秸秆生物炭还田可能会使土壤更疏松,促进水稻根系生长,进而促进水稻增产<sup>[21]</sup>。此外,水稻秸秆生物炭还田能够提高土壤氧化还原电位,这可能会减轻土壤还原性物质对水稻根系的毒害,促进其对土壤养分的吸收,进而促进水稻产量形成<sup>[41]</sup>。另外,稻虾共作模式下,高量水稻秸秆生物炭还田不仅较水稻秸秆还田提高了土壤全氮和碱解氮含量,还提高了土壤全磷、有效磷、全钾和速效钾含量。这表明除了提升土壤氮素供应能力之外,水稻秸秆生物炭还田还能够提升稻虾共作模式的土壤磷、钾供应能力,为水稻生长和产量形成提供充足的磷素和钾素。

稻虾共作模式下水稻秸秆生物炭还田较水稻秸秆还田更能降低土壤容重,原因可能是其具有较高的有机碳含量和结构稳定性,这能够快速增加土壤有机碳含量进而降低土壤容重<sup>[42]</sup>。水稻秸秆生物炭还田能够通过降低土壤容重改善土壤通气性,进而减少土壤还原性物质<sup>[41]</sup>,这可能是其提高稻虾共作模式下土壤氧化还原电位的主要原因。水稻秸秆生物炭本身碱性较强,这可能是其还田后使稻虾共作模式土壤 pH 提高的主要原因,而其丰富的表面官能团会提升土壤吸附性,使土壤具有较高的阳离子交换量<sup>[17]</sup>。至于水稻秸秆生物炭还田较水稻秸秆还田能够提高土壤氮磷钾有效性的原因,一方面是水稻秸秆生物炭的氮磷钾含量较高,为土壤带来了更高的氮磷钾投入;另一方面是其改善了土壤容重、pH、阳离子交换量等与养分有效性相关的土壤理化性状。

综上所述,稻虾共作模式下水稻秸秆生物炭还田在提升土肥力、促进水稻生长、增加水稻产量上优于水稻秸秆还田。本研究还发现,稻虾共作模式下,高量水稻秸秆生物炭还田(15.0 t/hm<sup>2</sup>)的水稻产量并未较低量水稻秸秆生物炭还田(7.5 t/hm<sup>2</sup>)出现显著增加,前人在常规水稻种植模式下也得到相似的研究结果<sup>[20,43]</sup>。对水稻生长指标的分析发现,稻虾共作模式下,高量水稻秸秆生物炭还田(15.0 t/hm<sup>2</sup>)与低量水稻秸秆生物炭还田的水稻茎蘖数、成穗率、叶片 SPAD 值、叶面积指数及地上部生物量差异不显著可能是其水稻产量差异不显著最直接的原因。另外,从水稻氮素营养状况和氮肥利用率上分析发现,稻虾共作模式下,高量水稻秸秆生物炭还田条件下水稻氮吸收量、氮肥偏生产力、籽粒生产效



率和干物质生产效率与低量水稻秸秆生物炭还田差异不显著,这可能是导致两者产量差异不显著的另一直接原因。从土壤肥力指标上分析发现,稻虾共作模式下,虽然高量水稻秸秆生物炭还田较少量水稻秸秆生物炭还田提高了土壤氮磷钾有效性,但土壤容重、氧化还原电位、pH、全氮含量、全磷含量、全钾含量并未在两者间出现显著差异,这也可能间接导致两者在水稻产量上差异不显著。

## 4 结论

本研究结果表明,稻虾共作模式下,水稻秸秆生物炭还田促进水稻生长和增产的效应强于水稻秸秆还田,这可直接归因于水稻秸秆生物炭还田较高的水稻氮肥利用率。另外,土壤容重、氧化还原电位、pH和阳离子交换量在水稻秸秆生物炭还田下得到改善,土壤氮、磷、钾有效性在水稻秸秆生物炭还田条件下得到提升,这也间接促进了水稻生长和产量形成。但水稻秸秆生物炭还田促进水稻生长和增产的效应并未随水稻秸秆生物炭还田量的增加而增强,在低量水稻秸秆生物炭还田( $7.5 \text{ t/hm}^2$ )和高量水稻秸秆生物炭还田( $15.0 \text{ t/hm}^2$ )间无显著差异。因此,综合考虑水稻产量、氮肥利用率和土壤肥力,本研究认为低量水稻秸秆生物炭还田( $7.5 \text{ t/hm}^2$ )是稻虾共作模式下促进水稻增产、氮肥利用率提高和土壤肥力提升的适宜的秸秆还田方式。

## 参考文献:

- [1] 曹凑贵,江 洋,汪金平,等. 稻虾共作模式的“双刃性”及可持续发展策略[J]. 中国生态农业学报,2017,25(9):1245-1253.
- [2] 唐建军,李 巍,吕修涛,等. 中国稻渔综合种养产业的发展现状与若干思考[J]. 中国稻米,2020,26(5):1-10.
- [3] 于秀娟,郝向举,党子乔,等. 中国稻渔综合种养产业发展报告(2023)[J]. 中国水产,2023(2):5-17.
- [4] YUAN P L, WANG J P, LI C F, et al. Soil quality indicators of integrated rice-crayfish farming in the Jiangnan Plain, China using a minimum data set[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 204: 104732.
- [5] SI G H, PENG C L, YUAN J F, et al. Changes in soil microbial community composition and organic carbon fractions in an integrated rice-crayfish farming system in subtropical China[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1):2856.
- [6] YU J X, REN Y, XU T, et al. Physicochemical water quality parameters in typical rice-crayfish integrated systems (RCIS) in China[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(3):54-60.
- [7] 张家宏,叶 浩,朱凌宇,等. 江淮地区“一稻三虾”综合种养绿色生产技术[J]. 湖北农业科学,2019,58(8):110-113.
- [8] 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.
- [9] 向万胜,周卫军,古汉虎.  $\text{CaO}_2$ 等缓性释氧物改善土壤氧化还原条件的作用及对水稻生长的影响[J]. 土壤学报,1996,33(2):220-224.
- [10] 张瑞春,张玉屏,周雪峰,等. 潜育化稻田品种耐潜性差异与栽培技术研究[J]. 中国稻米,2014,20(1):60-62.
- [11] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报,2008,45(5):915-924.
- [12] 于 飞,施卫明. 近 10 年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J]. 土壤学报,2015,52(6):1311-1324.
- [13] XU G W, JIANG M M, LU D K, et al. Nitrogen forms affect the root characteristic, photosynthesis, grain yield, and nitrogen use efficiency of rice under different irrigation regimes[J]. Crop Science, 2020, 60(5):2594-2610.
- [14] ZHENG C X, ZHANG Z Y, WU Y Y, et al. Response of vertical migration and leaching of nitrogen in percolation water of paddy fields under water-saving irrigation and straw return conditions[J]. Water, 2019, 11(4):868.
- [15] HOU J, ZHANG D Y, ZHU J Q. Nutrient accumulation from excessive nutrient surplus caused by shifting from rice monoculture to rice-crayfish rotation[J]. Environmental Pollution, 2021, 271: 116367.
- [16] JOSEPH S D, CAMPSARBESTAIN M, LIN Y, et al. An investigation into the reactions of biochar in soil[J]. Australian Journal of Soil Research, 2010, 48(7):501-515.
- [17] LEHMANN J. Bio-energy in the black[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2007, 5(7):381-387.
- [18] LI L, HE L X, LI Y Q, et al. Deep fertilization combined with straw incorporation improved rice lodging resistance and soil properties of paddy fields[J]. European Journal of Agronomy, 2023, 142:126659.
- [19] LIU L Y, LI H Y, ZHU S H, et al. The response of agronomic characters and rice yield to organic fertilization in subtropical China: a three-level meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2021, 263:108049.
- [20] SHEN J L, TANG H, LIU J Y, et al. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar amendments on greenhouse gas emissions within double rice cropping systems[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 188:264-274.
- [21] SUI Y H, GAO J P, LIU C H, et al. Interactive effects of straw-derived biochar and N fertilization on soil C storage and rice productivity in rice paddies of Northeast China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 544:203-210.
- [22] 黄 恒,姜恒鑫,刘光明,等. 侧深施氮对水稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. 作物学报,2021,47(11):2232-2249.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,1999:22-308.

- [24] 邹娟,鲁剑巍,陈防,等. 长江流域油菜氮磷钾肥料利用率现状研究[J]. 作物学报,2011,37(4):729-734.
- [25] CASSMAN K G, PENG S B, OLK D C, et al. Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems[J]. Field Crops Research, 1998,56(1/2):7-39.
- [26] AMBAVARAM M M R, BASU S, KRISHNAN A, et al. Coordinated regulation of photosynthesis in rice increases yield and tolerance to environmental stress[J]. Nature Communications,2014,5:5302.
- [27] MA L J, ZHANG C X, XU R, et al. Slow-release nitrogen fertilizer reduces input without yield loss in a rice-crayfish integrated system[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems,2024,128(1):35-51.
- [28] 王守红,张诚信,马林杰,等. 稻虾共作模式下利于水稻产量稻米品质协同的适宜栽插密度[J]. 江苏农业学报,2023,39(8):1668-1679.
- [29] 段秀建,张巫军,姚雄,等. 缓控释肥组配对早熟籼稻作为中稻——再生稻栽培模式产量和氮肥利用率的影响[J]. 南方农业学报,2022,53(1):38-46.
- [30] 郭诗梦,牟静怡,翟文举,等. 有机肥等氮替代化肥对梗稻产量及干物质积累的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(19):56-61.
- [31] 杨洪,李旭毅,卿发红,等. 不同产量水平水稻群体光合特性和产量构成差异[J]. 江苏农业学报,2023,39(5):1089-1096.
- [32] 张斯梅,顾克军,张传辉,等. 麦秸全量还田下减氮施肥对梗稻产量形成和氮素吸收利用的影响[J]. 江苏农业学报,2023,39(2):360-367.
- [33] HUANG L F, YU J, YANG J, et al. Relationships between yield, quality and nitrogen uptake and utilization of organically grown rice varieties[J]. Pedosphere,2016,26(1):85-97.
- [34] FAGERIA N K, DOS SANTOS A B, CUTRIM V D. Nitrogen uptake and its association with grain yield in lowland rice genotypes[J]. Journal of Plant Nutrition,2009,32(11):1965-1974.
- [35] 陈伟. 添加生物炭和秸秆对海南稻菜轮作土壤氮素利用率和 $N_2O$ 排放的影响[D]. 海口:海南大学,2021.
- [36] HUANG M, YANG L, QIN H D, et al. Fertilizer nitrogen uptake by rice increased by biochar application[J]. Biology and Fertility of Soils,2014,50(6):997-1000.
- [37] SEYEDGHASEMI S M, MOGHADDAM P R, ESFAHANI M. Optimization of biochar and nitrogen fertilizer in rice cultivation[J]. Journal of Plant Nutrition,2021,44(12):1705-1718.
- [38] PENG S Z, YANG S H, XU J Z, et al. Nitrogen and phosphorus leaching losses from paddy fields with different water and nitrogen managements[J]. Paddy and Water Environment,2011,9(3):333-342.
- [39] SARKAR M I U, JAHAN A, HOSSAIN A, et al. Effect of nutrient omission on rice yield in a wetland double rice cropping system[J]. Journal of Plant Nutrition,2022,46(2):312-320.
- [40] GOSAL S K, GILL G K, SHARMA S, et al. Soil nutrient status and yield of rice as affected by long-term integrated use of organic and inorganic fertilizers[J]. Journal of Plant Nutrition,2018,41(4):539-544.
- [41] 全文博. 生物炭对稻虾共作土壤理化性质和水稻生长的影响[D]. 武汉:华中农业大学,2022.
- [42] KUZUYAKOV Y, SUBBOTINA I, CHEN H, et al. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by  $^{14}C$  labeling[J]. Soil Biology and Biochemistry,2009,41(2):210-219.
- [43] LIU J, JIANG B S, SHEN J L, et al. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar applications on soil carbon accumulation and nitrogen use efficiency in double-rice cropping systems[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment,2021,311:107286.

(责任编辑:陈海霞)