

覆膜稻田施用炭基肥对水稻产量及氮素利用的影响

熊家欢^{1,2} 张义凯¹ 向镜¹ 陈惠哲¹ 徐一成¹ 王亚梁¹ 王志刚¹ 姚坚² 张玉屏^{1,*}

(¹ 中国水稻研究所 水稻生物育种全国重点实验室, 杭州 311401; ² 嘉兴市农业科学研究院, 嘉兴 314016; *通信联系人, email: cnrrizyp@163.com)

Effect of Biochar-based Fertilizer Application on Rice Yield and Nitrogen Utilization in Film-mulched Paddy Fields

XIONG Jiahuan^{1,2}, ZHANG Yikai¹, XIANG Jing¹, CHEN Huizhe¹, XU Yicheng¹, WANG Yaliang¹,
WANG Zhigang¹, YAO Jian², ZHANG Yuping^{1,*}

(¹ State Key Laboratory of Rice Biology and Breeding, China Rice Research Institute, Hangzhou 311401, China; ² Jiaxing Academy of Agricultural Sciences, Jiaxing 314016, China; *Corresponding author, email: cnrrizyp@163.com)

Abstract: 【Objective】To investigate the impact of biochar-based fertilizers and increased biochar application on grain yield and nitrogen utilization of film-mulched rice, aiming to provide a theoretical foundation for sustainable rice mulching technology. 【Methods】Utilizing the high-quality conventional *japonica* rice variety Zhehexiang 2(ZHX2) and the *indica-japonica* hybrid rice Yongyou 538(YY538), film-mulched mechanical transplanting experiments were conducted in 2021 with CK (no nitrogen application), T1 (slow-release fertilizers), and T2 (biochar-based fertilizers) treatments. In 2022, similar experiments were conducted with CK, T2, T3 (biochar-based fertilizers with an additional 6 t/hm² biochar), and T4 (biochar-based fertilizers with an additional 12 t/hm² biochar) treatments. The study assessed the effects of biochar-based fertilizer application on dry matter accumulation, yield, yield components, and nitrogen uptake and utilization in mulched rice fields. 【Result】Biochar-based fertilizers enhanced the growth and yield of mulched rice. They significantly increased dry matter accumulation by 5.40% to 29.69% compared to T1, and additional biochar application further increased dry matter accumulation by 9.28% to 46.91% compared to T2. The impact was consistent throughout ZHX2's growth duration, with YY538 showing more significant effects in the later stages. Biochar-based fertilizers significantly boosted rice yield by 3.84% to 4.65% compared to T1. Increased biochar application led to a 7.97% to 15.06% yield increase compared to T2. Biochar-based fertilizers enhanced nitrogen uptake and utilization, improving nitrogen utilization efficiency. They increased nitrogen accumulation in critical growth periods by 4.87% to 31.68%, with higher accumulation observed with additional biochar application. The highest nitrogen accumulation was achieved in T4, showing an 11.87% to 40.59% increase compared to T2. Biochar-based fertilizers reduced nitrogen dry matter productivity and nitrogen grain production efficiency but enhanced nitrogen partial factor productivity, nitrogen agronomic efficiency, and nitrogen recovery efficiency. Increased biochar application further improved nitrogen utilization and reduced losses. 【Conclusion】Applying biochar-based fertilizers in mulched rice fields enhances dry matter mass and nitrogen accumulation, with additional biochar application further improving these effects, leading to increased yield and nitrogen utilization efficiency. The yield increase in ZHX2 was primarily due to panicle number and grain number per panicle, while in YY538, it was due to panicle number, with the best effect observed in T4.

Key words: film mulching; biochar-based fertilizer; yield; nitrogen utilization; rice

摘 要: 【目的】研究炭基肥及增施生物炭对覆膜水稻产量、氮素利用的影响, 以期为水稻覆膜技术可持续发展应用提供理论依据。【方法】以优质粳型常规水稻品种浙禾香 2 号和籼粳杂交稻甬优 538 为材料, 2021 年覆膜机插种植设置 CK(不施氮)、T1(施用缓释肥)和 T2(施用炭基肥)处理。2022 年覆膜机插种植设置 CK(不施氮)、T2(施用炭基肥)、T3(炭基肥增施 6 t/hm² 生物炭)和 T4(炭基肥增施 12 t/hm² 生物炭)处理, 研究覆膜稻田施用炭基肥对水稻干物质积累、产量及产量构成和氮素吸收利用的影响。【结果】炭基肥促进了覆膜水稻的生长, 提高了覆膜

收稿日期: 2023-09-04; 修改稿收到日期: 2024-01-15。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFD1500404); 浙江省重点研发计划资助项目(2022C02034); 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-01-21)。

水稻产量。炭基肥显著增加水稻干物质积累量,与 T1 相比干物质积累显著增加 5.40%~29.69%,增施生物炭与 T2 相比增加了覆膜水稻干物质积累量 9.28%~46.91%。浙禾香 2 号整个生长期效果明显,甬优 538 在后期作用更显著。与 T1 相比,炭基肥能显著提高水稻产量 3.84%~4.65%。增施生物炭较 T2 进一步提高了覆膜水稻产量 7.97%~15.06%;炭基肥促进了覆膜水稻对氮素的吸收利用,提高水稻氮素利用效率。施用炭基肥显著增加覆膜水稻各生长关键时期的氮素积累量 4.87%~31.68%,且氮素积累量随炭基肥增施生物炭量的增加而提高,炭基肥增施 12 t/hm² 生物炭(T4)氮素积累最高,较施炭基肥(T2)增加 11.87%~40.59%。炭基肥降低了覆膜水稻氮素干物质生产率和氮素稻谷生产率,提高了氮肥偏生产力、氮肥农学效率和氮肥吸收利用效率。增施生物炭处理进一步提高氮素利用,减少氮素损失。【结论】覆膜稻田施用炭基肥有利于水稻干物质质量和氮素积累量增加,增施生物炭能够进一步提高其效果,从而增加产量,提高氮素利用效率。浙禾香 2 号增产主要通过增加穗数和每穗粒数,甬优 538 则通过增加穗数增产,炭基肥增施 12 t/hm² 生物炭增产效果最好。

关键词: 覆膜;炭基肥;产量;氮素利用;水稻

水稻覆膜能够有效控制杂草生长,减少除草剂施用,提高肥料利用率,是一项具有增产增效、资源高效利用、绿色环保效果优良的技术。近些年来,随着生物可降解膜的出现和覆膜机的应用,覆膜种植越来越受到欢迎。前期研究表明,覆膜会影响土壤养分的可持续利用,不利于土壤的可持续利用。随着人们生态环境安全意识的加强,对水稻绿色栽培生产也有了更高的要求,既要保证作物持续增产又要能保持良好的生态环境。而提高土壤养分和肥料利用效率,科学利用新型肥料是关键因素^[1]。生物炭基肥是一种以生物炭为载体,与传统肥料复合而成的新型缓释肥料,具有一定的保肥增效、固氮减排、增产提质功能。为缓解和改善覆膜带来的不利影响,完善水稻覆膜种植技术,研究覆膜机插种植施用炭基肥对水稻绿色栽培生产具有重要意义。

多项研究表明,施用炭基肥及炭基肥增施能够促进水稻生长,提高其产量。石吕等^[2]发现施用生物炭能够通过提高穗数、结实率来增加水稻产量和干物质积累。王耀锋等^[3]研究表明生物炭处理显著提高稻谷产量 16.7%~18.4%,单独施用或与肥料增施均提高水稻对养分的吸收。施用生物炭显著改善土壤结构养分,提高水稻地上部氮素积累量,促进水稻对氮素的吸收,提高氮素利用效率^[4]。ROY 等^[5]研究表明,与常规肥料相比,施用生物炭肥料的氮表观利用效率比常规肥料高 11.7~29.5%。徐彬等^[6]等研究指出减氮增施生物炭能够显著增加水稻产量,提高氮肥利用效率和促进水稻对氮素的积累。段建军等^[7]研究结果表明减氮增施生物炭显著影响贵州黄壤稻田水稻地上部氮素积累量和氮素利用效率,水稻氮素积累量随生物炭用量增加先增后减。生物炭基肥在水稻生产中的应用有大量研究,但有关覆膜稻田施用炭基肥如何影响稻田环境和水稻产量则鲜有报道。因此,本研究通过两年的大田试验,

设置炭基肥与炭基肥增施生物炭处理,研究其对覆膜水稻关键生长期氮素积累和吸收利用、产量及产量构成的影响,为覆膜水稻肥料高效利用及施用提供理论依据,以期水稻绿色高效生产提供新方式。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2021 年和 2022 年在中国水稻研究所富阳试验基地进行。该地区属亚热带季风气候,海拔高度 300.5 m。2021 年平均温度 18.7℃,年降雨量 1739.5 mm,年日照时数 1691.7 h。2022 年平均温度 18.25℃,年降雨量 1177 mm,年日照时数 1733.5 h(图 1)。试验点常年连作水稻,冬闲。0—20 cm 土壤基本理化特性:全氮 2.48 g/kg,有机质 49.78 g/kg, pH 值 6.26,有效磷 16.87 mg/kg,速效钾 146.83 mg/kg。

1.2 试验设计与田间管理

1.2.1 试验设计

2021 年大田试验采用随机区组设计。试验采用两个品种,每个品种设置 3 个处理:CK,覆膜机插种植,不施氮;T1,覆膜机插种植,施用缓释肥(质量比, N:P₂O₅:K₂O = 26:10:15),施用量为 750 kg/hm²,纯氮量 195 kg/hm²;T2,覆膜机插种植,施用炭基肥(质量比, N:P₂O₅:K₂O = 10:4:8),施用量为 1950 kg/hm²,纯氮量 195 kg/hm²。每个小区磷钾肥用量相同。每个处理 3 次重复,共 18 个小区,每个小区面积 91.65 m² (长×宽=23.5 m×3.9 m)。

2022 年大田试验采用随机区组设计。试验采用两个品种,每个品种设置 4 个处理:CK,覆膜机插种植,不施氮;T2,覆膜机插种植,施用炭基肥(质量比 N:P₂O₅:K₂O = 10:4:8),施用量为 1950 kg/hm²,纯氮量 195 kg/hm²;T3,覆膜机插种植,施用 1950 kg/hm² 炭基肥+ 6 t/hm² 生物炭,纯氮量

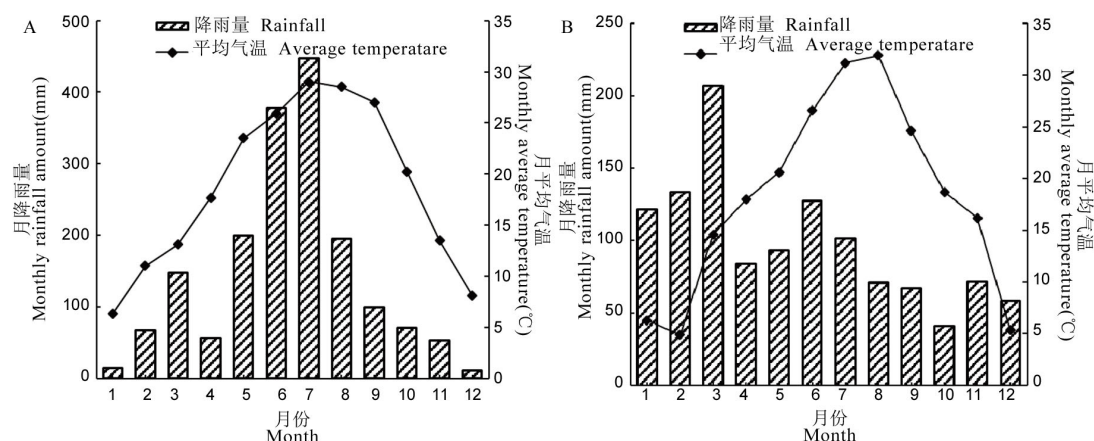


图1 试验基地 2021 年(A)和 2022 年(B)月降雨量和月平均温度

Fig. 1. Monthly rainfall and monthly average temperature in test site in 2021 (A) and 2022 (B)

195 kg/hm²; T4, 覆膜机插种植, 施用 1950 kg/hm² 炭基肥 + 12 t/hm² 生物炭, 纯氮量 195 kg/hm²; 磷钾肥施用量补到每个小区相同用量。每个处理 3 次重复, 共 24 个小区, 每个小区面积 91.65 m² (长×宽=23.5 m×3.9 m)。

1.2.2 田间种植与管理

供试品种为甬优 538(YY538)和浙禾香 2 号(ZHX2)。甬优 538 由宁波市种子有限公司选育, 为籼粳杂交稻(偏粳), 全生育期 160 d 左右。浙禾香 2 号由嘉兴市农业科学研究院选育, 为优质粳型常规水稻, 全生育期 165 d 左右, 两个品种品质较优、生育期相近。生物降解地膜为巴斯夫(中国)公司生产, 幅宽 1.8 m, 厚度 0.01 mm, 覆膜后约 45 d 开始降解, 最终生成 CO₂ 和 H₂O。2021 年 5 月 25 日播种, 6 月 17 日移栽, 不同处理 10 月 28 日~11 月 7 日收获。2022 年 5 月 18 日播种, 6 月 13 日移栽, 不同处理 10 月 26 日~11 月 4 日收获。用带有覆膜机的洋马插秧机机插, 机插行株距为 30 cm×18 cm, 每穴 2~3 本, 栽插密度每亩 1.24 万丛。小区之间筑宽 30 cm 田埂, 并用塑料薄膜包裹。单区单灌, 防止串水串肥。覆膜处理返青后采用覆膜湿润栽培水管理, 保持田面没有水层, 灌溉沟中有水, 保证田间土壤含水量基本为饱和状态。两种肥料均有缓释效果, 能够在水稻全生育期释放完养分, 各处理肥料按照试验方案一次性施用, 移栽前一次性施肥。其他田间管理按大面积生产田进行。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 茎蘖动态

每个处理 3 个重复, 每个重复选取代表性水稻 10 丛, 每 7 d 定位调查记载移栽后的植株分蘖数。

1.3.2 干物质积累

在分蘖期、穗分化期、齐穗期和成熟期四个时

期, 以平均茎蘖数为标准, 每小区取代表性植株 3 丛, 植株连根拔出, 清洗, 去根。把叶片、茎鞘、穗(齐穗期和成熟期)分开装袋烘干至恒重后称量记录, 3 次重复。

1.3.3 茎、叶、穗部氮含量

于水稻分蘖期、穗分化期、齐穗期和成熟期取样, 按照茎蘖平均数取 4 丛, 3 次重复。分茎、叶、穗部分别烘干, 粉碎, 过筛备用。取适量样品采用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 消煮好的样品使用全自动凯氏定氮仪(FOSS, KjeltacTM8400)测定氮含量。

1.3.4 考种与测产

于成熟期每个小区调查 30 丛有效穗数, 并计算平均有效穗数, 以平均有效穗数为标准, 在小区不同区域取株高、穗型有代表性的 3 丛, 测定其每穗总粒数和每穗实粒数, 3 次重复。实割测产: 每个小区选定 100 丛实割, 单打单收和晒干后, 测定稻谷质量和含水率, 然后折算成标准含水量 14.5% 记为实收产量, 并从测产的样本中取样, 测定千粒重, 3 次重复。

1.3.5 氮肥参数计算公式

地上部植株吸氮量(kg/hm²)=Σ(茎、叶、穗部干物质质量)×(茎、叶、穗含氮量);

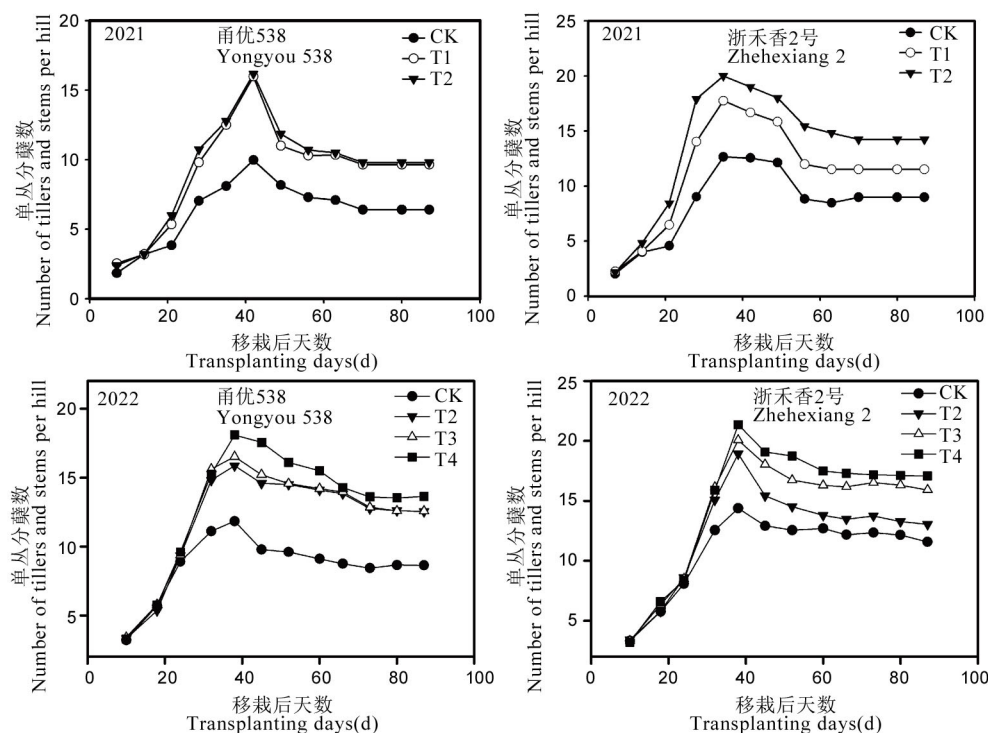
氮肥偏生产力(kg/kg) = 施氮区籽粒产量/氮肥施用量;

氮素干物质生产效率(kg/kg)=施氮区地上部植株干物质总量/成熟期地上部植株氮素积累量;

氮素稻谷生产效率(kg/kg)=籽粒产量/成熟期地上部氮素积累量;

氮肥农学利用效率(kg/kg)=(施氮处理籽粒产量-不施氮处理籽粒产量)/总施氮量;

氮肥吸收利用率=(施肥处理成熟期地上部吸氮总量-未施肥处理成熟期地上部吸氮总量)/总施氮



在 2021 年, CK 处理不施氮; T1 处理施用缓释肥 750 kg/hm^2 , 纯氮量 195 kg/hm^2 ; T2 处理施用炭基肥 1950 kg/hm^2 , 纯氮量 195 kg/hm^2 。在 2022 年, CK 处理不施氮; CK 处理不施氮, T2 处理施炭基肥 1950 kg/hm^2 , 纯氮量 195 kg/hm^2 ; T3 处理施炭基肥 1950 kg/hm^2 , 生物炭 6 t/hm^2 , 纯氮量 195 kg/hm^2 ; T4 处理施炭基肥 1950 kg/hm^2 , 生物炭 12 t/hm^2 , 纯氮量 195 kg/hm^2 。下同。

In 2021, CK, Zero nitrogen application; T1, 750 kg/hm^2 slow release fertilizers($195 \text{ kg/hm}^2 \text{ N}$); T2, 1950 kg/hm^2 biochar-based fertilizer($195 \text{ kg/hm}^2 \text{ N}$). In 2022, CK, Zero nitrogen application; T2, 1950 kg/hm^2 biochar-based fertilizer($195 \text{ kg/hm}^2 \text{ N}$); T3, 1950 kg/hm^2 biochar-based fertilizer+ 6 t/hm^2 ($195 \text{ kg/hm}^2 \text{ N}$); T4, 1950 kg/hm^2 biochar-based fertilizer+ 12 t/hm^2 biochar($195 \text{ kg/hm}^2 \text{ N}$).

图 2 炭基肥对覆膜水稻茎蘖动态的影响

Fig. 2. Effect of biochar-based fertilizer on stem tiller dynamics of mulched rice

量。

上述参数公式依据张福锁等^[8]和徐富贤等^[9]提出方法计算。

1.4 数据处理

运用 Microsoft Excel 2013、SigmaPlot 10.0 (Systat Software, Inc., London, UK)整理原始数据和作图。利用 R 语言(R 4.1.1)分析包(Stats, Agricolae)对数据进行方差分析(One-way ANOVA), 采用 LSD 法进行处理间的多重比较。

2 结果与分析

2.1 炭基肥对覆膜水稻茎蘖动态的影响

由图 2 所知, 覆膜水稻茎蘖高峰都在移栽后 35~42 d, 炭基肥与炭基肥增施生物炭促进水稻的早期分蘖, 提高了有效分蘖数。不同品种受炭基肥及炭基肥增施生物炭处理的影响不同。在 2021 年, 与 CK 相比, 甬优 538 的 T2 和 T1 处理的茎蘖生长动态无显著差异。浙禾香 2 号的 T2 与 T1 处理均提

高了水稻高峰苗数和有效分蘖数。在 2022 年, 两个品种高峰苗数表现为 $T4 > T3 > T2 > CK$ 。与单纯施炭基肥(T2)相比, 甬优 538 炭基肥增施 6 t/hm^2 生物炭(T3 处理)的有效穗数与之无差异, 炭基肥增施 12 t/hm^2 生物炭(T4)处理每丛增加了 1~2 个有效穗数。浙禾香 2 号 T3 和 T4 处理都能显著增加有效穗数。说明炭基肥主要促进优质常规粳稻浙禾香 2 号分蘖, 而对甬优 538 无明显作用, 增施生物炭则有利于两个品种有效穗数的增加。

2.2 炭基肥对覆膜水稻干物质积累量的影响

如表 1 所示, 2021 年, 与 CK 相比, T1、T2 显著增加了覆膜水稻各时期的干物质积累。浙禾香 2 号, T2 相比 T1, 分蘖期、穗分化期、齐穗期和成熟期干物质积累分别增加 29.69%、21.92%、11.00% 和 20.20% ($P < 0.05$)。对于甬优 538, 与缓释肥(T1)相比, 炭基肥(T2)增加了覆膜水稻齐穗期干物质积累(16.18%)和成熟期干物质积累(5.40%), 水稻生长前期无显著差异; 2022 年结果表明, 与 CK 相比, T2 显著增加了覆膜水稻各时期干物质积累

表 1 炭基肥对覆膜水稻干物质积累的影响

Table 1. Effect of biochar-based fertilizer on dry matter accumulation of mulched rice

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	干物质积累量 Dry matter accumulation			
			分蘖期	穗分化始期	齐穗期	成熟期
			Tillering stage	Panicle initiation stage	Heading stage	Maturing stage
2021	浙禾香 2 号 Zhehexiang 2	CK	1.7 ± 0.2 c	3.0 ± 0.2 c	6.7 ± 0.3 c	13.8 ± 0.7 c
		T1	2.3 ± 0.2 b	4.1 ± 0.3 b	8.7 ± 0.2 b	15.4 ± 0.3 b
		T2	3.0 ± 0.1 a	5.0 ± 0.4 a	9.7 ± 0.2 a	18.5 ± 0.5 a
	甬优 538 Yongyou 538	CK	1.8 ± 0.1 b	3.2 ± 0.2 b	7.6 ± 0.7 c	14.7 ± 0.1 c
		T1	3.2 ± 0.1 a	4.5 ± 0.2 a	9.3 ± 0.2 b	16.3 ± 0.3 b
		T2	3.1 ± 0.2 a	4.3 ± 0.3 a	10.8 ± 0.2 a	17.2 ± 0.1 a
2022	浙禾香 2 号 Zhehexiang 2	CK	1.4 ± 0.2 b	2.8 ± 0.3 d	7.9 ± 0.9 c	14.4 ± 0.4 c
		T2	2.6 ± 0.4 a	4.4 ± 0.1 c	10.5 ± 0.4 b	17.6 ± 0.8 b
		T3	3.2 ± 0.6 a	5.5 ± 0.2 b	11.8 ± 0.8 b	18.5 ± 0.4 b
		T4	3.0 ± 0.3 a	6.4 ± 0.3 a	14.3 ± 1.2 a	20.8 ± 0.7 a
	甬优 538 Yongyou 538	CK	2.0 ± 0.4 b	4.1 ± 0.1 c	10.0 ± 0.6 b	17.3 ± 0.9 c
		T2	2.9 ± 0.3 a	5.6 ± 0.5 b	13.5 ± 0.4 a	19.7 ± 0.4 b
		T3	3.5 ± 0.2 a	5.5 ± 0.1 b	13.5 ± 0.5 a	19.9 ± 0.7 b
		T4	3.0 ± 0.6 a	7.4 ± 0.6 a	14.3 ± 0.1 a	21.5 ± 0.5 a

数据为平均值±标准差 (n = 3); 同列中不同小写字母表示处理间差异显著 (P < 0.05)。

Values are Mean±SD (n = 3). Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among treatments (P < 0.05).

量。与 T2 相比, 浙禾香 2 号炭基肥增施 6 t/hm² 生物炭(T3)显著增加覆膜水稻穗分化期干物质积累量(24.71%), 其他时期未达到显著水平。炭基肥增施 12 t/hm² 生物炭(T4)显著增加覆膜水稻穗分化期干物质积累(46.91%)、齐穗期干物质积累(36.41%)和成熟期干物质积累(18.22%)。与 T2 处理相比, 甬优 538 炭基肥增施 6 t/hm² 生物炭(T3)在各时期无显著差异。炭基肥增施 12 t/hm² 生物炭(T4)后, 覆膜水稻穗分化期干物质积累增加 32.68%, 成熟期干物质积累增加 9.28%。说明浙禾香 2 号和甬优 538 施用炭基肥和增施生物炭作用时期各有差异, 优质常规稻浙禾香 2 号干物质积累效果明显, 籼粳杂交稻甬优 538 在后期作用更显著。

2.3 炭基肥对覆膜水稻产量及产量构成的影响

如表 2 所示, 炭基肥及炭基肥增施生物炭处理均能显著提高覆膜水稻产量, 但对不同品种产量构成因素的影响有所不同。2021 年, 与 CK 相比, T1、T2 显著增加水稻产量, 提高有效穗数。与 T1 相比, 浙禾香 2 号 T2 处理的有效穗数增加 13.07%, 产量提高 4.65%。与施用缓释肥(T1)相比, 甬优 538 炭基肥(T2)每穗粒数提高 19.50%, 产量提高 3.84%, 但千粒重降低 6.62%, 结实率和有效穗数无显著差异。2022 年研究结果表明, 与 CK 相比, T2 显著增加了水稻产量和有效穗数, 但浙禾香 2 号结实率显著下降, 甬优 538 显著降低了每穗粒数和结实率, 其他产量构成因素无显著差别。与 T2 相比, 浙禾

香 2 号炭基肥增施 6 t/hm² 生物炭(T3), 有效穗数显著增加了 16.10%, 其他因子未达到显著水平。炭基肥增施 12 t/hm² 生物炭(T4)显著增加覆膜水稻产量(7.97%)和有效穗数(24.49%), 降低千粒重(10.47%)。炭基肥增施 12 t/hm² 生物炭(T4)显著增加覆膜水稻产量(15.06%)、有效穗数(8.78%)和结实率(4.54%), 其他产量构成因素未达到显著水平。施用炭基肥均增加两水稻品种产量, 但对两品种中产量构成影响不同。与 T1 相比, 浙禾香 2 号增加穗粒数和千粒重, 甬优增加穗粒数但降低了千粒重, 这可能是由于甬优 538 每穗粒数增加较多导致。这是由于甬优 538 每穗粒数增加较多导致。增施生物炭进一步优化了覆膜水稻增产因子。两个品种中增施生物炭进一步增加了穗数, 但其他因子在不同处理中表现存在差异。浙禾香 2 号通过增加穗数和每穗粒数增产, 甬优 538 则通过增加穗数和结实率增产。生物炭施用量会对产量和产量构成产生差异, 其中炭基肥增施 12 t/hm² 生物炭增产效果最好。

2.4 炭基肥对覆膜水稻氮素积累量的影响

施用炭基肥和炭基肥增施生物炭能够显著增加覆膜水稻各生长关键时期的氮素积累量, 且氮素积累量随炭基肥增施生物炭量的增加而提高(表 3)。2021 年与 CK 相比, 缓释肥(T1)、炭基肥(T2)处理显著增加各时期的氮素积累量。对浙禾香 2 号而言, T2 较 T1 显著增加分蘖期氮素积累量(25.93%)和穗分化期氮素积累量(31.68%), 其他时期虽有增加但

表 2 炭基肥对覆膜水稻产量及产量构成的影响

Table 2. Effect of biochar-based fertilizer on yield and yield components of mulched rice

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	有效穗数 Effective panicle ($\times 10^4/\text{hm}^2$)	每穗粒数 Panicle number per panicle	结实率 Seed setting rate(%)	千粒重 1000-grain weight(g)	产量 Yield (t/hm^2)
2021	浙禾香 2 号 Zhehexiang 2	CK	176.3 \pm 14.7 c	162.4 \pm 6.3 a	92.2 \pm 0.8 a	22.1 \pm 0.6 a	6.8 \pm 0.3 c
		T1	215.6 \pm 3.0 b	155.3 \pm 8.8 a	89.5 \pm 4.2 a	20.6 \pm 0.4 b	8.8 \pm 0.2 b
		T2	243.8 \pm 7.7 a	156.4 \pm 6.7 a	92.4 \pm 2.3 a	21.2 \pm 0.4 ab	9.2 \pm 0.1 a
	甬优 538 Yongyou 538	CK	165.6 \pm 4.7 b	386.8 \pm 5.7 b	74.2 \pm 5.7 a	20.7 \pm 0.4 b	8.8 \pm 0.2 c
		T1	184.6 \pm 5.7 a	387.4 \pm 4.9 b	74.3 \pm 5.4 a	22.7 \pm 0.7 a	10.7 \pm 0.1 b
		T2	193.8 \pm 6.5 a	463.0 \pm 8.6 a	73.0 \pm 4.6 a	21.2 \pm 0.1 b	11.1 \pm 0.2 a
方差分析	Analysis of variance						
	品种 Variety(V)		**	**	**	**	**
	处理 Treatment(T)		**	**	NA	*	**
	品种 \times 处理 V \times T		**	**	NA	**	NA
2022	浙禾香 2 号 Zhehexiang 2	CK	217.4 \pm 10.7 d	131.8 \pm 9.5 a	91.3 \pm 0.6 a	22.4 \pm 0.1 a	6.7 \pm 0.2 c
		T2	254.0 \pm 12.5 c	129.6 \pm 6.2 a	87.8 \pm 0.9 b	22.5 \pm 0.3 a	8.3 \pm 0.3 b
		T3	294.9 \pm 10.6 b	135.4 \pm 3.8 a	89.1 \pm 0.9 b	21.8 \pm 0.1 a	8.3 \pm 0.2 b
		T4	316.3 \pm 12.7 a	141.3 \pm 4.5 a	88.1 \pm 0.8 b	20.2 \pm 0.8 b	8.9 \pm 0.1 a
	甬优 538 Yongyou 538	CK	169.7 \pm 3.2 c	339.4 \pm 5.7 a	81.4 \pm 1.4 a	21.8 \pm 0.2 a	9.9 \pm 0.2 c
		T2	232.0 \pm 6.9 b	288.4 \pm 8.6 bc	73.2 \pm 0.9 c	20.9 \pm 0.2 a	11.7 \pm 0.5 b
		T3	232.7 \pm 12.4 b	296.7 \pm 5.7 b	74.2 \pm 1.0 c	21.4 \pm 0.5 a	12.4 \pm 0.6 b
		T4	252.3 \pm 7.9 a	277.0 \pm 9.8 c	76.5 \pm 1.3 b	21.3 \pm 0.1 a	13.5 \pm 0.2 a
方差分析	Analysis of variance						
	品种 Variety(V)		**	**	**	**	**
	处理 Treatment(T)		**	**	**	**	**
	品种 \times 处理 V \times T		**	**	**	**	*

数据为平均值 \pm 标准差 ($n=3$)；同列中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。*和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著；NA 表示不显著。

Values are Mean \pm SD ($n=3$). Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$). * and ** indicate significance at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively. NA indicates no significance.

差异没有达到显著水平。对于甬优 538 中, T2 较 T1 齐穗期的氮素积累增加 4.87%, 成熟期氮素积累增加 9.92%; 2022 年 T2 相比 CK 显著增加各时期氮素积累总量。与 T2 相比, 浙禾香 2 号炭基肥增施 6 t/hm^2 生物炭(T3)齐穗期氮素积累量显著增加 16.49%, 其他时期未达到显著水平。炭基肥增施 12 t/hm^2 生物炭(T4)显著增加覆膜水稻穗分化期氮素积累(26.50%)、齐穗期氮素积累(40.52%)和成熟期氮素积累(40.59%)。甬优 538 炭基肥增施 6 t/hm^2 生物炭(T3)显著增加成熟期氮素积累(6.51%), 其他时期无显著差异。炭基肥增施 12 t/hm^2 生物炭(T4)显著增加覆膜水稻穗分化期氮素积累(18.35%)、齐穗期氮素积累(11.87%)和成熟期氮素积累(13.92%)。说明增施生物炭对覆膜水稻关键时期氮素积累效果显著, 尤其是炭基肥增施 12 t/hm^2 生物炭在覆膜水稻穗分化期、齐穗期和成熟期达极显著水平。

2.5 炭基肥对覆膜水稻氮素利用效率的影响

炭基肥及炭基肥增施生物炭的施用显著影响水稻的氮素利用, 施用炭基肥有利于提高氮素利用率, 炭基肥特别是增施生物炭对氮肥利用率提高效

果显著(表 4)。2021 年结果表明, 与 CK 相比, T1、T2 显著降低覆膜水稻氮素干物质生产率和氮素稻谷生产率。对浙禾香 2 号而言, 相比 T1, T2 氮素干物质生产率、氮肥偏生产力、氮肥农学效率、氮肥吸收利用效率分别显著增加 13.58%、4.72%、20.50%和 5.20%, 氮素稻谷生产率则无显著差异($P<0.05$)。甬优 538 中, T2 与 T1 相比氮肥偏生产力、氮肥农学效率和氮肥吸收利用效率分别增加了 3.83%, 22.27%和 8.47%, 其他指标无显著差异; 2022 年结果表明相比 CK, T2 降低氮素干物质生产率和氮素稻谷生产率。与 T2 相比, 浙禾香 2 号炭基肥增施 6 t/hm^2 生物炭(T3), 覆膜水稻氮肥吸收利用效率显著增加 8.64%, 氮素稻谷生产率降低 10.04%, 其他参数差异未达到显著水平。炭基肥增施 12 t/hm^2 生物炭(T4)覆膜水稻氮肥偏生产力、氮肥农学效率、氮肥吸收利用效率显著增加 7.84%、40.98%和 25.09%, 氮素干物质生产率和氮素稻谷生产率分别降低 9.96%和 18.57%; 甬优 538 炭基肥增施 6 t/hm^2 生物炭(T3)覆膜水稻氮肥农学效率、氮肥吸收利用效率显著增加 40.23%和 5.82%, 氮素干

表 3 炭基肥对覆膜水稻氮素积累总量的影响

Table 3. Effect of biochar-based fertilizer on total nitrogen accumulation in mulched rice

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	氮素积累量 Nitrogen accumulation			
			分蘖期 Tillering stage	穗分化 Panicle initiation stage	齐穗期 Heading stage	成熟期 Maturing stage
2021	浙禾香 2 号 Zhehexiang 2	CK	41.4 ± 5.4 c	51.7 ± 3.4 c	80.5 ± 4.0 b	110.9 ± 7.6 b
		T1	69.0 ± 5.0 b	82.9 ± 5.2 b	134.8 ± 1.7 a	173.7 ± 4.7 a
		T2	86.8 ± 3.6 a	109.2 ± 10.5 a	139.5 ± 3.4 a	183.9 ± 3.7 a
	甬优 538 Yongyou 538	CK	42.4 ± 3.4 b	51.8 ± 2.8 b	86.9 ± 6.6 b	125.2 ± 2.9 b
		T1	92.6 ± 4.2 a	104.6 ± 3.9 a	144.8 ± 9.3 a	166.6 ± 9.2 a
		T2	90.5 ± 5.5 a	103.7 ± 8.7 a	151.8 ± 12.0 a	183.1 ± 11.7 a
2022	浙禾香 2 号 Zhehexiang 2	CK	37.8 ± 1.4 b	54.8 ± 1.3 c	97.2 ± 6.4 d	106.7 ± 6.2 c
		T2	84.4 ± 6.0 a	97.5 ± 12.6 b	120.9 ± 9.1 c	150.1 ± 6.6 b
		T3	96.6 ± 10.6 a	101.5 ± 4.8 b	140.8 ± 1.8 b	167.0 ± 7.7 b
		T4	94.2 ± 4.3 a	123.3 ± 3.6 a	169.9 ± 7.6 a	211.1 ± 16.7 a
	甬优 538 Yongyou 538	CK	35.1 ± 4.9 b	50.9 ± 4.9 c	85.8 ± 8.0 c	124.2 ± 4.5 d
		T2	84.6 ± 5.6 a	110.5 ± 4.2 b	146.1 ± 4.3 b	174.4 ± 6.3 c
		T3	91.9 ± 5.6 a	116.9 ± 3.8 b	142.7 ± 7.0 b	185.8 ± 7.1 b
		T4	86.6 ± 6.1 a	130.8 ± 5.8 a	163.4 ± 6.9 a	198.7 ± 5.8 a

数据为平均值±标准差 (n = 3); 同列中不同小写字母表示处理间差异显著 (P < 0.05)。
Values are Mean ± SD (n = 3). Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among treatments (P < 0.05).

表 4 炭基肥对覆膜水稻氮素利用率的影响

Table 4. Effect of biochar-based fertilizer on nitrogen utilization in mulched rice

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	氮素干物质生产率 Nitrogen dry matter production efficiency (kg/kg)	氮素稻谷生产率 Nitrogen grain production efficiency(kg/kg)	氮肥偏生产力 Nitrogen partial factor productivity (kg/kg)	氮肥农学效率 Nitrogen agronomic efficiency (kg/kg)	氮肥吸收利用率 Nitrogen recovery efficiency (%)
2021	浙禾香 2 号 Zhehexiang 2	CK	124.9 ± 2.2 a	61.2 ± 2.3 a			
		T1	88.4 ± 0.4 c	50.7 ± 0.5 b	45.2 ± 0.8 b	10.4 ± 0.5 b	32.2 ± 1.6 b
		T2	100.4 ± 2.0 b	50.2 ± 0.8 b	47.3 ± 0.4 a	12.5 ± 1.0 a	37.4 ± 3.4 a
	甬优 538 Yongyou 538	CK	117.6 ± 2.4 a	70.6 ± 0.8 a			
		T1	98.1 ± 3.8 b	64.2 ± 2.8 b	54.8 ± 0.6 b	9.4 ± 0.7 b	21.2 ± 3.2 b
		T2	94.1 ± 5.6 b	60.7 ± 2.8 b	56.9 ± 1.1 a	11.5 ± 0.3 a	29.7 ± 4.5 a
2022	浙禾香 2 号 Zhehexiang 2	CK	135.2 ± 5.2 a	62.8 ± 1.3 a			
		T2	110.3 ± 1.3 b	55.2 ± 1.0 b	42.5 ± 1.6 b	8.2 ± 0.7 b	22.3 ± 2.4 c
		T3	104.7 ± 5.8 bc	49.7 ± 1.0 c	42.5 ± 1.1 b	8.2 ± 1.1 b	30.9 ± 2.3 b
		T4	99.3 ± 2.4 c	45.0 ± 2.2 d	45.8 ± 0.3 a	11.5 ± 1.5 a	47.4 ± 2.4 a
	甬优 538 Yongyou 538	CK	139.5 ± 2.4 a	79.5 ± 1.8 a			
		T2	113.1 ± 2.0 b	67.1 ± 2.7 b	60.0 ± 2.6 b	9.4 ± 1.4 c	25.8 ± 1.0 c
		T3	107.0 ± 0.7 c	66.9 ± 1.1 b	63.7 ± 3.0 b	13.1 ± 2.1 b	31.6 ± 1.8 b
		T4	108.5 ± 1.1 c	67.7 ± 0.8 b	69.0 ± 1.2 a	18.4 ± 0.8 a	38.2 ± 0.9 a

数据为平均值±标准差 (n = 3), 同列中不同小写字母表示处理间差异显著 (P < 0.05)。
Values are Mean ± SD (n = 3). Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among treatments (P < 0.05).

物质生产率降低 5.37%，其他参数无显著差异。炭基肥增施 12 t/hm² 生物炭(T4)覆膜水稻氮肥偏生产力、氮肥农学效率、氮肥吸收利用效率显著增加 15.08%、96.37%和 12.45%，氮素干物质生产率降低 4.13%，氮素稻谷生产率差异不显著。

3 讨论

3.1 覆膜稻田施用炭基肥对水稻产量形成和干物质积累的影响

水稻覆膜栽培结合炭基肥和生物炭研究鲜有报导，覆膜稻田施用炭基肥的研究还处于初步阶段。多项研究表明稻田施用炭基肥和生物炭能够促进水稻生长，增加产量。Nan 等^[10]连续 3 年施用生

物炭分别使水稻产量增加 8.0%、1.6%和 7.3%。索猛利等^[11]认为，相比对照处理，施用炭基肥显著增加干物质积累总量，增加产量。Bai 等^[12]分析表明，无论是单独施用生物炭还是生物炭增施无机肥都能够增加作物产量。Liu 等^[13]通过 Meta 分析发现，在稻田中施用生物炭是一种有益的方法，它可以使水稻产量提高 10.73%。这与本研究结果一致，覆膜水稻施用生物炭基肥能够增加水稻穗数，提高产量。在生物炭基肥的基础上，增施生物炭又进一步提高水稻干物质积累和产量，且以 T4 产量最高，生物炭与氮肥组配的比例越大，产量越高。覆膜稻田施用生物炭基肥增加产量主要由多个方面造成：一方面生物炭能够改良土壤环境，其对酸性和盐碱土壤具有良好的改善作用^[14]，且随着生物炭含量

的增加效果更好。Binh 等^[15]在有机碳含量高(3.05%)和低(0.54%)的两种土壤进行了盆栽试验,混合了0%、1.5%、3%、6%和12%的生物炭种植水稻,结果表明,在高有机碳含量土壤中,水稻生长随着生物炭比率的升高而增加,12%的生物炭率导致了最大的总生物量,增加了47%;而在低含碳量土壤中,3%和6%的生物炭率显示了最高的总生物量,增加了44%。这主要可能是生物炭的施用提高了土壤的pH值,从而提高土壤可利用养分含量。Chu 等^[16]研究证明土壤中添加生物炭后,土壤pH值提高0.09~0.10个单位,土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 提高105%~116%。Selvarajh 等^[17]盆栽试验表明,在土壤中添加稻草生物炭5~10 t/hm²可使土壤中的可交换的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 明显增加。由于稻草生物炭较高的吸附能力,增加土壤中氮的保留来提高水稻植株的养分吸收,导致干物质产量的增加。另一方面,覆膜水稻施用炭基肥主要提高水稻生物量来提高产量,但前人研究施用炭基肥和生物炭对水稻产量构成有不同的影响。水稻产量由有效穗数、每穗粒数、结实率和千粒重构成。Lü 等^[18]进行3年的田间试验,发现施用20 t/hm²和40 t/hm²生物炭在前两年分别增加了2.56%~16.84%和6.15%~10.77%的水稻产量。水稻产量增加主要是由于总生物量、穗数和每穗粒数增加。陈琳等^[19]发现炭基肥可以促进氮素由水稻的营养器官向籽粒运输和分配。炭基肥能够控制水稻的无效分蘖,通过增加穗粒数提高稻谷产量。Danso 等^[20]研究指出与生物炭处理相比,对照处理的水稻产量较低。生物炭处理有效控制了水稻无效分蘖,提高茎蘖成穗率,促进养分向籽粒输送。这与本研究结果一致,在2022年试验中炭基肥增施生物炭处理显著增加了水稻的有效穗数,通过提高水稻的有效穗数增加产量。但也有研究指出,施用炭基肥能够促进水稻产量的增加,主要提高结实率和千粒重,同时也提高氮肥利用率^[21]。金丹丹等^[22]研究表明炭基肥料提高了水稻的穗粒数、结实率和千粒重。谢志坚等^[24]减施20%氮肥后,炭基肥提高了水稻地上部干物质量,增加了千粒重和有效穗数。因此,生物炭基肥和生物炭能够提高水稻干物质量,从而提高产量,但不同处理对水稻产量构成的影响不同。目前,生物炭和炭基肥在农田上的应用还存在一定的问题。Yin 等^[23]研究指出,短期内水稻施用生物炭并不能增加产量。田间施用20 t/hm²生物炭后,其抽穗后的生物量产量和总生物量产量均提高了7%~16%,但收获指数降低了4%~11%,导致水稻产量没有增加。不同种类、施

用量、施用方式对稻田环境和水稻的生长影响不尽相同,长期的作用效果还有待进一步探索^[24]。本研究中仅设置了两个梯度的生物炭的施用,最佳生物炭与氮肥组配的比例还有待下一步的研究。

3.2 施用炭基肥对覆膜水稻氮素吸收利用和积累的影响

生物炭是一种有机物的热解产物,在养分负荷和提高养分利用效率方面具有巨大潜力,因其在提高水稻生产力和稻田保氮方面的潜力而备受关注^[25]。本研究中覆膜水稻施用炭基肥和增施生物炭提高了氮素积累,施用炭基肥后氮素干物质生产率降低了10.76%~20.20%,氮素稻谷生产率降低3.38%~21.60%,显著提高了水稻氮肥偏生产力、氮肥农学效率和氮肥吸收利用率,这与前人多项研究相同。Kimanl 等^[26]研究结果表明,与没有生物炭的处理相比,共同施用生物炭和氮肥能显著提高稻谷23.9%的氮吸收率。Roy 等^[27]在高氮处理下,稻谷和秸秆对氮的吸收量明显增加。施用生物炭肥料与施用常规肥料相比,氮的农艺效率(AE)和表观回收效率(ANR)分别增加30.70%和29.50%。Jia 等^[28]研究指出,与尿素相比,生物炭基肥的应用使NUE增加了约20%,是一种有前途的控释氮肥,能够减少氮的损失和提高净利用率。施用生物炭对水稻氮素吸收利用有明显的促进作用,增加水稻齐穗期和成熟期的氮素积累量。多项研究表明稻田施用生物炭主要通过节流、扩源、增效来提高氮素利用。一方面可能是施用炭基肥和生物炭有利于减少养分流失,Dong 等^[29]研究表明生物炭缓释肥料能减少水稻分蘖阶段的氮浸出和径流损失,而为水稻拔节和成熟阶段为其提供了更多的养分。生物炭多孔的特性能够吸收 NH_3 等温室气体,降低氮素的损失,提高氮的利用效率^[30]。乔志刚等^[31]研究表明生物质炭基肥通过对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸附延缓氮肥的损失,最终提高水稻的氮素利用效率。另一方面可能是施用炭基肥及生物炭能够增强土壤养分的固持能力,增加了可吸收态养分含量。Chew 等^[32]研究证明,以生物炭为基础的复合肥料处理在根部表皮细胞层产生了比根部表面更多的负电位,这种电位差可能是矿物营养吸收的驱动力,促进养分吸收,增加养分利用效率。Roy 等^[5]研究表明生物炭肥料减缓 NH_4^+ 的释放,但 NO_3^- 的释放与常规肥料相当。施用生物炭肥料的氮表观利用效率分别比常规肥料高11.7%~29.5%,以此减少损失,提高养分利用效率(NUE)。而从氮代谢角度分析,施用生物炭提高了齐穗期水稻功能叶谷氨酰胺合成酶(GS)、叶硝酸还

原酶(NR)、亚硝酸还原酶(NiR)活性及可溶性蛋白含量^[23]。综上,覆膜稻田施用生物炭基肥可以最大限度地减少氮的损失,主要是通过减少氮浸出流失和径流等损失。同时,其良好的养分固存作用可保证水稻生长后期养分生长稳定供应,促进成熟期水稻部的氮素积累,最终提高氮素利用效率。本研究只进行了两年试验,对如何优化生物炭和炭基肥的种类、施用量和施用方式还不清楚,还需探索水稻生长和稻田环境的长期效应。不断完善覆膜栽培技术,结合其他先进技术,发展更加先进的覆膜插秧机降低种植成本,对于促进农业可持续发展和保护生态环境具有重要意义。

参考文献:

- [1] 朱兆良,金继运.保障我国粮食安全的肥料问题[J].植物营养与肥料学报,2013,19(2):259-273.
Zhu Z L, Jin J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(2): 259-273. (in Chinese with English abstract)
- [2] 石吕,薛亚光,韩笑,石晓旭,魏亚凤,杨美英,刘建.不同土壤类型条件下生物炭施用量对水稻产量、品质和土壤理化性状的影响[J].江苏农业科学,2022,50(23):222-228.
Shi L, Xue Y G, Han X, Shi X X, Wei Y F, Yang M Y, Liu J. Impacts of biochar application rate on rice yield, quality and soil physicochemical properties under different soil types[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(23): 222-228. (in Chinese with English abstract)
- [3] 王耀锋,刘玉学,吕豪豪,杨生茂.水洗生物炭配施化肥对水稻产量及养分吸收的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(4):1049-1055.
Wang Y F, Liu Y X, Lu H H, Yang S M. Effect of washing biochar and chemical fertilizers on rice yield and nutrient uptake[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(4): 1049-1055. (in Chinese with English abstract)
- [4] 何大卫,赵艳泽,高继平,隋阳辉,辛威,易军,张文忠.生物炭和氮肥配施对粳稻产量形成、氮肥当季效应及其后效的影响[J].植物营养与肥料学报,2021,27(12):2114-2124.
He D W, Zhao Y Z, Gao J P, Sui Y H, Xin W, Yi J, Zhang W Z. Effects of biochar application combined with nitrogen fertilizer on yield formation of japonica rice and the immediate and residual effects of nitrogen[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2021, 27(12): 2114-2124. (in Chinese with English abstract)
- [5] Roy A, Chaturvedi S, Singh S V. Preparation and evaluation of two enriched biochar-based fertilizers for nutrient release kinetics and agronomic effectiveness in direct-seeded rice[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2022, 14(8): 1-12.
- [6] 徐彬,王小利,蒙娟熙,杨宏伟,龙大勇,梅婷婷,段建军.减氮配施生物炭对水稻产量及不同生育期氮素累积的影响[J].福建农业学报,2022,37(12):1528-1535.
Xu B, Wang X L, Meng R X, Yang H W, Long D Y, Mei T T, Duan J J. Effects of nitrogen fertilizer reduction accompanied by biochar application on yield and nitrogen accumulation of rice at various growth stages[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 37(12): 1528-1535. (in Chinese with English abstract)
- [7] 段建军,郭琴波,徐彬,蒙娟熙,刘安凯,侯再芬,梁国太,王小利.氮肥减量施生物炭对水稻产量和养分利用的影响[J].水土保持学报,2022,36(6):298-308.
Duan J J, Guo Q B, Xu B, Meng R X, Liu A H, Hou Z F, Liang G T, Wang X X. Effects of biochar application with reduced nitrogen fertilizer on rice yield and nutrient utilization[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(6): 298-308. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张福锁,王激清,张卫峰,崔振岭,马文奇,陈新平,江荣风.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(5):915-924.
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, Cui Z L, Ma W Q, Chen X P, Jiang R F. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924. (in Chinese with English abstract)
- [9] 徐富贤,熊洪,谢戎,张林,朱永川,郭晓艺,杨大金,周兴兵,刘茂.水稻氮素利用效率的研究进展及其动向[J].植物营养与肥料学报,2009,15(5):1215-1225.
Xu F X, Xiong H, Xie L, Zhang L, Zhu Y C, Guo X Y, Yang D J, Zhou X B, Liu M. Advance of rice fertilizer-nitrogen use efficiency[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(5): 1215-1225. (in Chinese with English abstract)
- [10] Nan Q, Wang C, Wang H. Biochar drives microbially-mediated rice production by increasing soil carbon[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 387: 121680.
- [11] 索猛利,吴建富,刘方平,徐涛,苏甜,张庚金,熊江花.不同水肥管理与耕作措施对涝渍灾后稻田土壤养分和水稻产量的影响[J].江西农业大学学报,2023,45(1):17-27.
Suo M L, Wu J F, Liu F P, Xu T, Su T, Zhang G J, Xiong J H. Effects of different water and fertilizer management and tillage practices on soil nutrients and rice yield in post-flooded rice fields [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2023, 45(1): 17-27. (in Chinese with English abstract)
- [12] Bai S H, Omidvar N, Gallart M. Combined effects of biochar and fertilizer applications on yield: A review and meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 808: 152073.
- [13] Liu Y, Li H, Hu T. A quantitative review of the effects of biochar application on rice yield and nitrogen use efficiency in paddy fields: A meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 830: 154792.
- [14] Li X, Yao T, Huang X. Biochar increases rice yield by improving root morphological and root physiological functions in heavily saline-sodic paddy soil of northeast

- China[J]. *Bioresources*, 2022, 17(1): 1241-1256.
- [15] Binh T N, Vinh N N, Tong X N, My H N, Hao P D, Gai D D, Nghia V N, Tan-Viet P. High biochar rates may suppress rice (*Oryza sativa*) growth by altering the ratios of C to N and available N to P in paddy soils[J]. *Soil Use and Management*, 2022, 39(1): 415-428.
- [16] Chu L, Zhang Y, Qian L. Influence of biochar on nitrogen use efficiency and root morphology of rice-seedling in two contrasting paddy soils[J]. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 2020, 89(4): 1035-1042.
- [17] Selvarajh G, Ch'ng H Y. Enhancing soil nitrogen availability and rice growth by using urea fertilizer amended with rice straw biochar[J]. *Agronomy(Basel)*, 2021, 11(7): 1352.
- [18] Lü R, Wang Y, Wang Q. Residual effect of straw biochar on grain yield and yield attributes in a double rice cropping system of subtropical China[J]. *Plant Soil and Environment*, 2022, 68(7): 328-337.
- [19] 陈琳, 乔志刚, 李恋卿, 潘根兴. 施用生物质炭基肥对水稻产量及氮素利用的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2013, 29(5): 671-675.
Chen L, Qiao Z G, Li L Q, Pan G X. Effects of biochar-based fertilizers on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(5): 671-675. (in Chinese with English abstract)
- [20] Danso F, Agyare W A. Modelling rice yield from biochar-inorganic fertilizer amended fields[J]. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2021, 4: 100123.
- [21] 杨天昱. 生物炭基肥对水稻产量及稻田土壤肥力特性的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
Yang T Y. Effects of biochar-based fertilizer on rice yield and paddy soil fertility characteristic[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [22] 金丹丹, 宫亮, 李波, 曲航, 孙文涛, 张文忠. 2种缓/控释肥对滨海盐碱地区水稻产量及氮代谢的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(4): 334-339.
Jin D D, Gong L, Li B, Qu H, Sun W T, Zhang W Z. The effects of two slow/controlled release fertilizers on the productivity and nitrogen metabolism of rice in coastal saline-alkaline regions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(4): 334-339. (in Chinese with English abstract)
- [23] Yin X, Chen J, Cao F. Short-term application of biochar improves post-heading crop growth but reduces pre-heading biomass translocation in rice[J]. *Plant Production Science*, 2020, 23(4): 522-528.
- [24] 谢志坚, 吴佳, 段金贵, 喻成龙, 郑琴, 倪国荣, 荣勤雷, 赵尊康, 周春火. 生物炭基肥与紫云英联合还田对红壤区早稻干物质累积和氮素利用特征的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(9): 1732-1739.
- Xie Z J, Wu J, Duan J G, Yu C L, Zheng Q, Ni G R, Rong Q L, Zhao Z K, Zhou C H. Effects of combining biochar-based fertilizer and milk vetch on dry matter accumulation and N use efficiencies of early rice in reddish paddy field of south China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2020, 26(9): 1732-1739. (in Chinese with English abstract)
- [25] 原鲁明, 赵立欣, 沈玉君, 尚书旗, 孟海波. 我国生物炭基肥生产工艺与设备研究进展[J]. *中国农业科技导报*, 2015, 17(4): 107-113.
Yuan L M, Zhao L X, Shen Y J, Shang S Q, Meng H B. Progress on biochar-based fertilizer production technology and equipment in China[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology (Beijing)*, 2015, 17(4): 107-113. (in Chinese with English abstract)
- [26] Kimani S M, Bimantara P O, Kautsar V. Poultry litter biochar application in combination with chemical fertilizer and Azolla green manure improves rice grain yield and nitrogen use efficiency in paddy soil[J]. *Biochar*, 2021, 3(4): 591-602.
- [27] Roy A, Pyne S, Chaturvedi S. Effect of enriched biochar based fertilizers on growth, yield and nitrogen use efficiency in direct-seeded rice (*Oryza sativa*)[J]. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 91(3): 459-463.
- [28] Jia Y, Hu Z, Ba Y. Application of biochar-coated urea controlled loss of fertilizer nitrogen and increased nitrogen use efficiency[J]. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2021, 8(1): 3.
- [29] Dong D, Wang C, van Zwieten L. An effective biochar-based slow-release fertilizer for reducing nitrogen loss in paddy fields[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(8): 3027-3040.
- [30] 武玉, 徐刚, 吕迎春, 邵宏波. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(1): 68-79.
Wu Y, Xu G, Lu Y C, Shao H B. Effects of biochar amendment on soil physical and chemical properties [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2014, 29(1): 68-79. (in Chinese with English abstract)
- [31] 乔志刚, 陈琳, 李恋卿, 刘福礼, 胡仁健, 郑金伟, 俞欣妍, 王家芳, 潘根兴. 生物质炭基肥对水稻生长及氮素利用率的影响[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(5): 175-180.
Qiao Z G, Chen L, Li L Q, Liu F L, Hu R J, Zheng J W, Yu X Y, Wang J F, Pan G X. Effects of biochar fertilizer on growth and nitrogen utilizing rate of rice[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(5): 175-80. (in Chinese with English abstract)
- [32] Chew J, Joseph S, Chen G. Biochar-based fertiliser enhances nutrient uptake and transport in rice seedlings[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 826: 154174.