

明 凯,李昊畅,张裕梁,等. 轻简化施肥条件下不同秸秆处理方式与施用外源有机物料互作对水稻产量和稻米品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(6): 1158-1171.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2026.06.008

## 轻简化施肥条件下不同秸秆处理方式与施用外源有机物料互作对水稻产量和稻米品质的影响

明 凯, 李昊畅, 张裕梁, 裴月霞, 赵 灿, 王维领, 霍中洋

(江苏省作物遗传生理重点实验室/江苏省作物栽培生理重点实验室/江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心/扬州大学, 江苏 扬州 225009)

**摘要:** 为探究轻简化施肥条件下不同秸秆处理方式与施用外源有机物料互作对水稻产量和稻米品质的影响, 在江苏省泰州市姜堰区采用育秧移栽模式, 设置秸秆还田、秸秆离田 2 种秸秆处理方式, 同时设置当地常规施肥 (CK1)、施用缓释肥 (CK2)、在缓释肥基础上增施 4.5 t/hm<sup>2</sup> 有机肥 (YJ)、在缓释肥基础上增施 4.5 t/hm<sup>2</sup> 木本泥炭 (NT)、在缓释肥基础上增施 4.5 t/hm<sup>2</sup> 生物炭 (SWT), 共计 10 个处理, 进行试验。结果表明, 施用外源有机物料在秸秆还田和秸秆离田条件下水稻产量均显著高于对照 (CK2)。同时, 有效穗数、每穗粒数整体上显著提高。秸秆还田条件下, SWT 处理可显著提高稻米糙米率、精米率、整精米率、蛋白质含量和食味值。秸秆还田条件下 YJ 处理产量最高, 与 CK2 相比, 显著提高了有效穗数、每穗粒数、千粒重、精米率、蛋白质含量, 显著降低了垩白度和垩白粒率。秸秆还田和秸秆离田条件下, 除拔节期外, YJ 处理的干物质积累总量均较 CK2 显著提高。相同外源有机物料条件下, 与秸秆离田相比, 秸秆还田可显著提高糙米率、精米率、整精米率和蛋白质含量, YJ 处理和 SWT 处理显著降低了垩白粒率。综上, 在秸秆还田与秸秆离田条件下 YJ 处理和 SWT 处理能提高水稻产量和稻米品质。

**关键词:** 缓释肥; 简化施肥; 秸秆处理方式; 外源有机物料; 水稻产量; 稻米品质

**中图分类号:** S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2026)06-1158-14

## Effects of the interaction between straw and exogenous organic materials on rice yield and grain quality under simplified fertilization conditions

MING Kai, LI Haochang, ZHANG Yuliang, PEI Yuexia, ZHAO Can, WANG Weiling, HUO Zhongyang

(Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology/Jiangsu Key Laboratory of Crop Cultivation and Physiology/Jiangsu Collaborative Innovation Center for Modern Industrial Technology of Grain Crops/Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

**Abstract:** To investigate the effects of the interaction between different straw treatment methods and the application of exogenous organic materials on rice yield and grain quality under simplified and efficient fertilization, a field experiment

收稿日期: 2025-07-23

**基金项目:** 江苏省重点研发计划项目 (BE2020319、BE2021336、BE2019377); 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项 (BE2022424); 江苏省农业科技自主创新基金项目 [CX (22) 1001、CX (24) 2008]; 国家水稻产业技术体系项目 (CARS-01-28)

**作者简介:** 明 凯 (2000-), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 研究方向为作物栽培与耕作新技术。(E-mail) 1582684719@qq.com

**通讯作者:** 霍中洋, (E-mail) zyhuo@yzu.edu.cn

was conducted in Jiangyan District, Taizhou City, Jiangsu Province, using a seedling transplanting system. The experiment included two straw treatment methods: straw return to the field and straw removal from the field. For each method, five fertilization treatments were established: local conventional fertilization (CK1), application of slow-release fertilizer (CK2), slow-release fertilizer plus 4.5 t/hm<sup>2</sup> of organic fertilizer (YJ), slow-release fertilizer plus 4.5 t/hm<sup>2</sup> of woody peat (NT), and slow-release fertilizer plus 4.5 t/hm<sup>2</sup> of biochar (SWT), resulting in a

total of ten treatments. The results showed that under both straw return to the field and straw removal from the field conditions, the application of exogenous organic materials significantly increased rice yield compared with the control (CK2). Concurrently, the number of effective panicles and grains per panicle were generally significantly improved. Under the straw return to the field condition, the SWT treatment significantly increased the brown rice rate, milled rice rate, head rice rate, protein content, and taste value. Under the straw return to the field condition, the YJ treatment achieved the highest yield. Compared with CK2, it significantly increased the number of effective panicles, grains per panicle, 1 000-grain weight, milled rice rate, and protein content, while significantly reducing the chalkiness degree and chalky grain rate. Under both straw return to the field and straw removal from the field conditions, the dry matter accumulation of the YJ treatment was significantly higher than that of CK2 at all growth stages except the jointing stage. When applying the same exogenous organic material, compared with straw removal from the field, straw return to the field significantly increased the brown rice rate, milled rice rate, head rice rate, and protein content. Additionally, the YJ and SWT treatments significantly reduced the chalky grain rate. In conclusion, under both straw return to the field and straw removal from the field conditions, the YJ and SWT treatments play a significant role in improving rice yield and quality.

**Key words:** slow-release fertilizer; simplified fertilization; straw treatment method; exogenous organic materials; rice yield; rice grain quality

水稻<sup>[1]</sup>是中国主要的粮食作物之一,也是世界上最重要的粮食作物之一,全世界超过 30 亿人口以水稻为食。有统计结果显示,中国是世界上消费稻谷最多的国家,以大米为主食的人口就占 65%左右<sup>[2]</sup>。随着中国务农人口的持续下降以及资源与环境的约束,如何协调水稻高产稳产与保护环境的矛盾成为核心议题。在此背景下,以减少追肥次数为特征的简化施肥<sup>[3]</sup>,正是推动施肥管理向轻简化、高效化转变以应对上述挑战的必要路径。“一基一追”<sup>[4]</sup>的施肥方式不但可以减少施肥次数,而且不降低作物产量。

近几年秸秆问题<sup>[5]</sup>已成为热门话题,引起全世界重视,国内外许多学者正不断研究秸秆还田技术。秸秆作为植物养分的主要富集载体,其分解过程能够促进土壤有机碳库与腐殖质的形成积累,有效提升土壤水分涵养能力及养分供给效能。通过秸秆还田<sup>[6]</sup>与化肥的优化配施,可实现对土壤养分循环过程的协同调控;这种协同作用不仅有助于提升土壤肥力、优化养分组成,还能维持稻田生态系统的物质流平衡,为实现农业资源的高效与可持续利用奠定坚实的技术基础。研究表明,秸秆还田可增加土壤孔隙度,增加有机质和营养元素含量,提高水稻产量和改善稻米品质<sup>[7]</sup>。秸秆还田对产量形成有重要作用。蔡影等<sup>[8]</sup>研究发现长期秸秆还田可显著提高水稻产量。张洪熙等<sup>[9]</sup>认为,尽管单位面积有效穗数在秸秆还田配施化肥条件下有所降低,但由于每穗粒数、结实率与千粒重均显著提高,最终仍可达到增产效果。

有机肥是一种复合生物基质,富含多种常量营养元素、微量营养元素以及功能型有机组分<sup>[10]</sup>。基于对作物营养需求动态匹配的肥料协同施用体系<sup>[11]</sup>,通过速效-缓释养分的时空耦合模式,在水稻营养生长阶段(分蘖期至拔节期)实现硝态氮与铵态氮的精准供给,在水稻生殖生长阶段(孕穗期至灌浆期)依托腐殖酸-矿物复合体的逐步分解,形成双阶段养分供给曲线<sup>[12]</sup>;这种模式有效增强了水稻颖花的分化进程与胚乳发育的充实度,并通过优化源-库-流协同关系,驱动理论产量增幅达到12%~18%。长期施用有机物料可显著提高水稻产量<sup>[13-14]</sup>。尽管已有秸秆管理模式下有机肥对水稻生产效应的研究,但在简化施肥条件下,不同秸秆处理方式与外源有机物料互作机制的对比分析仍属空白。为此,本研究拟设计秸秆还田和离田双模式试验,系统解析外源有机物料对水稻产量构成及稻米品质的影响规律,确定优化秸秆处理与高效碳源有机物料组合的策略,为秸秆资源化利用与有机培肥技术提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点与供试品种

田间试验于 2024 年在泰州市姜堰区桥头镇井贤农场(32°30'N, 120°7'E)进行。本研究中种植制度为小麦-水稻轮作。田间土壤为黏泥土,质地为黏性,pH 为 7.13,含有机质 21.6 g/kg、全氮 1.6 g/kg、速效磷 6.59 mg/kg、速效钾 116.84 mg/kg。

本研究的供试水稻品种为南粳 9108。南粳 9108 是由武香粳 14 号和关东 194 杂交选育而成的,属迟熟中粳稻品种,生育期约为 150 d。

## 1.2 试验设计

试验采用裂区设计,主区为秸秆处理方式试验:秸秆全量还田、秸秆全量离田;裂区为不同外源有机物料试验:分别为常规施肥处理(CK1),只施用缓释肥(CK2),缓释肥基础上增施 4.5 t/hm<sup>2</sup> 有机肥(YJ),缓释肥基础上增施 4.5 t/hm<sup>2</sup> 木本泥炭(NT),缓释肥基础上增施 4.5 t/hm<sup>2</sup> 生物炭(SWT),所有裂区均做秸秆全量还田、秸秆全量离田,试验共设 10 个处理,每个处理重复 3 次,小区面积 12 m<sup>2</sup>。

本试验缓释肥(N:P:K=26:10:15)由山东汉枫茂施缓释肥料有限公司提供,有机肥由瑞华生物工程有限公司提供,木本泥炭由中向旭曜科技有限公司提供,生物炭由辽宁金和福农业科技股份有限公司提供,养分含量如表 1 所示。所有处理氮肥、磷肥和钾肥等量施入,氮(尿素)、磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)、钾(K<sub>2</sub>O)施用比例为 1.0:0.5:0.8,磷肥作为基肥 1 次性施用,钾肥分基肥和穗肥 2 次施用,各占 50%。于水稻返青后人工定苗,每穴 4 苗,随机排列。除

CK1 外,其余处理基肥施用缓释肥(占总施氮量 60%),穗肥施用常规尿素(总施氮量的 40%),外源有机物料与基肥同时施入。于 2024 年 5 月 14 日播种育秧,每盘播种量为 120 g 干种子,6 月 12 日将水稻幼苗人工移栽到大田中,栽插行距和株距为 30 cm×12 cm,每穴 4 株苗,1 hm<sup>2</sup> 2.775×10<sup>5</sup> 穴。本研究采用保护行与覆膜田埂相结合的方式隔离小区。具体措施为:于试验区四周设置保护行,各小区之间修筑 35~40 cm 高的土埂(田埂),并对其进行塑料薄膜包裹处理,最大限度地降低彼此间的干扰。肥料施用管理如表 2 所示。CK1 处理与当地农民高产田的施肥方法一致,分 4 次施氮肥,即在移栽前(移栽前 1 d)、分蘖初期(移栽后 7 d)、倒 4 叶期和倒 2 叶期。

表 1 外源有机物料养分情况

Table 1 Nutrient status of exogenous organic materials

| 外源有机物料 | 全氮含量(g/kg) | 全磷含量(g/kg) | 全钾含量(g/kg) | 有机质含量(%) |
|--------|------------|------------|------------|----------|
| 有机肥    | 18.7       | 21.5       | 10.7       | 51.3     |
| 木本泥炭   | 0          | 0          | 0          | 65.0     |
| 生物炭    | 4.2        | 2.3        | 6.8        | 54.8     |

表 2 各处理肥料施用量

Table 2 Fertilizer application rates for each treatment

| 主区   | 裂区  | 施氮量(kg/hm <sup>2</sup> ) |       |       |        |       | 磷(kg/hm <sup>2</sup> ) | 钾(kg/hm <sup>2</sup> ) | 外源有机物料施用量(kg/hm <sup>2</sup> ) | 总施氮量(kg/hm <sup>2</sup> ) |
|------|-----|--------------------------|-------|-------|--------|-------|------------------------|------------------------|--------------------------------|---------------------------|
|      |     | 基肥                       | 分蘖肥   | 倒 4 叶 | 倒 3 叶  | 倒 2 叶 |                        |                        |                                |                           |
| 秸秆还田 | CK1 | 89.25                    | 89.25 | 38.25 |        | 38.25 | 127.50                 | 204.00                 | 0                              | 255.00                    |
|      | CK2 | 153.00                   |       |       | 102.00 |       | 127.50                 | 204.00                 | 0                              | 255.00                    |
|      | YJ  | 153.00                   |       |       | 102.00 |       | 127.50                 | 204.00                 | 4 500.00                       | 255.00                    |
|      | NT  | 153.00                   |       |       | 102.00 |       | 127.50                 | 204.00                 | 4 500.00                       | 255.00                    |
|      | SWT | 153.00                   |       |       | 102.00 |       | 127.50                 | 204.00                 | 4 500.00                       | 255.00                    |
| 秸秆离田 | CK1 | 89.25                    | 89.25 | 38.25 |        | 38.25 | 127.50                 | 204.00                 | 0                              | 255.00                    |
|      | CK2 | 153.00                   |       |       | 102.00 |       | 127.50                 | 204.00                 | 0                              | 255.00                    |
|      | YJ  | 153.00                   |       |       | 102.00 |       | 127.50                 | 204.00                 | 4 500.00                       | 255.00                    |
|      | NT  | 153.00                   |       |       | 102.00 |       | 127.50                 | 204.00                 | 4 500.00                       | 255.00                    |
|      | SWT | 153.00                   |       |       | 102.00 |       | 127.50                 | 204.00                 | 4 500.00                       | 255.00                    |

## 1.3 指标测定

1.3.1 水稻产量及其构成因素的测定 于成熟期对各小区进行农艺性状调查与产量测定。每个小区

普查 50 穴以统计有效穗数;随后选取 5 穴,调查每穗粒数及结实率。千粒重测定以 1 000 粒实粒(干燥种子)为样本,重复称重 3 次,允许误差不超过

0.05 g。产量测定方面,每小区收割 100 穴植株,经脱粒、除杂及晒干后称重,再按 14.5% 的含水率标准换算为单位面积实际产量。

**1.3.2 茎蘖数及其成穗率的测定** 自秧苗返青起,每个小区设 2 个点,每个点固定 10 穴,以定期监测茎蘖生长动态。拔节前每 5 d 调查 1 次茎蘖数,拔节后改为每 7 d 观测 1 次。重点记录分蘖中期、拔节期、抽穗期和成熟期 4 个关键生育期的茎蘖数,并综合分析其动态变化。

**1.3.3 叶面积指数和地上部干物质积累及转运的测定** 于分蘖期、拔节期、抽穗期与成熟期,按小区平均茎蘖数选定 3 穴代表性植株样本,以用于叶片长和宽的测量,最终基于比重法计算叶片叶面积,进而求得叶面积指数。之后将样品经 105 ℃ 杀青 30 min,继而在 75 ℃ 下烘干至恒重,并测定各器官干物重。

干物质积累总量=茎鞘干重+叶干重+穗干重;

齐穗后干物质积累量=成熟期植株总干重-齐穗期植株总干重;

齐穗后干物质转运比例=齐穗后干物质积累量/成熟期植株总干重×100%;

齐穗后干物质转运贡献率=齐穗后干物质积累量/成熟期穗干重×100%。

**1.3.4 SPAD 值的测定** 分别于水稻拔节期、抽穗期、成熟期 3 个关键生育期,各随机选取 15 张剑叶,使用叶绿素仪测量 SPAD 值。测量时避开主脉,SPAD 值为每张叶片基部、中部和尖端读数的平均值。

**1.3.5 稻米品质** 于成熟期适时收获稻谷,经脱粒、除杂并自然风干至标准含水量后贮藏 3 个月。随后,参照《优质稻谷》(GB/T 17891-2017)测定加工品质、外观品质相关指标。直链淀粉含量采用碘比色法测定。蛋白质含量的测定:先使用 SAN++全自动流动分析仪(荷兰斯卡拉公司产品)测定样品氮含量,再经系数换算获得蛋白质含量。蛋白质含量=氮含量×5.95。采用米饭食味计(STA1A,日本佐竹公司产品)进行稻米食味品质测定。采用澳大利亚 Newport Scientific 仪器公司生产的 Super3 型快速黏度分析仪(RVA)测定淀粉黏滞特性,用配套软件 TWC 分析稻米糊化特性。RVA 谱特征值用峰值黏度、热浆黏度、最终黏度、崩解值(峰值黏度-热浆黏度)、消减值(最终黏度-峰值黏度)、峰值时间和糊化温度来表示。

## 1.4 数据统计与分析

采用 Microsoft Excel 2013 进行数据录入处理,采用 SPSS 20.0 进行数据统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 轻简化施肥条件下不同秸秆处理方式与施用外源有机物料互作对水稻产量及其构成因素的影响

表 3 显示,相同外源有机物料条件下,与秸秆离田相比,除 SWT 处理和 NT 处理外,秸秆还田的其他处理产量都显著高于秸秆离田的处理,其中秸秆还田条件下 YJ 处理产量最高,与 CK2 相比,YJ 处理显著提高了有效穗数、每穗粒数和千粒重。与 CK2 相比,在秸秆还田和秸秆离田条件下,施用外源有机物料的处理水稻产量均显著提高。秸秆腐解过程的高氮需求会引发与水稻的氮素竞争,限制了水稻对氮肥的充分吸收利用。这可能是秸秆还田条件下 SWT 处理产量低于秸秆离田模式的原因之一。与 CK1 相比,在秸秆还田和秸秆离田下,YJ 处理、NT 处理、SWT 处理都显著提高了产量。说明秸秆还田和施用外源有机物料可以提高水稻产量。

在相同外源有机物料条件下,秸秆还田处理相较秸秆离田处理的有效穗数差异不显著。进一步的分析结果表明,与 CK2 相比,无论是秸秆还田还是离田条件下,添加外源有机物料均能增加有效穗数。秸秆还田条件下各处理水稻有效穗数的大小为 YJ>NT>SWT>CK2>CK1,秸秆离田条件下各处理水稻有效穗数的大小为 YJ>SWT>NT>CK2>CK1。从每穗粒数上来看,与秸秆离田相比,施用相同外源有机物料条件下秸秆还田处理总体提高了水稻每穗粒数,其中,显著提高了 YJ 处理的水稻每穗粒数;对比 CK2,施用外源有机物料在 2 种条件下均表现出对每穗粒数的提升趋势。秸秆还田条件下,各处理结实率的大小为 CK1>YJ>CK2>SWT>NT;秸秆离田条件下各处理结实率的大小为 CK1>YJ>SWT>CK2>NT,两者均以 CK1 处理最高,YJ 处理次之,NT 处理最低。从千粒重来看,与 CK2 相比,YJ 处理显著提高千粒重。可见,秸秆还田条件下,施用外源有机物料显著提升了每穗粒数。表 4 显示,秸秆处理方式对水稻产量的影响显著,施用外源有机物料处理对水稻产量及其构成因素具有极显著影响,二者的交互作用对产量有极显著影响。

表 3 轻简化施肥条件下不同秸秆处理方式与施用外源有机物料互作对水稻产量及其构成因素的影响

Table 3 Effects of the interaction between straw and exogenous organic materials on rice yield and its components under simplified fertilization conditions

| 秸秆处理方式 | 施肥处理 | 产量(t/hm <sup>2</sup> ) | 有效穗数(×10 <sup>4</sup> 穗,1 hm <sup>2</sup> ) | 每穗粒数(个)        | 结实率(%)       | 千粒重(g)       |
|--------|------|------------------------|---------------------------------------------|----------------|--------------|--------------|
| 秸秆还田   | CK1  | 7.82±0.11f             | 262.83±3.99e                                | 153.70±4.47de  | 86.55±0.15a  | 22.85±0.01g  |
|        | CK2  | 7.86±0.08f             | 283.02±4.46cd                               | 154.33±3.08cde | 78.85±0.48bc | 23.29±0.02e  |
|        | YJ   | 9.11±0.13a             | 292.07±2.80ab                               | 165.78±2.84a   | 80.04±1.70b  | 23.97±0.02a  |
|        | NT   | 8.05±0.12de            | 291.09±3.70ab                               | 164.84±4.09ab  | 73.65±1.74e  | 23.20±0.03f  |
|        | SWT  | 8.16±0.09d             | 288.18±1.39bc                               | 166.25±6.15a   | 74.38±0.60de | 23.33±0.03de |
| 秸秆离田   | CK1  | 7.65±0.05g             | 266.24±0.66e                                | 148.54±1.11e   | 86.12±0.10a  | 22.72±0.01h  |
|        | CK2  | 7.57±0.09g             | 281.45±3.14d                                | 156.66±4.00cd  | 77.74±0.74c  | 23.35±0.03cd |
|        | YJ   | 8.55±0.04c             | 296.91±2.06a                                | 157.42±3.44bcd | 79.04±0.68bc | 23.85±0.03b  |
|        | NT   | 7.94±0.09ef            | 291.74±4.74ab                               | 161.61±3.22abc | 75.79±0.67d  | 23.23±0.02f  |
|        | SWT  | 8.72±0.06b             | 293.09±4.36ab                               | 165.32±4.25a   | 78.17±0.69c  | 23.39±0.02c  |

同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。CK1:常规施肥;CK2:只施缓释肥;YJ:增施有机肥;NT:增施木本泥炭;SWT:增施生物炭。

表 4 产量及其构成因素方差分析

Table 4 Analysis of variance for yield and its components

| 项目            | 产量 | 有效穗数 | 每穗粒数 | 结实率 | 千粒重 |
|---------------|----|------|------|-----|-----|
| 秸秆处理方式(A)     | *  | *    | ns   | ns  | ns  |
| 施用外源有机物料处理(B) | ** | **   | **   | **  | **  |
| A×B           | ** | ns   | ns   | **  | **  |

\*、\*\* 分别表示影响显著( $P<0.05$ )和影响极显著( $P<0.01$ );ns 表示无显著影响。A、B 分别为秸秆处理方式和施用外源有机物料处理;A×B 表示秸秆处理方式和施用外源有机物料处理的交互作用。

## 2.2 轻简化施肥条件下不同秸秆处理方式与施用外源有机物料互作对水稻茎蘖数及其成穗率的影响

由表 5 可知,施用相同外源有机物料条件下,秸秆还田条件下,分蘖期、拔节期的水稻茎蘖数较秸秆离田条件下整体降低。无论秸秆还田、秸秆离田或添加外

源有机物料,水稻茎蘖数均呈现单峰变化模式,于拔节期达到峰值,且各处理间趋势高度相似。在分蘖期和拔节期,秸秆还田处理的水稻茎蘖数整体上低于秸秆离田处理。这种差异可能与秸秆还田条件下秸秆腐解过程中的高氮需求限制了水稻对氮肥的获取有关。

在秸秆还田条件下,与 CK2 相比,施用外源有机物料处理的水稻分蘖期、拔节期、抽穗期茎蘖数均显著提高;在秸秆离田条件下,与 CK2 相比,施用外源有机物料的处理水稻分蘖期、拔节期、抽穗期茎蘖数均显著提高。可见施用外源有机物料可以显著提高前期水稻茎蘖数,保证穗数足够。表 6 显示,不同秸秆处理方式与施用外源有机物料处理对各生育期的茎蘖数有显著或极显著影响,对成穗率有显著或极显著影响。

表 5 轻简化施肥条件下不同秸秆处理方式与施用外源有机物料互作对水稻茎蘖动态及其成穗率的影响

Table 5 Effects of the interaction between straw and exogenous organic materials on the dynamic tillering and panicle formation rate of rice under simplified fertilization conditions

| 秸秆处理方式 | 施肥处理 | 分蘖期茎蘖数(×10 <sup>4</sup> 个,1 hm <sup>2</sup> ) | 拔节期茎蘖数(×10 <sup>4</sup> 个,1 hm <sup>2</sup> ) | 抽穗期茎蘖数(×10 <sup>4</sup> 个,1 hm <sup>2</sup> ) | 成熟期茎蘖数(×10 <sup>4</sup> 个,1 hm <sup>2</sup> ) | 成穗率(%)       |
|--------|------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------|
| 秸秆还田   | CK1  | 234.94±2.92e                                  | 310.80±3.13f                                  | 282.18±1.27d                                  | 262.83±3.99e                                  | 84.56±0.79c  |
|        | CK2  | 224.08±7.16f                                  | 306.36±3.54f                                  | 305.84±4.82c                                  | 283.02±4.46cd                                 | 92.40±2.42a  |
|        | YJ   | 245.31±1.91d                                  | 319.68±3.48e                                  | 315.61±3.02ab                                 | 292.07±2.80ab                                 | 91.37±1.47a  |
|        | NT   | 252.81±3.21bc                                 | 348.54±4.98b                                  | 314.56±4.00b                                  | 291.09±3.70ab                                 | 83.52±0.74cd |
|        | SWT  | 245.97±2.18cd                                 | 328.56±1.36d                                  | 311.42±1.50b                                  | 288.18±1.39bc                                 | 87.71±0.44b  |
| 秸秆离田   | CK1  | 246.63±3.80cd                                 | 321.90±3.11e                                  | 285.14±0.61d                                  | 266.24±0.66e                                  | 82.72±1.00cd |
|        | CK2  | 241.28±4.63de                                 | 319.68±3.16e                                  | 304.14±3.39c                                  | 281.45±3.14d                                  | 88.05±1.83b  |
|        | YJ   | 268.42±4.09a                                  | 334.94±4.47c                                  | 320.85±2.23a                                  | 296.91±2.06a                                  | 88.65±0.76b  |
|        | NT   | 252.94±2.04bc                                 | 357.42±3.24a                                  | 315.26±5.12ab                                 | 291.74±4.74ab                                 | 81.64±1.91d  |
|        | SWT  | 256.45±2.45b                                  | 330.78±1.45cd                                 | 316.72±4.71ab                                 | 293.09±4.36ab                                 | 88.61±1.65b  |

同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。CK1:常规施肥;CK2:只施缓释肥;YJ:增施有机肥;NT:增施木本泥炭;SWT:增施生物炭。

表 6 茎蘖动态及其成穗率方差分析

Table 6 Analysis of variance for the dynamic tillering and panicle formation rate

| 项目            | 分蘖期茎蘖数 | 拔节期茎蘖数 | 抽穗期茎蘖数 | 成熟期茎蘖数 | 成穗率 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|-----|
| 秸秆处理方式(A)     | **     | **     | *      | *      | *   |
| 施用外源有机物料处理(B) | **     | **     | **     | **     | **  |
| A×B           | **     | ns     | **     | ns     | ns  |

\*、\*\* 分别表示影响显著( $P<0.05$ )和影响极显著( $P<0.01$ );ns 表示无显著影响。A、B 分别为秸秆处理方式和施用外源有机物料处理;A×B 表示秸秆处理方式和施用外源有机物料处理的交互作用。

2.3 轻简化施肥条件下不同秸秆处理方式与施用外源有机物料互作对水稻叶面积指数的影响

由表 7 可知,水稻叶面积指数在整个生育期内呈现先升后降的趋势,并于抽穗期达到峰值。在施用相同外源有机物料的情况下,相较于秸秆离田处理,秸秆还田处理水稻分蘖期和拔节期 SWT 处理叶面积指数显著降低,而在水稻抽穗期和成熟期 YJ 处理叶面积指数显著提高。说明秸秆还田会降低前期叶面积指数,提高后期叶面积指数。

与 CK2 相比,施用外源有机物料处理对水稻叶面积指数的影响因秸秆管理方式而异:秸秆还田条件下 YJ 处理在 4 个关键生育期均能提升叶面积指数,其中分蘖期与抽穗期达到显著水平;NT 处理水稻叶面积指数在分蘖期显著增加;秸秆离田条件下,YJ 处理、NT 处理、SWT 处理在分蘖期均显著提高水稻叶面积指数。说明无论秸秆还田处理还是秸秆离田处理,施用外源有机物料,均能促进叶面积指数增长。

表 7 轻简化施肥条件下不同秸秆处理方式与施用外源有机物料互作对水稻叶面积指数的影响

Table 7 Effects of the interaction between straw and exogenous organic materials on rice leaf area index under simplified fertilization conditions

| 秸秆处理方式 | 施肥处理 | 叶面积指数        |              |             |              |
|--------|------|--------------|--------------|-------------|--------------|
|        |      | 分蘖期          | 拔节期          | 抽穗期         | 成熟期          |
| 秸秆还田   | CK1  | 3.34±0.09ab  | 5.64±1.03a   | 6.16±0.28de | 5.63±0.58ab  |
|        | CK2  | 2.67±0.08f   | 3.59±0.52cd  | 7.06±0.26bc | 5.69±0.03a   |
|        | YJ   | 3.16±0.06bcd | 4.32±0.32bc  | 7.87±0.33a  | 5.70±0.07a   |
|        | NT   | 3.01±0.06de  | 3.85±0.21bcd | 7.21±0.05b  | 5.10±0.69abc |
|        | SWT  | 2.84±0.09ef  | 3.26±0.19d   | 7.47±0.26ab | 5.01±0.18abc |
| 秸秆离田   | CK1  | 3.52±0.10a   | 5.81±0.27a   | 6.00±0.06e  | 5.20±0.49abc |
|        | CK2  | 2.81±0.08f   | 4.28±0.27bc  | 6.63±0.12cd | 4.81±0.09bc  |
|        | YJ   | 3.23±0.05bc  | 4.58±0.25b   | 7.14±0.08bc | 4.84±0.48bc  |
|        | NT   | 3.15±0.10bcd | 4.30±0.06bc  | 7.06±0.55bc | 4.73±0.41c   |
|        | SWT  | 3.11±0.05cd  | 4.32±0.32bc  | 7.33±0.06b  | 4.93±0.28abc |

同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。CK1:常规施肥;CK2:只施缓释肥;YJ:增施有机肥;NT:增施木本泥炭;SWT:增施生物炭。

由表 8 可知,秸秆不同处理方式显著或极显著影响水稻拔节期至成熟期的叶面积指数;施用外源有机物料则在分蘖期至抽穗期极显著影响水稻叶面

积指数。然而,两者间的交互效应对水稻叶面积指数无显著影响。

表 8 叶面积指数方差分析

Table 8 Analysis of variance for leaf area index

| 项目            | 分蘖期叶面积指数 | 拔节期叶面积指数 | 抽穗期叶面积指数 | 成熟期叶面积指数 |
|---------------|----------|----------|----------|----------|
| 秸秆处理方式(A)     | ns       | **       | *        | **       |
| 施用外源有机物料处理(B) | **       | **       | **       | ns       |
| A×B           | ns       | ns       | ns       | ns       |

\*、\*\* 分别表示影响显著( $P<0.05$ )和影响极显著( $P<0.01$ );ns 表示无显著影响。A、B 分别为秸秆处理方式和施用外源有机物料处理;A×B 表示秸秆处理方式和施用外源有机物料处理的交互作用。

### 2.4 轻简化施肥条件下不同秸秆处理方式与施用外源有机物料互作对水稻干物质积累及齐穗后干物质转运的影响

由表 9 可知,在施用相同外源有机物料条件下,秸秆还田相较秸秆离田处理对干物质积累的影响呈现阶段性差异:在分蘖期和拔节期表现为总体显著抑制,而在齐穗期和成熟期则转为显著促进(除 YJ 处理外)。此外,秸秆还田显著提升了齐穗后的干物质积累量(除 SWT 处理外),还显著提升了 YJ 处理的齐穗后的干物质转运比例及转运贡献率。

秸秆还田条件下,与 CK2 相比,施用外源有机物料显著增加分蘖期和成熟期水稻干物质积累总量;与 CK2 相比,YJ 处理、NT 处理显著提高了齐穗后干物质积累量。秸秆离田条件下,与 CK2 相比,YJ 处理在分蘖期、拔节期、齐穗期和成熟期均显著提高了干物质积累总量。秸秆还田在水稻生育前期抑制干物质积累,而在中后期促进积累并增强转运;外源有机物料则于全生育期持续提升干物质积累总量。

表 9 轻简化施肥条件下不同秸秆处理方式与施用外源有机物料互作对水稻干物质积累及齐穗后干物质转运的影响  
Table 9 Effects of the interaction between straw and exogenous organic materials on dry matter accumulation and post-heading dry matter translocation in rice under simplified fertilization conditions

| 秸秆处理方式 | 施肥处理 | 干物质积累总量(t/hm <sup>2</sup> ) |              |               |               | 齐穗后干物质                  |               |               |
|--------|------|-----------------------------|--------------|---------------|---------------|-------------------------|---------------|---------------|
|        |      | 分蘖期                         | 拔节期          | 齐穗期           | 成熟期           | 积累量(t/hm <sup>2</sup> ) | 转运比例(%)       | 转运贡献率(%)      |
| 秸秆还田   | CK1  | 2.63±0.17b                  | 4.18±0.04abc | 13.34±0.86cde | 15.57±0.46bcd | 2.22±0.42bc             | 14.34±3.12bc  | 29.07±7.03ab  |
|        | CK2  | 0.77±0.14h                  | 3.26±0.13de  | 13.70±0.59bcd | 16.52±0.38bc  | 2.82±0.46b              | 17.10±2.75ab  | 34.42±5.45ab  |
|        | YJ   | 1.18±0.09fg                 | 3.64±0.31cde | 15.10±0.35a   | 19.13±0.40a   | 4.03±0.60a              | 21.01±2.76a   | 40.65±5.56a   |
|        | NT   | 1.18±0.01fg                 | 3.71±0.13bcd | 14.24±0.27abc | 18.15±0.40a   | 3.91±0.18a              | 21.56±0.63a   | 40.42±2.01a   |
|        | SWT  | 1.08±0.03g                  | 3.07±0.27e   | 14.96±0.15a   | 18.01±0.19a   | 3.05±0.20ab             | 16.93±0.98ab  | 32.83±1.36ab  |
| 秸秆离田   | CK1  | 2.92±0.02a                  | 4.74±0.16a   | 12.62±0.63e   | 13.70±0.79e   | 1.08±0.52d              | 7.81±3.61d    | 15.80±7.77c   |
|        | CK2  | 1.32±0.22ef                 | 3.49±0.38de  | 12.61±0.08e   | 14.66±0.80de  | 2.04±0.73bcd            | 13.78±4.20bc  | 29.55±11.19ab |
|        | YJ   | 1.80±0.13c                  | 4.45±0.14a   | 14.47±0.28ab  | 16.20±0.11bc  | 1.73±0.17cd             | 10.70±1.11cd  | 23.21±2.63bc  |
|        | NT   | 1.54±0.02d                  | 4.30±0.47ab  | 12.94±0.16de  | 15.40±0.43cd  | 2.46±0.57bc             | 15.95±3.26abc | 33.35±6.94ab  |
|        | SWT  | 1.44±0.01de                 | 4.30±0.25ab  | 13.71±0.26bcd | 16.60±0.79b   | 2.89±0.95b              | 17.23±4.82ab  | 35.13±8.72ab  |

同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。CK1:常规施肥;CK2:只施缓释肥;YJ:增施有机肥;NT:增施木本泥炭;SWT:增施生物炭。

由表 10 可知,秸秆处理方式和外源有机物料均能独立地显著或极显著调控水稻干物质积累总量及齐穗后干物质向籽粒的转运效率。两者的交互效应对拔节期干物质积累总量表现出显著影响。

表 10 干物质积累及齐穗后干物质转运方差分析  
Table 10 Analysis of variance for dry matter accumulation and post-heading dry matter translocation

| 项目            | 干物质积累总量 |     |     |     | 齐穗后干物质转运 |      |       |
|---------------|---------|-----|-----|-----|----------|------|-------|
|               | 分蘖期     | 拔节期 | 抽穗期 | 成熟期 | 积累量      | 转运比例 | 转运贡献率 |
| 秸秆处理方式(A)     | **      | *   | *   | **  | **       | **   | **    |
| 施用外源有机物料处理(B) | **      | **  | **  | **  | **       | *    | *     |
| A×B           | ns      | *   | ns  | ns  | ns       | ns   | ns    |

\*,\*\* 分别表示影响显著( $P<0.05$ )和影响极显著( $P<0.01$ );ns 表示无显著影响。A、B 分别为秸秆处理方式和施用外源有机物料处理;A×B 表示秸秆处理方式和施用外源有机物料处理的交互作用。

### 2.5 轻简化施肥条件下不同秸秆处理方式与施用外源有机物料互作对水稻 SPAD 值的影响

由表 11 可知,施用相同外源有机物料条件下,秸秆还田处理的水稻拔节期、抽穗期和成熟期 SPAD 值与秸秆离田差异不显著。从拔节期至成熟

期,SPAD 值呈单峰变化趋势(先升后降)。具体而言,秸秆还田在生育前期降低了 SPAD 值,而在后期则有所提高,但差异并未达到显著水平。秸秆还田条件下,拔节期水稻 SPAD 值的大小为CK1>YJ>NT>SWT=CK2,抽穗期水稻 SPAD 值的大小为YJ>

NT>SWT>CK2>CK1,成熟期水稻 SPAD 值的大小为 SWT>YJ>NT=CK2>CK1。秸秆离田条件下变化趋势同秸秆还田基本一致。

表 11 轻简化施肥条件下不同秸秆处理方式与施用外源有机物料互作对水稻 SPAD 值的影响

Table 11 Effects of interaction between straw and exogenous organic materials on rice SPAD values under simplified fertilization conditions

| 秸秆处理方式 | 施肥处理 | SPAD 值        |               |             |
|--------|------|---------------|---------------|-------------|
|        |      | 拔节期           | 抽穗期           | 成熟期         |
| 秸秆还田   | CK1  | 43.80±1.01a   | 44.90±0.55e   | 36.27±0.51b |
|        | CK2  | 41.00±0.54c   | 46.40±0.96cd  | 40.50±0.86a |
|        | YJ   | 42.63±0.54abc | 48.23±0.54a   | 40.77±0.47a |
|        | NT   | 41.87±0.90bc  | 47.80±0.54ab  | 40.50±0.62a |
|        | SWT  | 41.00±0.51c   | 47.30±0.56abc | 41.13±0.34a |
| 秸秆离田   | CK1  | 43.90±0.81a   | 46.03±0.57d   | 36.03±0.18b |
|        | CK2  | 41.63±1.11bc  | 46.57±0.65cd  | 40.20±0.44a |
|        | YJ   | 42.77±0.32ab  | 47.93±0.31ab  | 40.63±0.46a |
|        | NT   | 42.23±0.21abc | 47.57±0.48ab  | 40.23±0.57a |
|        | SWT  | 41.07±0.67bc  | 47.20±0.41bc  | 40.87±0.38a |

同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。CK1:常规施肥;CK2:只施缓释肥;YJ:增施有机肥;NT:增施木本泥炭;SWT:增施生物炭。

秸秆还田条件下,与 CK1 相比,施用外源有机物料的处理拔节期水稻 SPAD 值降低,其中 NT 处理和 SWT 处理达到显著水平,抽穗期水稻 SPAD 值显著提高。秸秆离田条件下变化趋势同秸秆还田基本一致。与 CK2 相比,无论是秸秆还田还是离田条件下,施用外源有机物料均可提高 SPAD 值;其中 YJ 处理显著提高了抽穗期 SPAD 值。说明外源有

机物料可以提高水稻 SPAD 值,秸秆还田由于前期“争氮”现象导致拔节期 SPAD 值降低,但是抽穗后会提高。表 12 显示,秸秆处理方式仅显著调控抽穗期 SPAD 值,而施用外源有机物料处理则在整个生育期极显著调控 SPAD 值。秸秆处理与外源有机物料的协同作用在拔节期、抽穗期和成熟期均不显著。

表 12 叶绿素相对含量方差分析

Table 12 Variance analysis of relative chlorophyll content

| 项目            | 拔节期 SPAD 值 | 抽穗期 SPAD 值 | 成熟期 SPAD 值 |
|---------------|------------|------------|------------|
| 秸秆处理方式(A)     | ns         | *          | ns         |
| 施用外源有机物料处理(B) | **         | **         | **         |
| A×B           | ns         | ns         | ns         |

\*、\*\* 分别表示影响显著 ( $P<0.05$ ) 和影响极显著 ( $P<0.01$ );ns 表示无显著影响。A、B 分别为秸秆处理方式和施用外源有机物料处理;A×B 表示秸秆处理方式和施用外源有机物料处理的交互作用。

## 2.6 轻简化施肥条件下不同秸秆处理方式与施用外源有机物料互作对稻米加工、外观品质的影响

由表 13 可知,施用相同外源有机物料条件下,秸秆还田处理稻米糙米率、精米率、整精米率均显著高于秸秆离田,垩白粒率和垩白度均低于秸秆离田,其中 YJ 处理和 SWT 处理稻米垩白粒率达到显著水平。相较于秸秆离田处理,秸秆还田处理使稻米糙米率、精米率和整精米率获得显著提升,同时显著降低了 YJ 处理和 SWT 处理稻米垩白粒率。长宽比虽有所提高,但除 YJ 处理外,其他处理均未达到显著水平。这表明秸秆还田处理较秸秆离田处理优化了稻米的碾磨品质(加工品质),并改善了其外观品质。

表 13 轻简化施肥条件下不同秸秆处理方式与施用外源有机物料互作对稻米加工、外观品质的影响

Table 13 Effects of straw and exogenous organic materials interaction on rice processing and appearance quality under simplified fertilization conditions

| 秸秆处理方式 | 施肥处理 | 糙米率(%)        | 精米率(%)       | 整精米率(%)       | 长宽比         | 垩白粒率(%)       | 垩白度(%)        |
|--------|------|---------------|--------------|---------------|-------------|---------------|---------------|
| 秸秆还田   | CK1  | 88.03±0.53c   | 70.83±2.39de | 60.57±0.92bcd | 1.72±0.03ab | 40.42±4.69f   | 10.35±3.11c   |
|        | CK2  | 88.73±0.50bc  | 72.60±1.43cd | 61.63±2.70bc  | 1.74±0.01ab | 53.70±0.43abc | 11.90±2.75ab  |
|        | YJ   | 90.13±0.53ab  | 76.30±0.21ab | 63.83±0.42ab  | 1.76±0.014a | 44.03±0.16ef  | 10.33±0.67c   |
|        | NT   | 89.30±0.45abc | 74.33±0.39bc | 63.43±0.96ab  | 1.73±0.01ab | 45.66±0.47def | 10.34±0.68c   |
|        | SWT  | 90.70±0.26a   | 76.70±0.19a  | 65.33±1.49a   | 1.75±0.04ab | 48.15±0.19cde | 10.82±0.64bc  |
| 秸秆离田   | CK1  | 83.63±0.59ef  | 67.98±0.13f  | 53.67±0.83e   | 1.69±0.03b  | 45.73±6.30def | 11.51±3.25abc |
|        | CK2  | 83.28±0.08ef  | 67.71±0.71f  | 57.80±2.58d   | 1.73±0.03ab | 59.78±1.41a   | 12.51±0.97a   |
|        | YJ   | 85.52±0.18d   | 70.76±0.48de | 58.95±2.16cd  | 1.70±0.03b  | 51.90±0.44bcd | 11.19±0.99bc  |
|        | NT   | 84.77±0.40de  | 69.60±1.67ef | 58.84±1.99cd  | 1.71±0.02ab | 52.38±1.62bcd | 11.47±0.93abc |
|        | SWT  | 82.55±1.02f   | 70.64±0.20de | 57.76±2.00d   | 1.73±0.01ab | 56.78±1.91ab  | 11.07±1.88bc  |

同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。CK1:常规施肥;CK2:只施缓释肥;YJ:增施有机肥;NT:增施木本泥炭;SWT:增施生物炭。

与 CK1 相比,施用外源有机物料整体上提高了糙米率、精米率。与 CK2 相比,秸秆还田条件下施用外源有机物料整体上可显著提升精米率,同时降低垩白粒率与垩白度。在秸秆离田条件下,除 NT 处理外,添加外源有机物料同样整体上显著提高了精米率并显著降低了垩白度。说明施用外源有机物料可以显著提高稻米加工品质和外观品质。

表 14 加工、外观品质方差分析

Table 14 Analysis of variance for processing and appearance quality

| 项目            | 糙米率 | 精米率 | 整精米率 | 长宽比 | 垩白粒率 | 垩白度 |
|---------------|-----|-----|------|-----|------|-----|
| 秸秆处理方式(A)     | **  | **  | **   | ns  | *    | ns  |
| 施用外源有机物料处理(B) | **  | **  | **   | ns  | **   | **  |
| A×B           | **  | ns  | ns   | ns  | ns   | ns  |

\*、\*\* 分别表示影响显著( $P<0.05$ )和影响极显著( $P<0.01$ );ns 表示无显著影响。A、B 分别为秸秆处理方式和施用外源有机物料处理;A×B 表示秸秆处理方式和施用外源有机物料处理的交互作用。

2.7 轻简化施肥条件下不同秸秆处理方式与施用外源有机物料互作对稻米蒸煮食味、营养品质的影响

由表 15 可知,在施用相同外源有机物料条件下,相较于秸秆离田,秸秆还田能够提升作物的蛋白质含量,同时降低直链淀粉含量。秸秆还田正是通过增加蛋白质含量、降低直链淀粉含量来优化蒸煮食味品质的。

秸秆还田条件下,与 CK2 相比,YJ 处理、NT 处理和 SWT 处理整体上增加了蛋白质含量和食味值,

由表 14 可知,秸秆处理方式显著或极显著地调控了稻米糙米率、精米率、整精米率及垩白粒率;施用外源有机物料则极显著影响稻米糙米率、精米率、整精米率、垩白粒率与垩白度;秸秆处理与外源有机物料的交互作用仅对糙米率产生极显著效应,对其余指标均无显著影响。

整体上降低了硬度。可见施用外源有机物料有助于提升稻米蛋白质含量、改善外观、增强平衡度,同时降低硬度。

由表 16 可知,秸秆处理方式显著或极显著地调控了稻米蛋白质含量、直链淀粉含量、外观、硬度、平衡度及食味值;施用外源有机物料对稻米蛋白质含量、直链淀粉含量、外观、硬度、黏度、平衡度及食味值均产生了极显著影响;秸秆处理与外源有机物料的交互作用则显著或极显著作用于蛋白质含量、黏度、平衡度和食味值。

表 15 轻简化施肥条件下不同秸秆处理方式与施用外源有机物料互作对稻米蒸煮食味、营养品质的影响

Table 15 Effects of interaction between straw and exogenous organic materials on rice cooking and eating quality and nutritional quality under simplified fertilization conditions

| 秸秆处理方式 | 施肥处理 | 蛋白质含量 (%)   | 直链淀粉含量 (%)   | 外观          | 硬度           | 黏度          | 平衡度          | 食味值           |
|--------|------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|---------------|
| 秸秆还田   | CK1  | 8.23±0.12c  | 15.40±0.15bc | 8.47±0.51a  | 5.70±0.31e   | 7.70±1.01a  | 8.00±0.76a   | 79.60±5.30a   |
|        | CK2  | 8.40±0.10c  | 14.77±0.10cd | 5.07±0.84d  | 7.50±0.47ab  | 4.00±0.61c  | 4.20±0.78de  | 55.40±5.05de  |
|        | YJ   | 9.20±0.10a  | 14.13±0.52d  | 5.40±0.36cd | 7.00±0.29bc  | 4.30±0.23bc | 4.80±0.38cde | 58.70±2.46cde |
|        | NT   | 8.73±0.15b  | 14.23±0.66d  | 5.93±0.83bc | 6.90±0.38cd  | 4.70±0.59bc | 5.10±0.74bcd | 61.30±4.59bcd |
|        | SWT  | 8.73±0.23b  | 13.90±0.13d  | 6.07±0.21bc | 6.90±0.10cd  | 5.10±0.31b  | 5.40±0.28bc  | 62.90±1.46bc  |
| 秸秆离田   | CK1  | 7.33±0.04e  | 16.73±0.25a  | 6.50±0.10b  | 6.50±0.06d   | 5.20±0.06b  | 5.90±0.06b   | 65.30±0.36b   |
|        | CK2  | 7.27±0.06e  | 16.53±0.06a  | 4.63±0.12d  | 7.60±0.06a   | 3.60±0.26c  | 3.80±0.21e   | 53.00±1.25e   |
|        | YJ   | 7.77±0.14d  | 16.13±0.04ab | 4.97±0.06d  | 7.10±0.15bc  | 4.40±0.31bc | 4.50±0.25cde | 57.60±1.71cde |
|        | NT   | 7.50±0.19de | 16.27±0.33ab | 5.33±0.23cd | 7.20±0.10abc | 4.40±0.12bc | 5.00±0.12bcd | 58.00±1.10cde |
|        | SWT  | 7.63±0.13d  | 16.23±0.06ab | 5.33±0.31cd | 7.40±0.30ab  | 4.40±0.40bc | 4.60±0.45cde | 57.70±2.93cde |

同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。CK1:常规施肥;CK2:只施缓释肥;YJ:增施有机肥;NT:增施木本泥炭;SWT:增施生物炭。

表 16 蒸煮食味品质和营养品质方差分析

Table 16 Analysis of variance for cooking and eating quality and nutritional quality

| 项目            | 蛋白质含量 | 直链淀粉含量 | 外观 | 硬度 | 黏度 | 平衡度 | 食味值 |
|---------------|-------|--------|----|----|----|-----|-----|
| 秸秆处理方式(A)     | **    | *      | ** | ** | ns | *   | *   |
| 施用外源有机物料处理(B) | **    | **     | ** | ** | ** | **  | **  |
| A×B           | *     | ns     | ns | ns | ** | *   | *   |

\*、\*\* 分别表示影响显著( $P<0.05$ )和影响极显著( $P<0.01$ );ns 表示无显著影响。A、B 分别为秸秆处理方式和施用外源有机物料处理;A×B 表示秸秆处理方式和施用外源有机物料处理的交互作用。

## 2.8 轻简化施肥条件下不同秸秆处理方式与施用外源有机物料互作对稻米糊化特性的影响

由表 17 可知,施用相同外源有机物料条件下,秸秆还田的稻米峰值黏度、热浆黏度、崩解值、最终黏度均大于秸秆离田处理。秸秆还田显著提高了峰值黏度、崩解值,对糊化温度无显著影响。

秸秆还田条件下,与 CK2 相比,施用外源有机物料整体上提高了峰值黏度、崩解值和最终黏度;降低了糊化温度。秸秆离田条件下,与 CK2 相比,NT 处理和 SWT 处理稻米峰值黏度、崩解值和最终黏度

整体上显著提高,施用外源有机物料处理的糊化温度显著降低。由此说明外源有机物料有助于提升峰值黏度、热浆黏度和崩解值,降低糊化温度。

由表 18 可知,秸秆处理方式极显著影响峰值黏度、热浆黏度、崩解值及最终黏度。同时,施用外源有机物料对各黏度指标均产生了极显著的影响。此外,秸秆处理方式与施用外源有机物料的交互作用对最终黏度、消减值以及峰值时间亦表现出极显著的调控效应。

表 17 轻简化施肥条件下不同秸秆处理方式与施用外源有机物料互作对稻米糊化特性的影响

Table 17 Effects of the interaction between straw and exogenous organic materials on the gelatinization characteristics of rice under simplified fertilization conditions

| 秸秆处理方式 | 施肥处理 | 峰值黏度<br>(cP)  | 热浆黏度<br>(cP) | 崩解值<br>(cP) | 最终黏度<br>(cP)   | 消减值<br>(cP)   | 峰值时间<br>(min) | 糊化温度<br>(℃) |
|--------|------|---------------|--------------|-------------|----------------|---------------|---------------|-------------|
| 秸秆还田   | CK1  | 1 674.3±29.7a | 778.0±2.7a   | 896.3±27.6a | 1 339.1±18.4a  | -335.3±48.0b  | 4.9±0.2cd     | 79.0±0.9ab  |
|        | CK2  | 1 451.3±13.5d | 711.0±8.9bc  | 740.3±9.5e  | 1 126.2±4.6c   | -325.0±16.1b  | 5.0±0.1c      | 79.5±0.2a   |
|        | YJ   | 1 497.0±18.7c | 740.0±13.1b  | 757.0±6.0de | 1 232.3±14.3b  | -264.3±31.8a  | 5.2±0.1abc    | 77.8±0.6c   |
|        | NT   | 1 494.3±10.1c | 724.7±8.5b   | 769.7±8.7cd | 1 204.9±16.1b  | -289.7±10.7ab | 5.1±0.1bc     | 78.2±0.4bc  |
|        | SWT  | 1 521.0±6.9bc | 734.0±5.0b   | 787.0±8.5bc | 1 226.6±15.2b  | -294.3±18.7ab | 5.3±0.1ab     | 77.8±0.4c   |
| 秸秆离田   | CK1  | 1 546.0±30.5b | 736.7±5.1b   | 809.3±19.9b | 1 100.3±43.8cd | -446.0±23.9c  | 4.7±0.1d      | 78.2±0.5bc  |
|        | CK2  | 1 289.0±8.7g  | 641.3±3.5e   | 647.7±11.9h | 981.0±3.9f     | -308.3±12.7ab | 5.1±0.1abc    | 79.6±0.4a   |
|        | YJ   | 1 317.0±8.5fg | 657.3±5.9de  | 659.7±4.9gh | 1 015.1±12.4ef | -302.0±11.5ab | 4.9±0.1cd     | 78.3±0.2bc  |
|        | NT   | 1 360.3±9.1e  | 682.7±4.0cd  | 677.7±5.9fg | 1 061.6±4.5de  | -298.7±13.8ab | 5.4±0.1a      | 78.6±0.5bc  |
|        | SWT  | 1 344.0±4.6ef | 658.7±10.7de | 685.3±9.3f  | 1 040.6±6.2e   | -303.3±4.7ab  | 5.2±0.1abc    | 78.4±0.3bc  |

同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。CK1:常规施肥;CK2:只施缓释肥;YJ:增施有机肥;NT:增施木本泥炭;SWT:增施生物炭。

表 18 稻米糊化特性方差分析

Table 18 Analysis of variance for rice gelatinization characteristics

| 项目            | 峰值黏度 | 热浆黏度 | 崩解值 | 最终黏度 | 消减值 | 峰值时间 | 糊化温度 |
|---------------|------|------|-----|------|-----|------|------|
| 秸秆处理方式(A)     | **   | **   | **  | **   | ns  | ns   | ns   |
| 施用外源有机物料处理(B) | **   | **   | **  | **   | **  | **   | **   |
| A×B           | ns   | ns   | ns  | **   | **  | **   | ns   |

\*、\*\* 分别表示影响显著( $P<0.05$ )和影响极显著( $P<0.01$ );ns 表示无显著影响。A、B 分别为秸秆处理方式和施用外源有机物料处理;A×B 表示秸秆处理方式和施用外源有机物料处理的交互作用。

### 3 讨论

#### 3.1 轻简化施肥条件下秸秆与施用外源有机物料交互对水稻产量形成及其构成因素的影响

前人关于秸秆处理方式和施用外源有机物料对水稻产量形成的影响进行了大量研究, 研究结果显示, 秸秆还田处理下的水稻产量显著高于秸秆离田处理, 增产幅度达 5.5% ~ 10.0%<sup>[15]</sup>。但也有秸秆还田后水稻减产的情况<sup>[16-17]</sup>。秸秆还田后, 初期秸秆分解过程会消耗大量的土壤氮素, 进而抑制水稻生长前期的茎蘖形成和干物质积累<sup>[18-20]</sup>。然而, 随着水稻生育期推进及气温升高, 秸秆还田的正面效果于生长后期得以显现。本研究中秸秆还田效果与之一致, 在秸秆还田模式下, YJ 处理的水稻产量最高; 秸秆离田时, SWT 处理的产量更高。杨志臣等<sup>[21]</sup>研究发现, 与仅施用化肥相比, 长期化肥与外源有机物配施可以显著提高水稻产量。沈舟兵等<sup>[22]</sup>的研究结果表明, 化肥配施有机肥不仅可以提高土壤养分含量还可以增加水稻产量。曾婷婷等<sup>[23]</sup>的研究结果也表明了外源有机物的添加与仅施用化肥相比, 小麦产量会有显著提高。施用外源有机物料是提高土壤肥力和增加作物产量的重要措施<sup>[24]</sup>。前人长期定位试验研究结果表明, 增施有机物料可显著提升作物产量<sup>[25]</sup>。本研究发现, 在施缓释肥基础上增施外源有机物料, 整体上可协同促进水稻产量、有效穗数、每穗粒数和千粒重的显著提升。

#### 3.2 轻简化施肥条件下秸秆与施用外源有机物料交互对水稻农艺性状的影响

张洪熙等<sup>[9]</sup>的研究结果表明, 秸秆全量还田会导致孕穗前水稻群体茎蘖数显著下降; 杜康等<sup>[26]</sup>研究发现, 小麦秸秆全量还田减少了水稻茎蘖数、株高和干物质积累量; 郝建华等<sup>[27]</sup>的研究结果显示, 秸秆还田处理相较于秸秆离田处理, 会导致水稻在拔节前的茎蘖数、叶面积指数、干物质积累量都有所减少。唐志敏等<sup>[28]</sup>的研究结果表明秸秆还田有助于植物扩大气孔开度, 增强蒸腾作用, 同时改善叶肉细胞的 CO<sub>2</sub> 供应, 进而提升叶片的光合效率。王子阳等<sup>[29]</sup>认为, 秸秆还田在水稻抽穗后 20 d 叶片 SPAD 值依旧保持较高水平。本研究结果与之一致, 与秸秆离田处理相比, 秸秆还田处

理整体上显著降低了分蘖期和拔节期的茎蘖数, 对水稻生长存在暂时抑制效应。随着生育期推进, 秸秆腐解养分释放并被吸收, 叶面积指数显著增加, 光合效率提高, 地上部干物质加速积累, 最终促成产量提升。

杨胜玲等<sup>[30]</sup>的研究结果表明, 有机肥与无机肥配施可改善水稻茎蘖数、叶面积指数、SPAD 值等农艺性状, 促进水稻产量的提高。本研究发现, 相较于 CK2, 增施外源有机物料有效促进了水稻茎蘖数的增加并抑制了无效分蘖, 进而提高了叶面积指数。此外, 与 CK2 相比, YJ 处理在整个生育期均维持了较高的叶片 SPAD 值, 其中抽穗期水稻叶片 SPAD 值显著高于 CK2。这可能是由于外源有机物料主要通过改良土壤理化性质, 优化根系生长环境并调控植株群体结构, 进而增强水稻叶面积指数与叶片光合生产力, 最终充分满足籽粒灌浆营养需求, 实现产量提升。

#### 3.3 轻简化施肥条件下秸秆与施用外源有机物料交互对水稻干物质积累及其转运的影响

水稻干物质积累是其产量及品质形成的物质基础, 籽粒灌浆充实度与干物质积累、分配、转运之间的合理协调密切相关<sup>[31-32]</sup>。

大量研究结果表明, 秸秆还田条件下水稻生育前期的干物质积累量普遍低于秸秆离田<sup>[33-35]</sup>。秸秆还田促使土壤有机酸等抑制性物质累积, 同时微生物分解过程中产生固氮需求, 诱发秸秆与植株间的氮素竞争效应, 进而限制水稻生育前期的干物质累积<sup>[36]</sup>。叶文培等<sup>[37]</sup>研究发现, 秸秆还田可以提高水稻地上部干物质积累量, 使水稻产量显著增加 10.0% ~ 12.9%。刘鸿飞<sup>[38]</sup>的研究结果表明, 秸秆还田能有效促进水稻干物质积累, 不仅有助于抽穗期植株发育, 还能维持较高的群体生长速率, 从而显著提升齐穗期后的干物质积累量。本研究结果与之相似, 在施用相同外源有机物料条件下, 秸秆还田处理水稻生育期前期的干物质积累量显著低于秸秆离田处理。然而, 秸秆还田条件下, 伴随秸秆腐解进程的推进, 氮素被释放, 水稻成熟期的干物质积累量均显著高于秸秆离田处理。

研究结果表明, 水稻在开花期至成熟期营养器官的贮藏物质是花后籽粒营养的重要来源<sup>[32]</sup>。唐海明等<sup>[39]</sup>研究发现, 有机肥配施化肥能有效促

进水稻各器官干物质积累与分配,同时增强营养器官干物质向穗部的转运效率,并提升齐穗后光合产物的同化能力,进而显著提高产量。刘彦伶等<sup>[40]</sup>认为,有机肥无机肥配施可以促进水稻干物质积累及茎叶干物质向籽粒转运。本研究中,秸秆还田条件下,相较于CK2,施用外源有机物料的水稻在分蘖期和成熟期的干物质积累总量均显著提升。

### 3.4 轻简化施肥条件下秸秆与施用外源有机物料互作对水稻稻米品质的影响

稻米品质是一个综合概念<sup>[41]</sup>,需要全面考量;稻米品质主要是通过加工、外观、蒸煮食味和营养等品质指标来评价<sup>[42]</sup>。

刘世平等<sup>[43]</sup>和邱园园<sup>[44]</sup>的研究结果表明,秸秆还田可以提高稻米的糙米率、精米率和整精米率,降低垩白粒率和垩白度,改善稻米的加工品质和外观品质;李冠男等<sup>[45]</sup>认为秸秆还田可以减少稻米的垩白粒率和垩白度。本研究结果与之相似,在施用相同外源有机物料的条件下,相较于秸秆离田,秸秆还田处理显著提升了糙米率、精米率和整精米率,有效降低了垩白粒率。研究结果表明,稻米蛋白质含量与食味品质之间呈负相关,蛋白质含量越高食味品质越差<sup>[46-47]</sup>。李晓峰<sup>[48]</sup>的研究结果表明,秸秆还田可显著降低直链淀粉含量,增加蛋白质含量。袁晓娟等<sup>[49]</sup>研究发现,秸秆还田可以提高稻米峰值黏度和食味值,降低稻米的消减值,以此改善蒸煮食味品质。徐国伟等<sup>[50]</sup>研究发现,秸秆还田提高了峰值黏度与崩解值,降低了消减值。本研究结果与之吻合,在相同碳源条件下,相较于秸秆离田,秸秆还田处理显著提升了稻米蛋白质含量、峰值黏度及崩解值。

饶梅力<sup>[51]</sup>研究发现,采用有机肥和无机肥配施技术,稻米的加工品质和外观品质获得明显改善。田苗等<sup>[52]</sup>的研究结果表明,有机肥和无机肥配施可显著提高稻米的蛋白质含量,显著降低直链淀粉含量。余坤龙<sup>[53]</sup>的研究结果表明,有机肥和无机肥配施可提高食味值,提高RVA特征值中的峰值黏度、热浆黏度、最终黏度、崩解值,降低消减值和糊化温度。本研究结果表明,施用外源有机物料可显著优化稻米的碾磨特性,表现为糙米率、精米率及整精米率的提高,并显著改善其外观品质,有效降低垩白度与垩白粒

率,然而对籽粒长宽比的改善则无显著效果。相较于CK2,YJ处理显著增加了蛋白质含量。此外,施用外源有机物料还提升了稻米的峰值黏度、最终黏度与崩解值,降低了糊化温度,从而改善稻米的蒸煮食味品质。

## 4 结 论

本研究通过比较秸秆不同处理方式及施用外源有机物料的互作对水稻产量和稻米品质的影响,系统分析其对水稻产量和稻米品质协同提升具有关键影响的农艺生理指标及稻米品质特性。结果表明,YJ处理和SWT处理对提高水稻产量与稻米品质具有显著的效果。

### 参考文献:

- [1] 郝雯倩,蔡兴菁,杨海东,等. 不同类型组蛋白修饰在水稻响应非生物胁迫中的研究进展[J]. 中国水稻科学, 2025, 39(5): 575-585.
- [2] 牛同旭,郑桂萍,李志彬,等. 秸秆还田对粳稻垦梗5号产量和品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(3): 72-77.
- [3] 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.
- [4] 王伟彪,伍少福. 轻简化施肥技术对水稻产量和氮肥利用的影响[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(9): 1686-1688.
- [5] 易 琼. 稻-稻-菜轮作体系下有机肥配施对土壤肥力的效应及机理研究[D]. 广州:华南农业大学, 2019.
- [6] 余 坤. 预处理秸秆还田的土壤改良培肥与增产效应及机制研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2017.
- [7] 张 婧,陈庆锋,刘 伟,等. 秸秆还田对盐碱地土壤及作物生长的影响研究进展[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(11): 13-22.
- [8] 蔡 影,付思伟,张博睿,等. 秸秆连续还田配施化肥对稻-油轮作土壤碳库及作物产量的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(10): 4716-4724.
- [9] 张洪熙,赵步洪,杜永林,等. 小麦秸秆还田条件下轻简栽培水稻的生长特性[J]. 中国水稻科学, 2008, 22(6): 603-609.
- [10] PARAMESHWARI Y S, NARENDAR G, KRISHNA CHAITAN-YA A, et al. Understanding of organic fertilizers in Indian context: a review[J]. Journal of Advances in Biology & Biotechnology, 2024, 27(11): 1573-1583.
- [11] 张 悦. 肥料应用中存在的问题及建议[J]. 肥料与健康, 2020, 47(6): 4-9.
- [12] LIANG D, NING Y W, JI C, et al. Biochar and manure co-application increases rice yield in low productive acid soil by increasing soil pH, organic carbon, and nutrient retention and availability[J]. Plants, 2024, 13(7): 973.
- [13] ZHANG L, ZHANG F, ZHANG K P, et al. Nitrogen and organic matter managements improve rice yield and affect greenhouse gas

- emissions in China's rice-wheat system[J]. *Field Crops Research*, 2025, 326: 109838.
- [14] PRAMONO A, ADRIANY T A, AL VIANDARI N, et al. Higher rice yield and lower greenhouse gas emissions with cattle manure amendment is achieved by alternate wetting and drying[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2024, 70(2): 129-138.
- [15] 张天赐, 白玲利, 马怡斐, 等. 牡蛎壳粉结合秸秆还田对稻田土壤酸化改良及细菌群落结构的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2025(9): 50-61.
- [16] 翟效俊, 刘新宇, 李智, 等. 新型控释肥与有机物料配施对水稻产量及氮素利用效率的影响[J]. *江苏农业科学*, 2025, 53(2): 44-51.
- [17] 马志琪, 徐灿, 陈永伟, 等. 不同还田量对宁夏引黄灌区水稻秸秆腐解特征与产量的影响[J]. *天津农业科学*, 2024, 30(12): 18-24.
- [18] 孟宪喆, 李卓然, 李红宇, 等. 秸秆还田和施氮方式对寒地水稻生理特性、产量及品质的影响[J/OL]. *中国农业科技导报(中英文)*, 2025: 1-13[2025-03-03]. DOI: 10.13304/j.nykjdb.2024.0429.
- [19] 王斯文, 柏程瀚, 吉林爽, 等. 秸秆还田条件下水分调控对水稻生长发育和稻田生态系统的影响研究[J]. *东北农业科学*, 2024, 49(6): 1-6.
- [20] 秦子元, 张忠学, 郑和祥, 等. 秸秆还田下灌溉模式对水稻产量及水氮利用的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2024(9): 191-199.
- [21] 杨志臣, 吕贻忠, 张凤荣, 等. 秸秆还田和腐熟有机肥对水稻土培肥效果对比分析[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(3): 214-218.
- [22] 沈舟兵, 刘乐乐, 缪凯申, 等. 施用有机肥对浙东海岛地区水稻产量及土壤肥力的影响[J]. *浙江农业科学*, 2023, 64(3): 530-532.
- [23] 曾婷婷, 王路明, 杨康, 等. 长期外源有机物料添加对土壤无机碳库的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2024, 32(12): 2034-2044.
- [24] 徐洁章, 韩科峰, 吴良欢. 长期外源有机物料添加对双季稻产量、土壤肥力及土壤质量的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2024, 29(12): 23-32.
- [25] 刘献红, 孟英, 唐傲, 等. 化肥配施有机物料对盐碱地水稻产量和品质的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2022(8): 19-24.
- [26] 杜康, 谢源泉, 林赵森, 等. 秸秆还田条件下氮肥对水稻幼苗生长及养分吸收的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2016, 39(1): 18-25.
- [27] 郝建华, 丁艳锋, 王强盛, 等. 麦秸还田对水稻群体质量和土壤特性的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2010, 33(3): 13-18.
- [28] 唐志敏, 刘军, 刘建国. 秸秆还田对长期连作棉花光合速率及叶绿素荧光的影响[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2012, 30(3): 302-307.
- [29] 王子阳, 陈婉华, 袁伟, 等. 双季稻地区不同类型水稻秸秆与还田深度对还田秸秆腐解进程的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2022(2): 170-174.
- [30] 杨胜玲, 黄兴成, 李渝, 等. 长期有机无机肥配施对水稻生长、干物质积累及产量的影响[J]. *浙江农业学报*, 2022, 34(9): 1815-1825.
- [31] 戴黎, 胡诚, 万建华, 等. 有机无机复混肥料对水稻产量及养分吸收利用的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2024(2): 111-119.
- [32] 周英杰. 播期及氮素穗肥施用对双季优质籼稻产量和品质的影响[D]. 南昌: 江西农业大学, 2022.
- [33] HUANG J, WANG X Y, YANG L L, et al. Analysis of tobacco straw return to the field to improve the chemical, physical, and biological soil properties and rice yield[J]. *Agronomy*, 2024, 14(5): 1025.
- [34] FAN Y F, GAO J L, SUN J Y, et al. Potentials of straw return and potassium supply on maize (*Zea mays* L.) photosynthesis, dry matter accumulation and yield[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 799.
- [35] 张杏雨. 作物秸秆还田与氮肥施用方法对水稻产量及氮肥利用率的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
- [36] 胡明明, 李志欣, 丁峰, 等. 不同水旱轮作模式下秸秆还田与精量减氮对水稻产量、氮素吸收利用及土壤氮含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(8): 1500-1514.
- [37] 叶文培, 谢小立, 王凯荣, 等. 不同时期秸秆还田对水稻生长发育及产量的影响[J]. *中国水稻科学*, 2008, 22(1): 65-70.
- [38] 刘鸿飞. 麦秸还田对水稻产量形成和温室气体排放的影响以及肥水处理效应[D]. 扬州: 扬州大学, 2018.
- [39] 唐海明, 李超, 肖小平, 等. 不同有机无机肥氮投入比例对双季水稻生理特性与产量的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2020, 22(6): 149-160.
- [40] 刘彦伶, 李渝, 白怡婧, 等. 长期不同施肥对水稻干物质和磷素积累与转运的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(7): 1146-1156.
- [41] 陈怡岑, 赵旭, 林琳, 等. 辽宁稻米资源主要品质分析及综合评价[J]. *食品安全质量检测学报*, 2025, 16(6): 177-182.
- [42] 杨英, 赵士茹, 舒小伟, 等. 叶面喷晒对不同籼·粳水稻品种稻米品质及硒含量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2023, 51(22): 138-144.
- [43] 刘世平, 聂新涛, 张洪程, 等. 稻麦两熟条件下不同土壤耕作方式与秸秆还田效用分析[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(7): 48-51.
- [44] 邱园园. 氮肥和外源物质对优质食味水稻品质和 2-AP 含量的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2022.
- [45] 李冠男, 黄立华, 张璐, 等. 施用有机肥和秸秆还田对东北苏打盐碱地水稻营养与食味品质的影响[J]. *作物杂志*, 2019(5): 82-88.
- [46] 朱旭, 倪明理, 吕岩, 等. 稻虾共作模式下秸秆还田与投食对稻米品质的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2023, 42(2): 79-85.
- [47] 陈嘉馨, 胡丽琴, 周传名, 等. 优质稻蒸谷米品质特性研究[J]. *中国粮油学报*, 2025, 40(6): 50-58.
- [48] 李晓峰. 秸秆全量还田与氮肥运筹对机插优质食味粳稻产量、养分吸收及品质的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2017.
- [49] 袁晓娟, 孙知白, 杨永刚, 等. 3种复种模式下秸秆还田对机插

- 杂交籼稻产量形成及品质的影响[J]. 四川农业大学学报, 2022, 40(3): 319-330.
- [50] 徐国伟, 谈桂露, 王志琴, 等. 秸秆还田与实地氮肥管理对直播水稻产量、品质及氮肥利用的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2736-2746.
- [51] 饶梅力. 有机肥部分替代化肥对水稻产量和品质的影响[J]. 现代化农业, 2021(5): 13-14.
- [52] 田 苗, 李 鹏, 赵 珅, 等. 有机无机肥配施对水稻产量、品质及土壤肥力的影响[J]. 安徽农学通报, 2023, 29(1): 120-122, 128.
- [53] 余坤龙. 控释肥对稻虾共作水稻生长特征与温室效应的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2022.

(责任编辑: 陈海霞)