

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.14.032

生物炭秸秆混施下氮肥后移对苏打盐碱土壤养分和水稻生长的影响

杨爱峥¹ 杜宇航¹ 王秋菊² 王小芳¹ 刘继龙¹ 李 茉¹

(1. 东北农业大学水利科学与工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省黑土保护利用研究院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为探究生物炭-秸秆混施与氮肥后移协同调控对苏打盐碱土壤养分含量、水稻生长的影响,于2024—2025年开展2年水稻田间试验。试验采用裂区设计,设置4种还田方式:对照组(CK,无秸秆还田)、9 t/hm²秸秆单独施用(F)、1 t/hm²生物炭+6 t/hm²秸秆(M1)和2 t/hm²生物炭+3 t/hm²秸秆(M2)。并设置2种施氮处理:基肥:分蘖肥:穗肥4:4:2(N1,氮肥后移)、基肥:分蘖肥:穗肥4:6(N2,常规施肥)。研究表明:与F处理相比,生物炭与秸秆混施提高了土壤养分含量与水稻光合特性,且M1处理优于M2处理。其中,M1处理返青期土壤铵态氮含量较F处理增加5.43%。氮肥后移进一步提高了拔节孕穗期土壤氮素含量,并显著增强水稻光合性能,M1N1处理叶绿素含量、气孔导度和净光合速率较M1N2处理分别显著增加8.83%、9.79%和10.42%。此外,M1N1处理同步优化了水稻籽粒氮含量、氮肥利用效率及产量,2年最高产量达到7 614.05 kg/hm²。基于熵权TOPSIS模型的综合评价结果表明,M1N1处理相对贴适度最高,评价等级为“优”。综上,采用生物炭与秸秆1:6混施耦合氮肥后移,是协同改良苏打盐碱土壤、提升水稻光合能力、实现高产与氮肥利用的有效模式。

关键词: 生物炭; 秸秆; 氮肥后移; 土壤养分; 水稻产量

中图分类号: S565.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)14-0333-10 OSID: 

Effects of Biochar Straw Combined with Nitrogen Fertilizer on Nutrients in Soda Saline-alkali Soil and Rice Growth

Yang Aizheng¹ Du Yuhang¹ Wang Qiuju² Wang Xiaofang¹ Liu Jilong¹ Li Mo¹
(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
2. Heilongjiang Province Black Soil Protection and Utilization Research Institute, Harbin 150030, China)

Abstract: Aiming to investigate the effects of biochar – straw co-application and nitrogen fertilizer on the synergistic regulation of nutrient content in sodic saline-alkali soil and rice growth, a two-year field experiment on rice was conducted from 2024 to 2025. The experiment used a split-plot design with four straw returning treatments: control (CK, no straw returning); straw alone at 9 t/hm² (F); biochar 1 t/hm² + straw 6 t/hm² (M1) and biochar 2 t/hm² + straw 3 t/hm² (M2). The base fertilizer was set: tillering fertilizer as panicle fertilizer 4:4:2 (N1, nitrogen applied later), and base fertilizer as tillering fertilizer 4:6 (N2, conventional fertilization), totally two types of nitrogen treatments. The research results indicated that: compared with treatment F, the combined application of biochar and straw increased soil nutrient content during the early growth stage and improved the photosynthetic characteristics of rice, with treatment M1 performing better than M2. Specifically, soil ammonium nitrogen in the regreening period under M1 was increased by 5.43% compared with that of treatment F. The deferred application of nitrogen fertilizer further enhanced soil nitrogen content during the jointing and panicle initiation stages and significantly improved rice photosynthetic performance. SPAD, stomatal conductance, and net photosynthetic rate under treatment M1N1 were significantly higher than those

收稿日期: 2026-01-30 修回日期: 2026-03-01
基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1500600)、国家自然科学基金项目(52379036)、黑龙江省自然科学基金项目(ZL2024E004)、北大荒信息有限公司水稻田需水模型开发项目(BDHXX-JS-2025050)和自然资源要素耦合过程与效应重点实验室开放课题(2024KFKT012)
作者简介: 杨爱峥(1986—),男,副教授,博士生导师,主要从事农业水土资源高效利用和盐碱土改良研究,E-mail: aizheng.yang@neau.edu.cn
通信作者: 李茉(1988—),女,教授,博士生导师,主要从事变化环境下农业水土资源高效利用与管理研究,E-mail: limo0828@neau.edu.cn

under M1N2 by 8.83% , 9.79% , and 10.42% , respectively. In addition, M1N1 simultaneously optimized rice grain nitrogen content , nitrogen use efficiency, and yield, with the highest two-year yield reaching 7 614.05 kg/hm². The comprehensive evaluation results based on the entropy weight TOPSIS model indicated that the M1N1 treatment had the highest relative closeness, with an evaluation grade of ‘excellent’. In summary, the combined application of biochar and straw at 1:6 ratio along with nitrogen fertilizer was an effective model for synergistically ameliorating sodic saline-alkali soil, enhancing rice photosynthetic capacity, and achieving high yield and nitrogen utilization.

Key words: biochar; straw; nitrogen fertilizer relocation; soil nutrients; rice yield

0 引言

土壤盐碱化是制约农业可持续发展的关键障碍之一,对农业生产力和生态安全构成严重威胁^[1]。松嫩平原作为我国重要的粮食生产区,总面积约 1.7 × 10⁷ hm²,其中盐碱化土壤面积达 3.42 × 10⁶ hm²,主要盐分组成为碳酸钠(Na₂CO₃)和碳酸氢钠(NaHCO₃),属于典型的苏打盐碱土。该类土壤普遍表现出氮、磷、钾等基础养分含量低,微生物活性受抑制,养分转化能力弱等问题^[2-3]。研究表明,盐碱胁迫通过引发离子毒害及营养失衡等多重机制,抑制植物生长发育^[4]。因此,系统改善苏打盐碱地的养分供应条件、缓解盐碱胁迫,已成为推进松嫩平原盐碱地资源有效利用与生态恢复的关键。

长期秸秆焚烧和离田造成农田生态系统养分和碳直接损失^[5]。秸秆作为可再生有机物料,富含氮(N)、磷(P)、钾(K)等养分,还田后可增加土壤养分并促进植物生长^[6-7]。然而,相关研究指出,秸秆可能为病原菌(如纹枯病、稻瘟病菌)和虫卵(如二化螟)提供越冬场所,直接大量还田可能导致病虫害累积和加重^[8-9]。目前,生物炭被认为是具有重要应用前景的土壤改良材料^[10],性质稳定、孔隙丰富,不仅能有效改善土壤物理结构,还可长期固碳并减少养分流失,在提升土壤质量与作物产量方面呈现显著优势^[10-11]。然而,生物炭碱性离子含量高,大量还田会增加盐碱化风险^[12-14]。因此,合理控制生物炭施用量,采用一定比例生物炭代替秸秆还田,可为改善苏打盐碱土壤养分环境和促进作物生长提供一种可行途径。

氮肥是保证水稻高产的基础,我国农业生产耗氮量巨大,占全球总量的 30% 以上,然而氮肥利用率仍低于 40%^[15]。目前,水稻种植一般集中在作物生长前期施肥,会使大量氮素集中于土壤表层,且在碱性条件下,铵态氮易转化为气态氨并挥发至大气中,造成氮素损失,进而影响氮肥利用率^[16]。氮肥后移技术通过调控氮肥施用时序,精准调控氮素以匹配水稻中后期的养分需求,可有效抑制水稻无效分蘖萌发与生长,保障后期灌浆结实所需的养分

供应,提升氮肥利用效率^[17-18]。研究显示,合理的氮肥运筹与秸秆或生物炭耦合,会使土壤碳氮比维持在较稳定水平,保证盐碱地微生物活性,加速秸秆腐化,改善物理结构,增加土壤养分^[19]。

综上所述,尽管已有研究关注了生物炭或秸秆单施对苏打盐碱土壤养分与作物的影响。然而,关于生物炭和秸秆作为不同性质的外源碳混施,与氮肥后移技术进行耦合,对苏打盐碱土壤养分及作物生长影响的研究仍较为缺乏。基于此,本研究以生物炭与秸秆混施耦合氮肥后移的协同调控为切入点,系统解析苏打盐碱土的养分转化效率及水稻生长生理响应特征,以明确其协同增效机制,为构建松嫩平原苏打盐碱地水稻系统的碳氮协同优化与产能提升技术模式提供理论依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 试验区域概况

试验于 2024 年 5—10 月和 2025 年 5—10 月在黑龙江省齐齐哈尔市甘南县长吉岗灌区(47°99'N, 123°97'E)进行。试验区为苏打盐碱土壤,属冷温带大陆性季风气候,冬季干燥且寒冷;春季温暖多风,易出现干旱现象;夏季炎热且短暂,降雨量相对较高;秋季气温急剧下降,可能出现早霜冻现象;整体气候温和潮湿。年平均降雨量 455 mm,降雨主要集中在 6、7 月,约占总降雨量的 67%,年最低气温为 -32.4℃,年最高气温为 34.9℃。试验期间日平均气温和降雨量如图 1 所示。试验地种植作物为水稻,一年一季种植,土壤 0~20 cm 理化性质如表 1 所示。

1.2 试验设计

根据当地水稻产量,以草谷比估算秸秆产量约为 9 t/hm²,以该估算值作为秸秆还田量基准,采用秸秆与生物炭配施梯度方案,并按裂区试验设计设置处理。还田方式设 3 个水平:秸秆单独施用(F);不同比例生物炭和秸秆混施(M1 和 M2)。同时,设置氮肥后移(N1)和常规施肥(N2)2 种施肥处理,以无秸秆还田、常规施肥处理(CK)为对照组,共 7 个处理,每个处理 3 次重复,试验设计见表 2。试验小

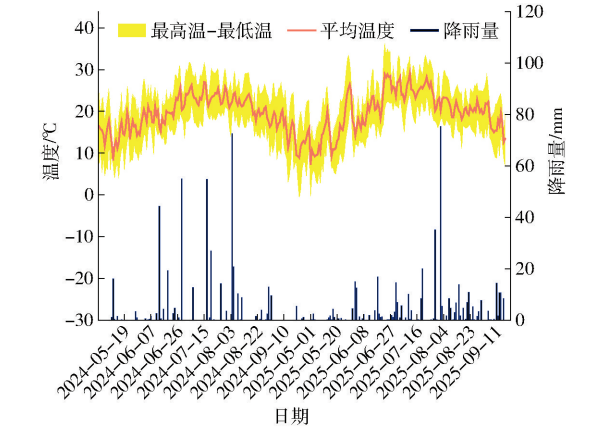


图 1 2024—2025 年温度和降雨量
Fig.1 Temperature and rainfall in 2024—2025

表 1 土壤基本理化性质

Tab.1 Basic physicochemical properties of soil						
参数	pH 值	铵态氮含量/(mg·kg ⁻¹)	硝态氮含量/(mg·kg ⁻¹)	总氮含量/(g·kg ⁻¹)	有机质含量/(g·kg ⁻¹)	有效磷含量/(mg·kg ⁻¹)
数值	8.35	3.42	2.15	0.83	8.87	20.13

表 2 试验设计

Tab.2 Experimental design			
处理名称	处理方式	施肥(基肥:分蘖肥:穗肥)	生物炭与秸秆混施质量比
CK	0	常规施肥(4:6)	0:0
FN1	秸秆 9 t/hm ²	氮肥后移(4:4:2)	0:9
FN2	秸秆 9 t/hm ²	常规施肥(4:6)	0:9
M1N1	生物炭 1 t/hm ² + 秸秆 6 t/hm ²	氮肥后移(4:4:2)	1:6
M1N2	生物炭 1 t/hm ² + 秸秆 6 t/hm ²	常规施肥(4:6)	1:6
M2N1	生物炭 2 t/hm ² + 秸秆 3 t/hm ²	氮肥后移(4:4:2)	2:3
M2N2	生物炭 2 t/hm ² + 秸秆 3 t/hm ²	常规施肥(4:6)	2:3

表 3 生物炭理化性质

Tab.3 Physicochemical properties of biochar					
参数	pH 值	粒径/mm	灰分质量分数/%	总氮质量分数/%	硫质量分数/%
数值	8.86	1.5~2.0	31.8	1.53	0.78

表 4 秸秆理化性质

Tab.4 Physicochemical properties of straw					
参数	pH 值	氮质量分数/%	碳氮比	钾质量分数/%	磷质量分数/%
数值	5.8	0.9	78:1	1.3	0.2

水稻返青期、拔节孕穗期、乳熟期和成熟期进行土壤取样。土壤样品采集深度为 0~20 cm,每个处理 3 次重复,将每个土样分成 2 份装入聚乙烯自封袋,一份置于 4℃ 冰箱中,用于测定土壤铵态氮和硝态氮含量;另一份自然风干,手动将样品中杂质挑出,备用。

1.3.2 土壤养分含量测定

土样风干后研磨过 100 目筛混合均匀,使用总

区规格为 3 m×3 m,各小区采用隔板进行围挡隔离,小区间预留 1 m 间隔作为各处理保护行,以减少相互干扰。泡田前,按试验设置将生物炭与秸秆均匀抛撒至各小区,通过旋耕机将物料与土壤混合。灌水定额与当地生产一致。施肥量为氮肥(尿素,纯氮含量 46.6%)200 kg/hm²;磷肥(重过磷酸钙,P₂O₅含量 46%)70 kg/hm²;钾肥(氯化钾,K₂O 含量 60%)90 kg/hm²。供试生物炭和秸秆基本理化性质如表 3、4 所示。

1.3 测定指标

1.3.1 土壤样品采集

各处理在分蘖期供氮水平存在差异,因此,仅在

有机碳分析仪(Elementar vario TOC,德国)测定土壤有机碳含量,乘以换算系数 1.724 则为土壤有机质含量^[20];称取新鲜土样 5 g,过 10 号筛,准确到 0.01 g,置于 200 mL 三角瓶中,加入 2 mol/L 氯化钾溶液 50 mL,塞紧塞子,在振荡机上振荡 1 h。取出静置,待土壤-氯化钾悬浊液澄清后,吸取一定量上层清液,使用全自动化学间断分析仪(Smart chem 200 型)进行铵态氮、硝态氮含量测定^[21];采用凯氏定氮法测定土壤总氮含量^[22]。

1.3.3 水稻生长动态监测

每个试验小区选择 5 株有代表性水稻植株用塑料标记卡进行标注,于返青期、分蘖期、拔节孕穗期和乳熟期,选取从上数第 3 片全展叶使用 Multispe Q 多功能叶绿素测量仪测定相对叶绿素含量(SPAD 值),测定部位为叶片中上部并避开中脉,每片叶连续测定 3 次取平均值;采用光合特性分析仪(LI-6800XT 型,美国)同步测定净光合速率、气孔导度,每片叶重复测定 3 次取平均值。

1.3.4 水稻产量及其构成要素

水稻成熟后,每小区取 1 m²植株干燥用于实际测产,重复 3 次,并取标记植株进行考种,分别测定有效穗数、单株粒数、结实率、千粒质量等产量性状指标。

1.3.5 氮肥利用效率

将籽粒干燥粉碎后采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮法和 AA3 型流动分析仪测定籽粒中全氮含量,并计算氮肥利用效率(NUE),计算式为

$$NUE = \frac{G_y G_N}{N} \tag{1}$$

式中 G_Y ——作物籽粒产量,kg/hm²
 G_N ——作物籽粒氮含量,%
 N ——施氮量,kg/hm²

1.3.6 综合评价

采用TOPSIS模型与熵权法相结合,评价不同处理对土壤养分及作物生长的影响^[23]。不同处理综合评价指标类型见表5,效应评价等级见表6。

表5 不同处理综合评价指标类型

Tab.5 Types of indicators for comprehensive evaluation of different treatments		
指标类别	评价指标	指标类型
养分指标	铵态氮含量	极大型
	硝态氮含量	极大型
	全氮含量	极大型
	有机碳含量	极大型
植物生长指标	叶绿素含量	极大型
	净光合速率	极大型
	气孔导度	极大型
产量指标	穗粒数	极大型
	结实率	极大型
	千粒质量	极大型
	产量	极大型
氮素指标	籽粒氮含量	极大型
	氮肥利用效率	极大型

表6 效应评价标准

Tab.6 Effectiveness evaluation criteria	
相对贴进度	评价效应等级
0.8~1.0	优
0.6~0.8	良
0.3~0.6	中
0~0.3	差

1.4 数据统计与分析

采用Microsoft Excel 2021整理试验数据;利用SPSS 26.0开展单因素方差分析(ANOVA)与最小显著差异法(LSD)多重比较,检验各处理间指标的差异显著性;使用Origin Pro 2023(OriginLab公司,美国)进行Pearson相关分析及绘制图形。

2 结果与分析

2.1 生物炭和秸秆混施下氮肥后移对土壤养分的影响

不同处理下土壤养分含量随水稻生育期变化如图2(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同)所示。土壤铵态氮(NH_4^+-N)和全氮(TN)含量随着生育期推进逐渐降低,在返青期含量最高。与单施秸秆相比,生物炭和秸秆混施提高了

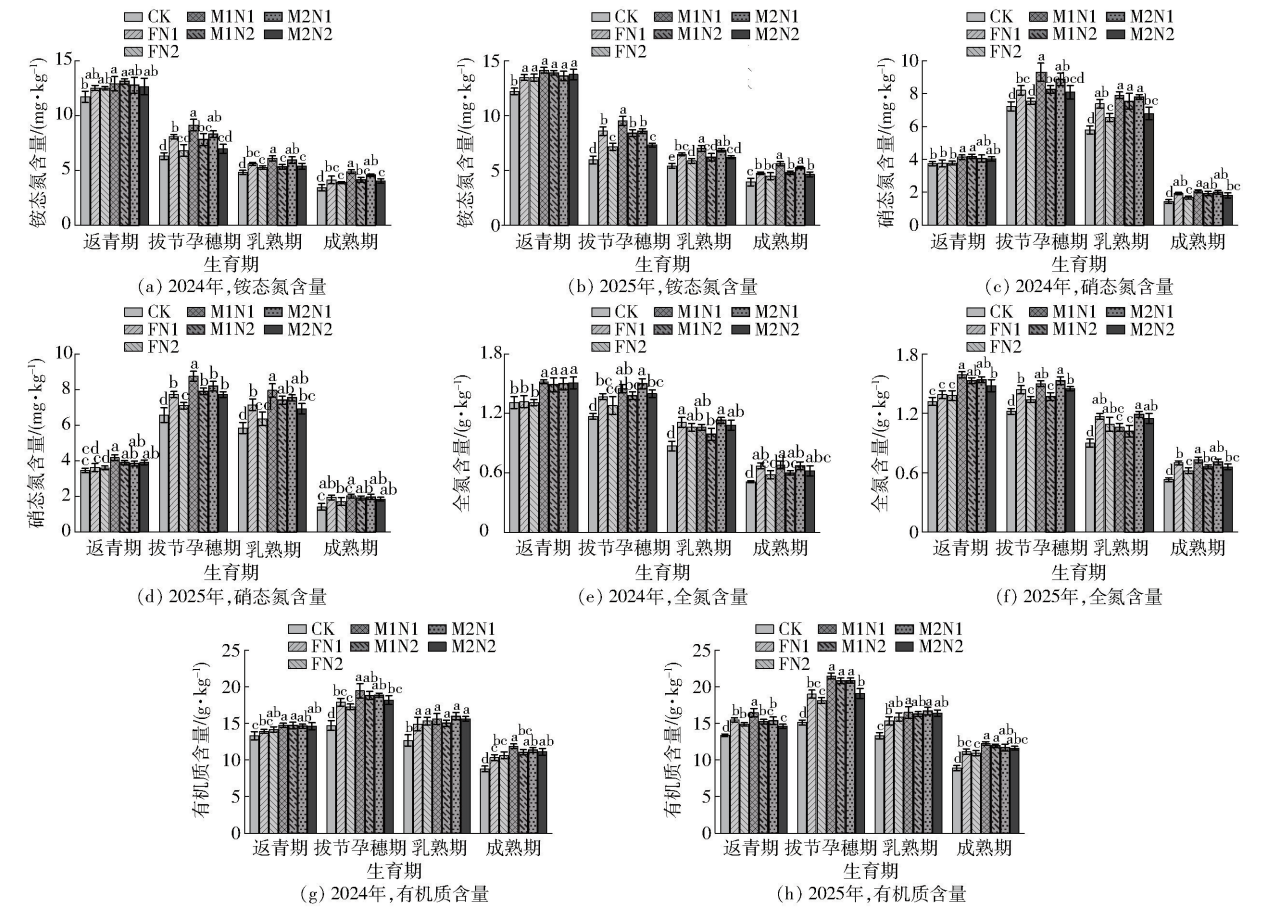


图2 不同处理下水稻不同生育期土壤养分含量

Fig.2 Soil nutrient content at different growth stages of rice under different treatments

土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量, M1 处理略高于 M2 处理但无显著差异。在返青期, 各处理氮素供应一致, M1 和 M2 处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量较 F 和 CK 处理分别平均提升 5.43%、13.39% 和 5.39%、12.81%。此外, N1 处理与 N2 处理相比显著提高拔节孕穗期土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 含量, 分别增加 10.86% ~ 19.08% 和 4.08% ~ 10.22%。各处理土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量在拔节孕穗期最高, 其中, M1N1 和 M2N1 处理土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量分别较 FN1 处理显著增加 13.3% 和 7.99%。

由图 2g、2h 可知, 在水稻生育前期, 生物炭和秸秆混施处理显著提升土壤有机质含量, 从大到小依次为 M1、M2、F、CK, 但 M1 处理与 M2 处理之间无显著差异。各处理土壤有机质含量在拔节孕穗期达到峰值。以拔节孕穗期常规施肥为例, M1N2 处理土壤有机质平均含量较 FN2 和 CK 处理分别增加 9.06% 和 27.93%。氮肥后移处理增加了有机质含量, 但与常规施肥处理没有显著差异。此外, M2 处理土壤有机质含量仅在乳熟期略高于 M1 处理, 增加 2.44%。

2.2 生物炭和秸秆混施下氮肥后移对水稻光合特性的影响

不同处理下水稻叶片叶绿素含量 (SPAD 值) 变

化如图 3a、3b 所示。2 年间各处理 SPAD 值变化趋势一致, 随着水稻的生长发育, SPAD 值快速增加, 在分蘖期 SPAD 值增幅最快, 随着水稻逐渐趋于成熟, SPAD 值逐渐下降。在相同施肥模式下, SPAD 值随着混施质量比增加呈先增高后降低趋势。以分蘖期常规施肥为例, M1N2 处理和 M2N2 处理较 FN2 处理分别显著增加 11.38% 和 8.36%, 但 2 个混施处理未达到显著差异。此外, N1 处理与 N2 处理相比显著增加混施处理拔节孕穗期的 SPAD 值, M1N1 处理较 M1N2 处理显著增加 8.83%; M2N1 处理较 M2N2 处理显著增加 6.67%。

如图 3c ~ 3f 所示, 各处理水稻叶片气孔导度和净光合速率的年际变化趋势相似。氮肥后移增加了拔节孕穗期水稻气孔导度和净光合速率, 且提升效果在 M1 处理中达到显著, M1N1 处理较 M1N2 处理显著增加 9.79% 和 10.42%。在常规施肥处理下, 生物炭和秸秆混施处理中仅 M1 处理叶片气孔导度和净光合速率显著高于单施秸秆处理, 以分蘖期为例, M1N2 处理气孔导度和净光合速率较 CK 和 FN2 处理分别平均增加 22.68%、7.26% 和 24.63%、8.91%。此外, 仅在拔节孕穗期, M1 处理净光合速率较 M2 处理显著增加 8.51%, 其余生育期 M1 处理略高于 M2 处理差异不显著。

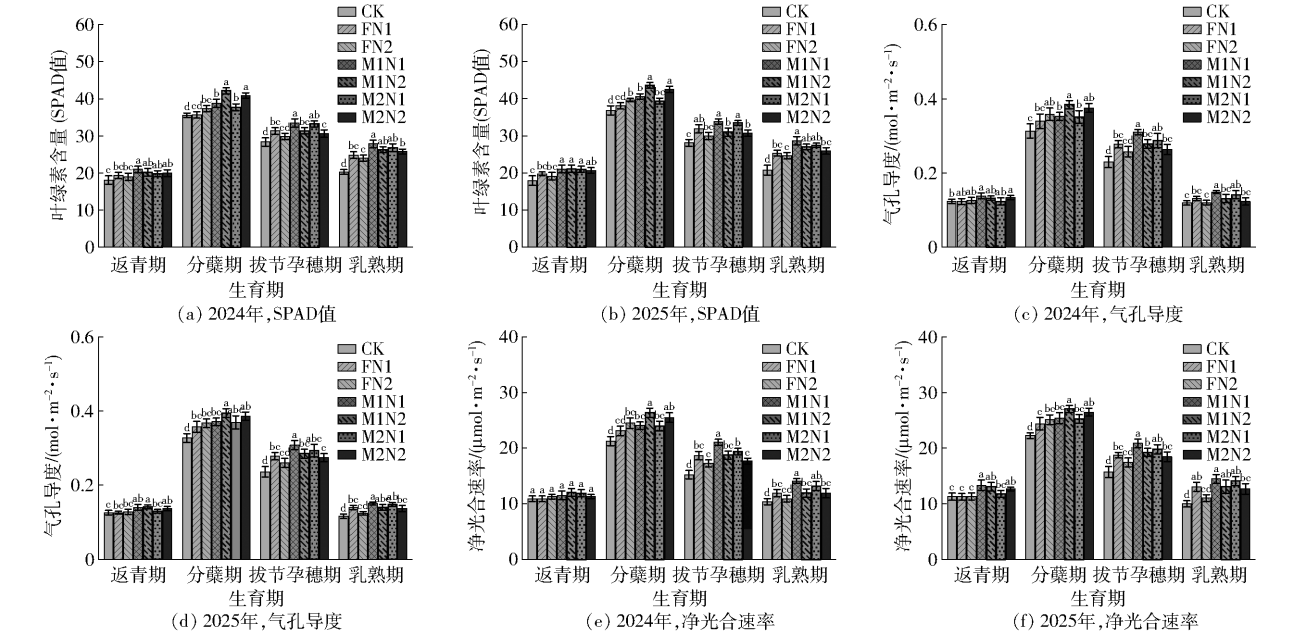


图 3 不同处理下水稻不同生育期叶片叶绿素含量、气孔导度和净光合速率
Fig. 3 SPAD value, stomatal and net photosynthetic rate of rice leaves at different growth stages under different treatments

2.3 生物炭和秸秆混施下氮肥后移对籽粒氮含量和氮肥利用效率的影响

如图 4 所示, 不同处理对水稻籽粒氮含量 (GNC) 和氮素利用效率 (NUE) 年际影响效果相似。与单施秸秆相比, M1 处理水稻 GNC 提升幅度高于

M2 处理但无显著差异。以常规施肥为例, M1N2 处理 GNC 分别较 CK 处理和 FN2 处理平均增加 13.03%、5.92%。与 N2 处理相比, M1N1 处理 GNC 较 M1N2 处理显著增加 9.63%。此外 NUE 变化规律与 GNC 一致, 与单施秸秆相比, M1 处理 NUE 显

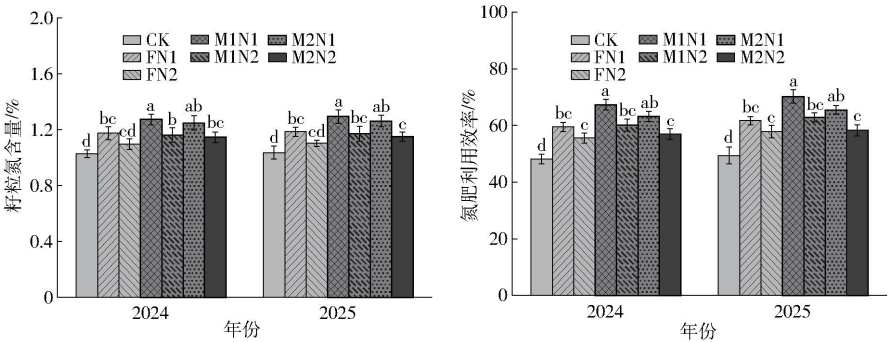


图4 不同处理下水稻籽粒氮含量和氮肥利用效率变化

Fig. 4 Rice grain nitrogen content and nitrogen fertilizer use efficiency under different treatments

著增加,且 N1 处理进一步扩大增加幅度。

2.4 生物炭和秸秆混施下氮肥后移对水稻产量及其构成的影响

不同处理下水稻产量及其构成如表 7 所示。各处理穗粒数、结实率、千粒质量和产量变化趋势基本一致。与 CK 处理相比,M1 处理对产量构成要素提升幅度略高于 M2 处理,穗粒数增加 13. 29%,结实率增加 2. 95%,千粒质量增加 9. 95%。在相同施氮条件下,M1N2 处理和 M2N2 处理产量较 CK 处理平均分别显著增加 37. 17% 和 27. 22%,M1 处理与 M2 处理无显著差异。在相同混施质量比下,N1 处理较 N2 处理提升效果进一步增大,平均增加 13. 31%。

2.5 相关性分析

图 5(图中 * 表示显著(0. 01 ≤ P < 0. 05), ** 表示极显著(P < 0. 01))为氮肥利用效率、籽粒氮含量、土壤养分含量、水稻光合指标、产量(Yield)及其构成之间的相关性关系。各土壤养分指标整体呈正相关,其中,铵态氮含量和硝态氮含量与其他指标均

表 7 不同处理下水稻产量及其构成

Tab. 7 Rice yield and its composition under different treatments

年份	处理	穗粒数	结实率/ %	千粒质量/ g	产量/ (kg·hm ⁻²)
2024	M1N1	88. 00 ^a	86. 74 ^a	25. 84 ^a	7 214. 92 ^a
	M1N2	84. 00 ^{ab}	82. 79 ^b	24. 17 ^{bc}	6 364. 95 ^{bc}
	M2N1	85. 67 ^a	84. 01 ^{ab}	24. 60 ^{ab}	6 744. 41 ^{ab}
	M2N2	81. 67 ^c	80. 81 ^b	23. 94 ^c	5 984. 75 ^{bc}
	FN1	84. 67 ^{ab}	83. 58 ^b	24. 71 ^b	6 320. 89 ^{bc}
	FN2	81. 33 ^{cd}	76. 94 ^c	23. 77 ^{cd}	5 679. 60 ^c
	CK	77. 67 ^d	72. 84 ^d	23. 50 ^d	5 049. 80 ^d
2025	M1N1	88. 67 ^a	87. 34 ^a	26. 62 ^a	7 614. 05 ^a
	M1N2	84. 33 ^{ab}	83. 27 ^{bc}	25. 20 ^{bc}	6 507. 91 ^{bc}
	M2N1	86. 33 ^a	85. 53 ^{ab}	25. 34 ^{ab}	6 839. 13 ^{ab}
	M2N2	81. 67 ^c	83. 23 ^{bc}	24. 66 ^c	6 125. 18 ^{bc}
	FN1	85. 67 ^{ab}	84. 09 ^{ab}	24. 90 ^b	6 527. 22 ^{bc}
	FN2	81. 00 ^{cd}	79. 25 ^{cd}	24. 48 ^{cd}	5 729. 50 ^c
	CK	78. 33 ^d	75. 03 ^d	24. 21 ^d	5 047. 89 ^d

注:同列不同小写字母表示同一年份处理间差异显著(0. 01 ≤ P < 0. 05)。

呈现显著正相关;氮肥利用效率和产量与全氮含量、

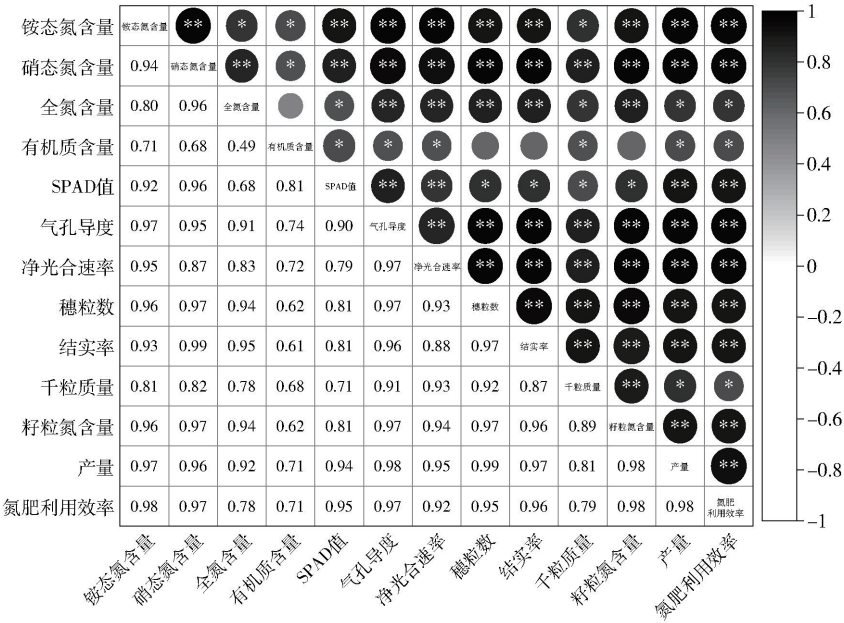


图5 土壤养分与水稻生理指标相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of soil nutrients and physiological indicators of rice

有机质含量呈显著正相关($P < 0.05$),与铵态氮含量、硝态氮含量、叶绿素含量、气孔导度、净光合速率、穗粒数、结实率呈极显著正相关($P < 0.01$)。此外,水稻光合指标与土壤养分含量同样表现出较强的正相关。

2.6 综合评价

基于熵权 TOPSIS 模型对各处理土壤养分指标、植株生长指标、产量指标及氮素指标进行综合评分(表 8)。由表 8 可知,在常规施氮条件下,M1N2 相对贴近度显著高于 FN2 和 CK 处理,分别平均高 0.198 和 0.521。在氮肥后移条件下,M1、M2 和 F 处理相对贴近度显著增加,上升幅度分别为 0.202、0.154 和 0.136。M1N1 处理相对贴近度最高,为 0.866,被评为“优”等级。

表 8 不同处理贴合度和效应等级

Tab. 8 Fit and effect sizes of different treatments

处理	正理想解 距离	负理想解 距离	相对贴 近度	排序	效应 等级
M1N1	0.018	0.311	0.866	1	优
M1N2	0.115	0.228	0.664	3	良
M2N1	0.093	0.246	0.725	2	良
M2N2	0.149	0.198	0.571	5	中
FN1	0.137	0.208	0.602	4	良
FN2	0.198	0.173	0.466	6	中
CK	0.311	0.052	0.143	7	差

注:各处理数据为 2 年平均值。

4 讨论

4.1 生物炭和秸秆混施下氮肥后移对土壤养分的影响

碳(C)与氮(N)是作物生长发育不可或缺的矿物质营养元素,在苏打盐碱土中含量普遍偏低^[24]。本研究发现,生物炭代替一定比例秸秆还田,通过协同效应显著增加了土壤铵态氮、硝态氮、全氮及有机质含量,且改良效果优于单施秸秆处理,但 2 种混施处理间无显著差异。这可能是因为:①秸秆具有高碳氮比(C/N)特性,在分解初期会消耗土壤中的有效氮素,造成土壤氮素含量降低^[25]。②生物炭通过抑制硝化作用和氨化作用,减少土壤中氮素流失,从而增加土壤有效氮含量^[12]。③生物炭具有高比表面积和强吸附性,能吸附土壤有机分子,并推动小分子有机物聚合形成稳定的土壤有机质^[10-11]。此外,由于生物炭与秸秆所含碳源种类不同,生物炭与秸秆混施还田后可同步增加易分解碳与高稳定性芳香碳的输入,使土壤碳组分与碳含量增加^[24]。但高比例生物炭与秸秆混施并没有表现出显著优势。可能原因在于:秸秆腐解过程会逐步释放铵态氮、硝态氮等

速效养分,对生育期内养分供给贡献较直接^[26];而生物炭结构稳定、可降解性低,短期内对微生物驱动的养分矿化与循环促进作用有限^[27]。同时,相同施肥模式下,混施处理第 2 年土壤养分含量提升幅度更大,这可能因为生物炭稳定性强能提供持久的养分库和土壤结构支持,从而进一步提高土壤养分积累和氮素利用效率。

本研究结果进一步表明,与常规施肥处理相比,氮肥后移可显著提高拔节孕穗期土壤氮素含量。这与 Gao 等^[28]研究结论一致:外源有机物输入可通过调控硝化过程影响土壤氮素周转及其有效性,因此有必要与施氮时期进行协同优化,以提高氮肥利用效率并降低潜在环境损失。原因可能在于:氮肥后移通过优化供氮时序,使氮素供应更贴合水稻中后期的吸收高峰,从而降低前期供氮偏多引发的氮素流失与氨挥发风险^[18]。此外,氮肥后移与生物炭和秸秆混施耦合后呈现更强的增氮效应。这是由于秸秆碳氮比较高,微生物在分解秸秆时会固定土壤中的无机氮,氮肥后移通过减少前期氮肥投入,有助于避免在微生物活性较强阶段出现氮供应过剩被固持现象,从而减轻非有效固持并提升土壤可供氮水平^[29-30]。

4.2 生物炭和秸秆混施下氮肥后移对水稻光合特性的影响

叶片中约 75% 的氮以蛋白质形式存在于叶绿体中,直接参与光合机构构建与功能维持^[30]。然而,盐胁迫不仅抑制作物对氮素的吸收,还会加速叶绿素降解,进而影响光合碳同化能力。本研究发现,与单独秸秆还田相比,M1 处理能够显著提高水稻拔节孕穗期的 SPAD 值、气孔导度与净光合速率。这一现象可能源于以下机制:①生物炭和秸秆混施提高了土壤氮素含量,为作物生长提供了稳定的养分供应环境,促进了叶绿素合成^[30-31]。②生物炭和秸秆混施通过降低土壤 pH 值和盐离子浓度,减轻渗透胁迫和离子毒害,促进根系发育和养分吸收,提高了叶片气孔导度,改善叶肉细胞 CO₂ 供应状况,进而提高叶片光合速率^[32]。然而,当生物炭以较高施用量还田时,其较强的吸附与固持能力可能对土壤铵态氮等速效养分产生明显“截留”效应,尽管这有助于降低氮素淋失与挥发风险,但也可能延缓无机氮的释放与作物可利用性。在作物生长的关键需氮阶段,易造成短期氮素供给不足,进而抑制叶绿素合成与光合能力形成^[33]。此外,本研究还发现,与常规施肥处理相比,氮肥后移处理有效缓解叶绿素含量、气孔导度与净光合速率下降幅度。这主要是因为氮肥后移优化了水稻生育后期的氮素供应,有助

于维持叶绿素水平,延缓灌浆期间叶绿素降解速度^[17-18]。其次,氮肥后移通过保障生育后期蛋白酶合成所需的氮素供应,维持超氧化物歧化酶等保护酶活性,减轻强光等环境胁迫对光合系统造成的氧化损伤,延缓叶片功能衰退^[34]。

4.3 生物炭和秸秆混施下氮肥后移对籽粒氮含量、水稻产量和氮肥利用效率的影响

苏打盐碱地因较差的理化性质,导致土壤肥力低下,严重制约了水稻对养分的吸收利用,使得养分利用效率普遍偏低^[2]。本研究结果表明,采用生物炭与秸秆混施耦合氮肥后移管理策略,能显著提升水稻氮素利用效率。这一提升主要归因于以下协同机制:①生物炭和秸秆混施不仅通过降低氮素氨挥发和淋溶等途径的损失,提高土壤中的氮素含量,还为土壤微生物提供了丰富的有机碳源,增强了微生物活性和代谢功能,这种微生物活性的增强加速了秸秆中有机质分解,从而进一步促进了水稻的氮素吸收和利用^[7,11,35]。②氮肥后移匹配水稻中后期的养分需求,保障后期灌浆结实所需的养分供应^[17-18]。③生物炭和秸秆混施下氮肥后移通过促进叶绿素和净光合速率提升,为籽粒灌浆提供更充足的光合产物,进而提高籽粒氮素含量与最终产量^[36]。同时,生物炭与秸秆混施还田还对水稻产量构成要素产生显著影响。主要机制在于改善生育后期养分供给,促进干物质积累并减少退化颖花,从而

提高穗粒数、结实率与千粒质量。另一方面,秸秆在生长中后期腐解加快、养分释放增强,可进一步促进穗部性状优化,最终实现产量最大化^[37]。本研究结果证实生物炭和秸秆混施处理能有效提高苏打盐碱地水稻产量,通过生物炭 1 t/hm²与秸秆 6 t/hm²混施耦合氮肥后移以优化供氮时序的综合管理策略,能够有效调节苏打盐碱土壤养分环境,是协同提高水稻产量、籽粒氮含量及氮肥利用效率的有效方式。

5 结论

(1)生物炭和秸秆 1:6混施耦合氮肥后移显著增加拔节孕穗期土壤碳氮含量,促进土壤碳氮稳定性,从而优化了苏打盐碱土的养分环境,且改良效果优于高混施质量比处理,为作物生长提供更为有利条件。

(2)生物炭和秸秆混施耦合氮肥后移能显著提高水稻叶绿素含量、气孔导度和净光合速率,且改良效果优于单施秸秆处理,进一步提升水稻籽粒氮含量和氮素利用效率,有助于水稻干物质质量积累和产量提升。

(3)通过 TOPSIS 模型分析发现,生物炭和秸秆混施质量比为 1:6时耦合氮肥后移,在提高氮肥利用效率的同时,表现出最优效应等级,是所有试验处理中最适合改善苏打盐碱地土壤养分环境、提升水稻氮素利用效率和水稻产量方案。

参 考 文 献

[1] Singh A. Soil salinity: a global threat to sustainable development[J]. Soil Use and Management, 2022, 38(1): 39-67.

[2] Mohanavelu A, Naganna S R, Al-Ansari N. Irrigation induced salinity and sodicity hazards on soil and groundwater: an overview of its causes, impacts and mitigation strategies[J]. Agriculture, 2021, 11(10): 983.

[3] 赵军跃,王维玲,王佳辉,等. 不同类型改良剂配施肥料对盐碱土盐分和玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2025, 41(17): 80-88.

Zhao Junyue, Wang Weiling, Wang Jiahui, et al. Effects of suitable amendment combined with fertilizers on soil salinity and maize yield in saline alkali land[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(17): 80-88. (in Chinese)

[4] Yang S, Xu Y, Tang Z, et al. The impact of alkaline stress on plant growth and its alkaline resistance mechanisms[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024, 25(24): 13719.

[5] 熊志豪,刘君权,叶琳,等. 稻油轮作系统秸秆直接还田与焚烧还田的作物产量和养分表现平衡特征[J]. 中国农业科学, 2025, 58(16): 3293-3303.

Xiong Zhihao, Liu Junquan, Ye Lin, et al. Characterization of crop yield and nutrient apparent balance between direct and burning straw return in rice-rapeseed rotation system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2025, 58(16): 3293-3303. (in Chinese)

[6] Yang S, Wang Y, Liu R, et al. Improved crop yield and reduced nitrate nitrogen leaching with straw return in a rice-wheat rotation of Ningxia irrigation district[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 9458.

[7] Chen L, Sun S, Yao B, et al. Effects of straw return and straw biochar on soil properties and crop growth: a review[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 986763.

[8] Abbas M, Saleem M, Hussain D, et al. Review on integrated disease and pest management of field crops[J]. International Journal of Tropical Insect Science, 2022, 42(5): 3235-3243.

[9] 苏瑶,杨艳华,贾生强,等. 秸秆还田下的主要产地环境问题及其绿色防控技术[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(6): 711-717.

Su Yao, Yang Yanhua, Jia Shengqiang, et al. Main problems of agricultural production areas after straw returning and the

- respective green control technologies[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(6): 711 – 717. (in Chinese)
- [10] Bhattacharyya P N, Sandilya S P, Sarma B, et al. Biochar as soil amendment in climate-smart agriculture: opportunities, future prospects, and challenges[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2024, 24(1): 135 – 158.
- [11] 陈斐杰, 夏会娟, 刘福德, 等. 生物质炭特性及其对土壤性质的影响与作用机制[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(1): 161 – 172.
- Chen Feijie, Xia Huijuan, Liu Fude, et al. Characteristics of biochar and its effects and mechanism on soil properties[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(1): 161 – 172. (in Chinese)
- [12] 杨爱峥, 李宏宇, 王秋菊, 等. 减氮配施生物炭对苏打盐碱土壤环境与大豆生长特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2025, 56(8): 602 – 613.
- Yang Aizheng, Li Hongyu, Wang Qiuju, et al. Effect of nitrogen reduction with biochar application on soda saline soil environment and growth characteristics of soybean[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025, 56(8): 602 – 613. (in Chinese)
- [13] Huang K, Li M, Li R, et al. Soil acidification and salinity: the importance of biochar application to agricultural soils[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1206820.
- [14] Premalatha R P, Poorna B J, Nivetha E, et al. A review on biochar's effect on soil properties and crop growth[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2023, 11: 1092637.
- [15] Guo X, Jiang H, Lan Y, et al. Optimization of nitrogen fertilizer management for improving rice grain yield and nutrient accumulation and mobilization in saline-alkaline soils[J]. *Crop Science*, 2020, 60(5): 2621 – 2632.
- [16] 刘慧, 焦岩, 窦婉毓, 等. 减氮配施生物炭对土壤肥力和水稻产量的补偿效应与机制[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(9): 391 – 401, 469.
- Liu Hui, Jiao Yan, Dou Wanyu, et al. Compensation effect and mechanism of nitrogen reduction combined with biochar application on soil fertility and rice yield[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(9): 391 – 401, 469. (in Chinese)
- [17] Zhou Yan, Xu Lei, Zhang Jianwei, et al. Low N apparent surplus with higher rice yield under long-term fertilizer postponing in the rice-wheat cropping system[J]. *The Crop Journal*, 2022, 10(4): 1178 – 1186.
- [18] 赵凯男, 丁豪, 刘阿康, 等. 氮肥减量后移改善植株光合特性提高麦-玉周年产量及经济效益[J]. *中国农业科学*, 2024, 57(5): 868 – 884.
- Zhao Kainan, Ding Hao, Liu Akang, et al. Nitrogen fertilizer reduction and postponing for improving plant photosynthetic physiological characteristics to increase wheat – maize annual yield and economic return[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(5): 868 – 884. (in Chinese)
- [19] 宋佳杰, 徐郗阳, 白金泽, 等. 秸秆还田配施化肥对土壤养分及冬小麦产量的影响[J]. *环境科学*, 2022, 43(9): 4839 – 4847.
- Song Jiajie, Xu Xiyang, Bai Jinze, et al. Effects of straw returning and fertilizer application on soil nutrients and winter wheat yield[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(9): 4839 – 4847. (in Chinese)
- [20] 郑云珠, 孙树臣. 秸秆生物炭和秸秆对麦玉轮作系统土壤养分及作物产量的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2023, 25(2): 152 – 162.
- Zheng Yunzhu, Sun Shuchen. Effects of straw biochar and straw on soil nutrients and crop yield in wheat-maize rotation system [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2023, 25(2): 152 – 162. (in Chinese)
- [21] 朱彩丽, 黄宝灵, 黄娟萍, 等. 广西 3 种珍贵树种人工林土壤养分状况及酶活性比较[J]. *南方农业学报*, 2015, 46(11): 1953 – 1957.
- Zhu Caili, Huang Baoling, Huang Juanping, et al. Comparison on soil nutrient status and enzyme activity in 3 species of rare trees in Guangxi[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2015, 46(11): 1953 – 1957. (in Chinese)
- [22] 高飞, 陈素贤, 杜晓玉, 等. FOSS Kjeltac 8400 全自动凯式定氮仪测定土壤全氮方法探讨[J]. *天津农业科学*, 2022, 28(9): 76 – 80.
- Gao Fei, Chen Suxian, Du Xiaoyu, et al. FOSS Kjeltac 8400 automatic Kjeldahl nitrogen determinator for determination of total nitrogen in soil[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2022, 28(9): 76 – 80. (in Chinese)
- [23] 姜芸, 王军, 滕浩, 等. 基于 TOPSIS 模型的典型黑土区耕地质量评价及土壤侵蚀耦合协调分析[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(12): 82 – 94.
- Jiang Yun, Wang Jun, Teng Hao, et al. Coupling coordination analysis of the quality evaluation of cultivated land and soil erosion in typical black soil areas using TOPSIS method[J]. *Transactions of the CSAE*, 2023, 39(12): 82 – 94. (in Chinese)
- [24] 王洁, 单燕, 马兰, 等. 秸秆/生物质炭协同还田措施对黄河三角洲盐碱土壤的改良效果研究[J]. *生态环境学报*, 2023, 32(1): 90 – 98.
- Wang Jie, Shan Yan, Ma Lan, et al. Effects of straw and biochar synergistic returning on the improvement of salt-affected soil in the Yellow River Delta[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2023, 32(1): 90 – 98. (in Chinese)

[25] 彭家豪,林少颖,王维奇,等. 秸秆与生物炭施加对茉莉园土壤真菌群落及有机碳库特征的影响[J]. 环境科学, 2024, 45(7): 4228–4240.
Peng Jiahao, Lin Shaoying, Wang Weiqi, et al. Effects of straw and biochar amendments on haracteristics of soil fungal community and organic carbon pool in Jasminum sambac garden[J]. Environmental Science, 2024, 45(7): 4228–4240. (in Chinese)

[26] Zeng L, Zhang X, Zhang S Q, et al. Characteristics of decomposition, nutrient release and structure change of wheat straw in a fluvo-aquic soil under different nitrogen application rates[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(9): 1565–1577.

[27] 方婧,金亮,程磊磊,等. 环境中生物质炭稳定性研究进展[J]. 土壤学报, 2019, 56(5): 1034–1047.
Fang Jing, Jin Liang, Cheng Leilei, et al. Advancement in research on stability of biochar in the environment[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(5): 1034–1047. (in Chinese)

[28] Gao J, Ran C, Hou H, et al. Synergistic improvement of straw decomposition and rice yield in saline sodic paddy soils by rational nitrogen application[J]. Plant and Soil, 2025, 510(1): 239–257.

[29] 周斯豪,王美琦,宋瑶,等. 长期秸秆还田对下茬还田秸秆的降解及土壤微生物群落的影响[J]. 环境科学, 2025, 46(1): 532–542.
Zhou Sihao, Wang Meiqi, Song Yao, et al. Legacy effects of long-term straw returning on straw degradation and microbial communities of the aftercrop[J]. Environmental Science, 2025, 46(1): 532–542. (in Chinese)

[30] 段永康,杨海燕,吴文龙,等. 植物氮素吸收、转运和同化的分子机制[J]. 福建农业学报, 2022, 37(4): 547–554.
Duan Yongkang, Yang Haiyan, Wu Wenlong, et al. Molecular mechanisms of nitrogen absorption, transport, and assimilation in plants[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2022, 37(4): 547–554. (in Chinese)

[31] Song X, Li H, Song J, et al. Biochar/vermicompost promotes hybrid *Pennisetum* plant growth and soil enzyme activity in saline soils[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2022, 183: 96–110.

[32] 牛文娟,须吴潇,陈新宝,等. 秸秆、生物炭与沼液配施对土壤特性和作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2025, 41(24): 122–132
Niu Wenjuan, Xu Wuxiao, Chen Xinbao, et al. Effects of combined application of straw, biochar and biogas slurry on soil characteristics and crop yield[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(24): 122–132. (in Chinese)

[33] 王翰琨,吴永波,刘俊萍,等. 生物炭对土壤氮循环及其功能微生物的影响研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(6): 689–701.
Wang Hankun, Wu Yongbo, Liu Junping, et al. A review of research advances in the effects of biochar on soil nitrogen cycling and its functional microorganisms[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(6): 689–701. (in Chinese)

[34] 张作合,周利军,李浩宇,等. 节水灌溉减氮配施生物炭对水稻光合特性与水氮利用的影响[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 386–395, 438.
Zhang Zuohe, Zhou Lijun, Li Haoyu, et al. Effect of water-saving irrigation and nitrogen reduction combined with biochar application on photosynthetic characteristics and water and nitrogen utilization of rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 386–395, 438. (in Chinese)

[35] Li X, Yao T, Huang X, et al. 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.

[36] 张世洁,张刚,王德建,等. 秸秆还田配施氮肥对稻田增产及田面水氮动态变化的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 435–445.
Zhang Shijie, Zhang Gang, Wang Dejian, et al. Effects of straw returning coupled with application of nitrogen fertilizer on rice yield and dynamics of nitrogen in surface water of paddy field[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(2): 435–445. (in Chinese)

[37] 李志欣,胡明明,唐源,等. 氮钾肥适宜配比促进机直播水稻干物质和养分的积累转运及增产[J]. 植物营养与肥料学报, 2025, 31(2): 267–281.
Li Zhixin, Hu Mingming, Tang Yuan, et al. Suitable partition ratios of nitrogen and potassium fertilizers increase the accumulation and translocation of dry matter and nutrient and the yield of mechanically direct-seeded rice[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2025, 31(2): 267–281. (in Chinese)