

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

刘慧^{1,2} 焦岩³ 窦婉毓³ 张文龙³ 裴巍¹

(1. 东北农业大学文理学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030; 3. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 氮素是水稻生长所必需的营养元素。为了提高产量往往过量施加氮肥,这不仅导致氮肥利用率低,还破坏了土壤质量,减少氮肥施用则会导致水稻减产。为探究土壤改良剂(生物炭)能否补偿减氮带来的负面影响,本研究采用盆栽试验,设置常规施氮(氮肥施用量 110 kg/hm², CK)、减氮 10% (C1)及减氮 10% 条件下配施 2.5% 生物炭 (C2)和 5% 生物炭 (C3)4 个处理,探讨在减少氮肥使用条件下生物炭对土壤肥力及水稻产量的补偿效应及机制。结果表明:减氮 10% 对土壤综合肥力无显著影响,施加生物炭可有效地提高土壤肥力,且添加 5% 生物炭对土壤肥力的提升效果优于添加 2.5% 生物炭。减氮 10% 导致水稻产量显著降低,而生物炭施加可一定程度补偿减氮造成的减产,其中添加 2.5% 生物炭对水稻产量的补偿效果优于添加 5% 生物炭,但仍未恢复到常规施氮水平。采用结构方程探究减氮和施加生物炭条件下水稻产量的驱动因素,结果表明,减氮配施生物炭通过改变土壤 pH 值、全钾含量、铵态氮含量和硝态氮含量,进而直接或间接影响水稻产量,其中铵态氮含量和硝态氮含量是主要的调控因子,其不仅直接影响水稻产量,还可通过调控每穗粒数、有效穗数和千粒质量间接影响水稻产量的形成;pH 值和全钾含量对水稻产量有负面效应。本研究可为东北黑土区水稻种植业化肥减量和生物炭的高效利用提供科学依据。

关键词: 水稻产量; 土壤肥力; 减氮; 生物炭; 结构方程模型

中图分类号: S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)09-0391-11

OSID:



Compensation Effect and Mechanism of Nitrogen Reduction Combined with Biochar Application on Soil Fertility and Rice Yield

LIU Hui^{1,2} JIAO Yan³ DOU Wanyu³ ZHANG Wenlong³ PEI Wei¹

(1. College of Arts and Sciences, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of High Efficiency Utilization of Agricultural Water Resources,

Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

3. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Nitrogen is an essential nutrient for the growth of rice. In order to increase yield, excessive application of nitrogen fertilizer often leads to low nitrogen utilization efficiency and also damages soil quality. Reducing the application of nitrogen fertilizer will lead to a decrease in rice yield. It is worth exploring whether biochar, as a soil amendment, can compensate for the negative effects of nitrogen reduction. A pot experiment was conducted to investigate the compensatory effects and mechanisms of biochar on soil fertility and rice yield under four conditions: conventional nitrogen application (nitrogen fertilizer application rate of 110 kg/hm², CK), 10% nitrogen reduction (C1), and 2.5% (C2) and 5% (C3) concentration biochar application under 10% nitrogen reduction. The results showed that the nitrogen fertilizer reduced by 10% had no significant effect on soil comprehensive fertility. Applying biochar could effectively improve soil fertility, and 5% concentration of biochar had better effect on soil fertility than that of 2.5% concentration. Reducing nitrogen by 10% significantly reduced rice yield, and the application of biochar can compensate for the reduction caused by nitrogen reduction to some extent.

收稿日期: 2023-12-05 修回日期: 2024-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479033)、黑龙江省博士后科学基金项目(LBH-Z17017)和东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室开放项目(2017009)

作者简介: 刘慧(1981—),女,副教授,博士,主要从事水土保持理论与技术研究,E-mail: xiaolaida@163.com

通信作者: 裴巍(1985—),男,副教授,博士,主要从事农业水土资源系统研究,E-mail: peiwei0308@126.com

Among them, the compensation effect of 2.5% concentration of biochar on rice yield was better than that of 5% concentration, but it had not yet returned to the conventional nitrogen application level. Exploring the driving factors of rice yield under nitrogen reduction and biochar application conditions by using structural equations, the results showed that reducing nitrogen fertilizer combined with biochar can directly or indirectly affect rice yield by changing soil pH value, total potassium, ammonium nitrogen, and nitrate nitrogen content. Among them, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen content were the main regulatory factors, which not only directly affected rice yield, but also indirectly affected the formation of rice yield by regulating the number of grains per panicle, effective panicle, and thousand grain weight; pH value and total potassium content had negative effects on rice yield. The research result can provide scientific basis for the reduction of fertilizer and efficient utilization of biochar in rice cultivation in the black soil area of Northeast China.

Key words: rice yield; soil fertility; nitrogen reduction; biochar; structural equation model

0 引言

东北黑土区是我国重要的粮食生产基地,对保障国家粮食安全有着重要作用^[1]。黑土养分含量高,土质疏松,肥力充足,适宜进行农业生产^[2]。但人为活动和自然灾害导致黑土地受到了破坏,受侵蚀影响,东北黑土区土壤养分流失严重。近70年,黑土耕层土壤有机质含量降幅超过1/3,导致黑土耕地地力越来越差,农业生产对化肥的依赖性越来越强^[3]。施用化肥在短时间内能使农作物产量有所提升,但长期过量施用会造成土壤酸化,土壤肥力降低^[4],影响国民经济的持续稳定发展。

水稻是我国主要粮食作物之一,是我国主要粮食来源。同时,水稻也是我国种植面积最广泛的粮食作物,约占总面积的25.44%。作为全球最大的水稻生产和消费国,我国水稻产量和品质不仅关系到国内粮食供应的稳定性,也对国际粮食市场产生影响^[5]。氮在水稻生长发育中起着不可替代的作用,氮参与了水稻生长过程中蛋白质、核酸、磷脂和叶绿素的合成^[6]。适量氮肥能够促进水稻植株生长,增加植株高度、叶片数量和茎粗度,有助于水稻形成更多的穗和籽粒,提高水稻产量和品质。然而氮肥施加过量已经成为水稻生产中的普遍现象。过量氮肥会刺激水稻植株过度生长,但伴随而来的却未必是产量的增加,这是因为一方面水稻株高增加的同时也增加了水稻植株的倒伏风险,降低了水稻抗逆性,造成植株损失和产量下降;另一方面,过量氮肥可能导致水稻植株花药过度分化,而不是形成足够的受精结实穗,这会导致穗粒数减少和千粒质量下降,最终影响产量^[7]。另外,过多氮肥可能导致水稻籽粒中蛋白质含量过高,影响米饭口感和品质。因此,合理施用氮肥,最大程度地发挥氮肥的作用,是确保水稻健康生长和提高产量品质的关键^[8]。

土壤肥力是土壤的基本属性和本质特征,是土壤为作物生长供应和协调养分、水分、空气和热量的能力,可以反映土壤中养分含量及养分的有效性和可利用性。肥沃的土壤不仅是作物生长发育的基础,还可以调节作物生长环境,促进作物均衡生长,进而有利于提高作物品质和抗病能力,稳定作物产量^[9]。因此,维持土壤肥力的充足条件对于保障作物健康生长和高产稳产具有至关重要的作用。适量施用氮肥有利于土壤肥力的提升,但当氮肥施用过多时,会导致土壤酸化和盐碱化,土壤生态系统失衡,引发水体污染,降低土壤肥力和抗病抗逆能力^[10]。因此,在农业生产中合理施用氮肥,以避免过量施用所引发的诸多问题,是维护土壤肥力和农业可持续发展的关键。

生物炭是生物质在限氧或缺氧条件下热解形成的固体残留物,其具有孔隙结构丰富、比表面积大、呈碱性等特点^[11],是一种经济、环境友好型的土壤改良剂。生物炭具有良好的吸水性和保水性,能够吸附土壤中的水分和养分,提高土壤的保水保肥能力;其独特的孔隙结构和较强的吸附能力能够减少氮的淋失,提高氮素利用率^[12]。生物炭中碳含量高,能够在一定程度上调节土壤酸碱度,改善酸性土壤;丰富的碳质含量还可以使其作为有机碳源持久地存在于土壤中,增加土壤有机质含量,提高土壤肥力和碳固存^[13]。生物炭丰富的孔隙结构还可以提高土壤通气性和渗透性,为土壤微生物提供了良好的生长环境,有利于土壤微生物繁殖和活动,促进土壤中微生物的多样性和活性,有助于提高土壤肥力和作物产量。有研究发现,生物炭施加有助于提高水稻生长速度、生长势和产量^[14],有效提高水稻抗倒伏性^[15],在一定程度上可改善不利生长环境下作物减产的问题。但施加生物炭过多时土壤中有机碳含量增加,增加了土壤微生物与水稻竞争的能力,导致水稻可利用的养分减少,可能造成水稻减产^[16]。

为了应对氮肥过量施用对土壤环境及水稻生长所带来的不良影响,减少氮肥施用是最直接有效的解决方案,但这可能会导致水稻减产。生物炭作为一种高效的土壤改良剂,具有改善土壤肥力、提高作物产量的巨大潜力。在减氮的土壤中施入生物炭,能否有效抵消因减氮带来的不利影响,是值得深入探究的问题。本研究采用盆栽试验,在减氮 10% 的条件下分别添加 2.5% 和 5% 生物炭,探讨其对土壤肥力及水稻产量的影响,并采用通径分析和结构方程模型对水稻产量的驱动因子进行辨识,为东北黑土区水稻的可持续生产提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于 2022 年 5—9 月在东北农业大学水利与土木工程学院试验中心进行(45°45′28.66″N, 126°43′45.54″E)。试验区属温带大陆季风气候,四季分明,全年平均降水量 569.1 mm,降水主要集中于 6—9 月。全年平均气温约 3.6℃,夏季最高月平均气温 28℃。全年日照时数 2 460~2 789 h。全年平均相对湿度大于 68%,平均蒸发量约 1 600 mm,全年无霜期约 145 d。

表 1 供试土壤理化性质

Tab.1 Physical and chemical properties of tested soil

参数	容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	孔隙度/ %	饱和含水 率/%	pH 值	有机质质量比/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮质量比/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全磷质量比/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全钾质量比/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
数值	1.36	61.8	50	6.3	34.83	1.10	0.45	0.35

表 2 生物炭理化性质

Tab.2 Physical and chemical properties of biochar

参数	粒径/mm	比表面积/ ($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	电导率/ ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$)	灰分质量 分数/%	pH 值	全碳质量 分数/%	全氮质量 分数/%	全磷质量 分数/%	全钾质量 分数/%
数值	1.5~2.0	84.3	1.2	25.7	9.36	70.38	1.53	0.73	1.66

表 3 各处理生物炭和氮肥用量

Tab.3 Amount of biochar and nitrogen fertilizer for each treatment

处理	生物炭质量分数/%	氮肥施用量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
CK	0	110
C1	0	99
C2	2.5	99
C3	5.0	99

表 4 水稻不同生育阶段水分管理

Tab.4 Irrigation strategy during different growth stages of rice

生育阶段	分蘖 前期	分蘖 中期	分蘖 末期	拔节 期	抽穗 期	乳熟 期	黄熟 期
灌溉上限	50 mm	50 mm	100%	35 mm	40 mm	100%	20 mm
灌溉下限	92%	85%	60%	85%	10 mm	70%	60%

注:mm 为灌溉水层深度单位,% 为土壤含水率单位。

1.3 观测指标与方法

于试验结束后取深度 5 cm 土壤测定理化性质。采用凯氏定氮法测定土壤全氮含量^[17],重铬酸钾容量法-外加热法测定土壤有机质含量^[18],玻璃电极法测定土壤 pH 值^[19],氯化钾浸提双波长比色法测

1.2 试验设计

试验在移动式遮雨棚内进行。采用盆栽试验,试验盆直径 34 cm,高 43 cm。供试土壤为黑壤土,供试生物炭购于辽宁金和福开发有限公司,是由玉米秸秆在 450℃ 无氧条件下烧制而成,其理化性质分别如表 1、2 所示。土壤自然风干破碎后过筛,每盆装干土 10 kg,将生物炭与土壤均匀混合静置 7 d 备用。试验共设置 4 个处理,如表 3 所示,其中对照组 CK 为当地大田施肥标准:不施加生物炭,氮肥施加量 110 kg/hm^2 ;C1 为减氮 10% 处理,C2、C3 分别为减氮 10% 条件下配施 2.5% 和 5% 生物炭。所用化肥为尿素(N 质量分数为 46%)、磷酸二铵(N 质量分数为 15%, P_2O_5 质量分数为 42%)、氯化钾(K_2O 质量分数为 60%)。将化肥折算成每盆用量,其中,氮肥按基肥、分蘖肥、促花肥、保花肥比例为 4.5:2:1.5:2 分 4 次施入,磷肥做底肥一次性全部施入,钾肥按基肥、穗肥比例为 1:1 分 2 次施入。每个处理重复 3 次,共计 12 个盆栽。供试水稻为龙庆稻 5 号,种植方式为早直播,每盆 6 穴。灌溉方式为控制灌溉,不同生育阶段水分管理如表 4 所示,当土壤含水率达到控水标准下限时,灌水到控制上限。

定土壤硝态氮含量^[20],靛酚蓝比色法测定土壤铵态氮含量^[21],钼锑比色法测定土壤全磷含量^[22],火焰光度法测定土壤全钾含量^[23]。采用干燥法测定土壤含水率,使用环刀法测定土壤容重、孔隙度和田间持水率^[24]。水稻成熟期选取每盆水稻,自然风干后

进行考种,测定有效穗数,脱粒计算每穗粒数、千粒质量、结实率及实际产量。

1.4 土壤肥力指数

根据模糊数学中的加乘法原则计算土壤肥力综合指数(Integrated fertility index,IFI),IFI越高,土壤肥力越好。计算公式为

$$IFI = \sum_{i=1}^p W_i N_i \quad (1)$$

式中 p ——土壤肥力指标数

W_i ——第 i 种肥力指标权重系数

N_i ——第 i 种肥力指标隶属度

采用相关系数法来确定权重系数,计算公式为

$$W_i = \sum_{j=1}^p r_{ij} / \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p r_{ij} \quad (2)$$

式中 r_{ij} ——两种肥力指标之间的相关系数

隶属度通过隶属度函数计算得到。根据各指标的特点,采用S型隶属度函数和抛物线型隶属度函数,表达式分别为:

S型隶属度

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & (x \geq x_2) \\ 0.9(x - x_1)/(x_2 - x_1) + 0.1 & (x_1 < x < x_2) \\ 1.0 & (x \leq x_1) \end{cases} \quad (3)$$

抛物线型隶属度

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & (x \leq x_1 \text{ 或 } x \geq x_4) \\ 0.9(x - x_1)/(x_2 - x_1) & (x_1 < x \leq x_2) \\ 1.0 & (x_2 < x \leq x_3) \\ 1.0 - 0.9(x - x_3)/(x_4 - x_3) & (x_3 < x < x_4) \end{cases} \quad (4)$$

式中 x ——指标测定值

x_1, x_2, x_3, x_4 ——隶属度函数阈值

其中,土壤pH值、容重和孔隙度采用抛物线型隶属度函数;田间持水率、有机质含量、全氮含量、全磷含量、全钾含量、硝态氮含量和铵态氮含量采用S型隶属度函数。根据全国第二次土壤普查分级标准和文献[25]得到各土壤肥力指标所属隶属度函数阈值,如表5所示。

表5 土壤肥力指标所属隶属度函数阈值

Tab.5 Threshold of membership function for soil fertility indicators

阈值	容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	孔隙 度/%	pH值	田间持水 率/%	有机质质量 比/($g \cdot kg^{-1}$)	全氮质量比/ ($g \cdot kg^{-1}$)	全磷质量比/ ($g \cdot kg^{-1}$)	全钾质量比/ ($g \cdot kg^{-1}$)	硝态氮质量 比/($mg \cdot kg^{-1}$)	铵态氮质量 比/($mg \cdot kg^{-1}$)
x_1	1.00	50	6.0	20	6	0.5	0.2	5	20	25
x_2	1.15	52	6.5	35	40	2.0	1.0	25	200	300
x_3	1.25	55	7.0							
x_4	1.35	60	7.5							

1.5 结构方程模型

结构方程模型是基于变量的协方差矩阵来分析变量之间关系的一种统计方法。结构方程模型主要包括测量模型和结构模型两部分,分别为

$$X = \xi_x \xi + \delta \quad (5)$$

$$Y = \eta_y \eta + \varepsilon \quad (6)$$

$$\eta = B\eta + \Gamma\xi + \zeta \quad (7)$$

其中 X ——外生观测变量

Y ——内生观测变量

ξ ——外生潜变量 η ——内生潜变量

δ ——外生观测变量残差

ε ——内生观测变量残差

ξ_x —— X 在 ξ 上的因子负荷量

η_y —— Y 在 η 上的因子负荷量

B ——因素路径系数,表示内生潜变量之间的关系

Γ ——因素路径系数,表示外生潜变量对内生潜变量的关系

ζ ——结构方程残差项

其中式(5)、(6)为测量方程,式(7)为结构方程。

本研究将土壤理化指标(容重、孔隙度、含水率、田间持水率、有机质含量、pH值、全氮含量、全磷含量、全钾含量、硝态氮含量、铵态氮含量)作为外因变量,产量构成要素(千粒质量、有效穗数、每穗粒数、结实率)作为中介变量,水稻产量为内因变量,构建初始概念模型。

结构方程模型大致分为构建理论模型、模型识别、参数估计、模型评价、模型修正5个步骤。首先根据前人研究理论和研究目的构建理论模型,之后对模型进行识别确定所有的自由参数是否有唯一解,检查模型是否存在问题。模型识别不存在问题后,对模型中的参数进行估计,常用的方法为极大似然估计和最小二乘估计。模型评价是通过指标评判模型与数据的匹配程度,最常用的模型评价方法为卡方检验,反映假设模型的导出矩阵与观察矩阵的差异程度。此外,结构方程模型使用其他的指标整

体考量模型的适配度,常用指标有拟合指数(Goodness of fit index, GFI)、相对拟合指数(Comparative fit index, CFI)、正规拟合指数(Normed fit index, NFI)、近似均方根误差(Root mean square error of approximation, RMSEA)和标准化根均方误差(Standardized root mean square residual, SRMR),当卡方自由度比 χ^2/df 小于3、GFI大于0.9、CFI大于0.95、NFI大于0.9、RMSEA小于0.05、SRMR小于0.09、 P 值大于0.05时,说明模型拟合度较高。若拟合指数反映模型拟合效果不好,则需要对模型进行修正,主要方法是根据拟合指数来增加、删除变量,调整路径或参数等。

1.6 统计分析

使用 IBM SPSS 25.0 软件对土壤理化指标和水稻产量相关数据进行处理,并以平均值 \pm 标准差表示。利用 Origin 2021 绘制柱状图,使用 LSD 多重比较分析不同处理间的差异,显著性水平取 0.05。采用 IBM SPSS 25.0 进行途径分析解析水稻产量及其构成要素间的关系,并采用 Word 2019 绘制途径图。使用 Amos 25.0 构建结构方程模型,明晰土壤理化指标对水稻产量及其构成要素的影响,明确减氮配施生物炭对水稻产量的驱动机制。

2 结果与分析

2.1 减氮配施生物炭对土壤理化性质的影响

2.1.1 土壤结构指标

各处理土壤孔隙度和容重如图 1(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同)所示,减氮 10% 对土壤孔隙度和容重均无显著影响。施加不同含量的生物炭使土壤结构均得到一定改善,其中 C2 处理土壤孔隙度较 CK、C1 处理分别显著增加 2.57% 和 2.51% ($P < 0.05$),土壤容重较 CK、C1 处理分别显著降低 7.19% 和 5.15% ($P < 0.05$)。C3 处理土壤孔隙度较 CK、C1 处理分别显著增加 5.86% 和 5.82% ($P < 0.05$),土壤容重较 CK、C1 处理分别显著减少 8.63% 和 7.30% ($P < 0.05$)。

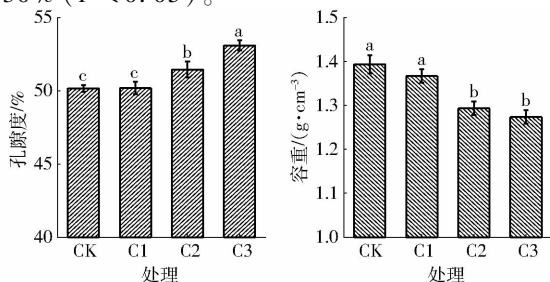


图 1 各处理土壤孔隙度和容重

Fig. 1 Soil porosity and bulk density of each treatment

2.1.2 土壤持水能力

各处理土壤含水率和田间持水率如图 2 所示,减少氮肥会导致土壤持水能力下降,C1 处理较 CK 土壤含水率降低 1.52%,田间持水率显著降低 8.52% ($P < 0.05$)。施加生物炭使土壤的持水能力得到改善,C2 处理较 CK 处理含水率显著提高 15.09% ($P < 0.05$),较 C1 处理土壤含水率和田间持水率均显著提高($P < 0.05$);施加高含量生物炭使土壤持水性能进一步提升,C3 处理土壤含水率较 CK、C1 处理分别显著提高 4.71% 和 4.96% ($P < 0.05$),田间持水率较 CK、C1 处理分别显著增加 1.97% 和 5.06% ($P < 0.05$)。

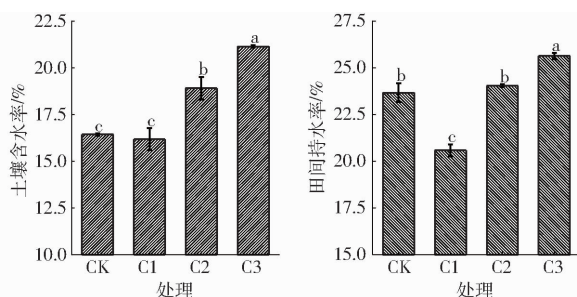


图 2 各处理土壤含水率和田间持水率

Fig. 2 Soil moisture content and field water capacity of each treatment

2.1.3 养分指标

各处理土壤养分指标如表 6 所示。减少氮肥导致土壤养分指标发生改变,C1 较 CK 处理土壤 pH 值显著降低、硝态氮含量和铵态氮含量显著减少,土壤全磷含量显著增加($P < 0.05$),全氮含量有小幅降低。与 C1 相比,C2 处理显著提高了土壤 pH 值、全氮含量和硝态氮含量($P < 0.05$),但显著降低了铵态氮含量($P < 0.05$)。C3 处理较 C2 处理进一步提升了土壤 pH 值和全氮含量($P < 0.05$),但使硝态氮含量显著降低,铵态氮含量显著提高($P < 0.05$)。C2 和 C1 处理土壤有机质含量和全磷含量无显著性差异,而 C3 处理土壤有机质含量和全磷含量较 C1 处理显著提高 17.59% 和 15%,较 C2 处理显著提高 17.22% 和 11.81%;土壤 pH 值(相关系数 $r = 0.991, P < 0.001$)、全氮含量($r = 0.902, P = 0.001$)与施炭量呈正相关,全钾含量($r = -0.754, P = 0.019$)与施炭量负相关;硝态氮、铵态氮含量与施炭量未呈现出明显的规律性。

2.1.4 综合肥力

采用式(2)~(4)分别计算各指标的权重系数和隶属度,结果如表 7 所示。土壤 pH 值的权重系数最大,为 0.129;其次是孔隙度,为 0.127。采用式(1)计算各处理土壤肥力综合指数,结果如图 3 所示。各处理 IFI 由大到小依次为 C3、C2、CK、

表6 各处理土壤养分指标

Tab.6 Soil nutrient indicators for each treatment

参数	CK	C1	C2	C3
pH 值	(7.14 ± 0.03) ^c	(7.02 ± 0.04) ^d	(7.20 ± 0.03) ^b	(7.37 ± 0.04) ^a
有机质质量比/(g·kg ⁻¹)	(196.15 ± 17.63) ^b	(195.02 ± 0.73) ^b	(196.76 ± 11.82) ^b	(230.65 ± 18.45) ^a
全氮质量比/(g·kg ⁻¹)	(7.34 ± 0.28) ^{bc}	(6.91 ± 0.48) ^c	(7.95 ± 0.36) ^b	(8.82 ± 0.94) ^a
全磷质量比/(g·kg ⁻¹)	(1.26 ± 0.08) ^c	(1.40 ± 0.04) ^b	(1.44 ± 0.08) ^b	(1.61 ± 0.04) ^a
全钾质量比/(g·kg ⁻¹)	(16.83 ± 1.32) ^{ab}	(18.26 ± 1.39) ^a	(17.02 ± 1.65) ^{ab}	(16.07 ± 0.86) ^b
硝态氮质量比/(mg·kg ⁻¹)	(9.42 ± 0.08) ^b	(2.06 ± 0.08) ^c	(10.64 ± 0.41) ^a	(8.89 ± 1.29) ^b
铵态氮质量比/(mg·kg ⁻¹)	(13.24 ± 0.37) ^a	(10.51 ± 0.71) ^b	(8.77 ± 0.11) ^c	(10.31 ± 1.08) ^b

注:同行数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

表7 土壤肥力指标隶属度和权重系数

Tab.7 Membership degree and weight coefficients of soil fertility indicators

参数	容重	孔隙度	田间持水率	有机质含量	pH 值	全氮含量	全磷含量	全钾含量	硝态氮含量	铵态氮含量
隶属度	CK	0.100	0.169	0.320	1.000	0.424	1.000	1.000	0.632	0.100
	C1	0.100	0.180	0.135	1.000	0.536	1.000	1.000	0.697	0.100
	C2	0.613	0.748	0.343	1.000	0.370	1.000	1.000	0.641	0.100
	C3	0.793	1.000	0.438	1.000	0.217	1.000	1.000	0.598	0.100
权重系数	0.118	0.127	0.116	0.090	0.129	0.120	0.098	0.080	0.073	0.049

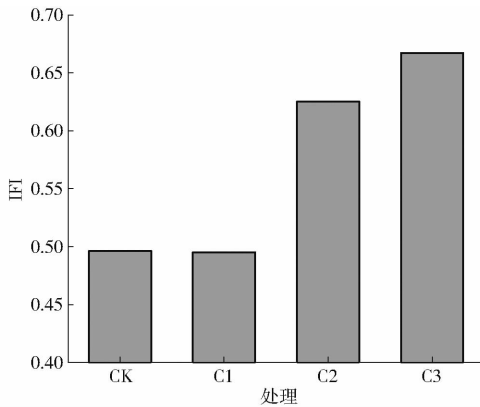


图3 各处理土壤肥力综合指数

Fig.3 Integrated fertility index (IFI) for each treatment

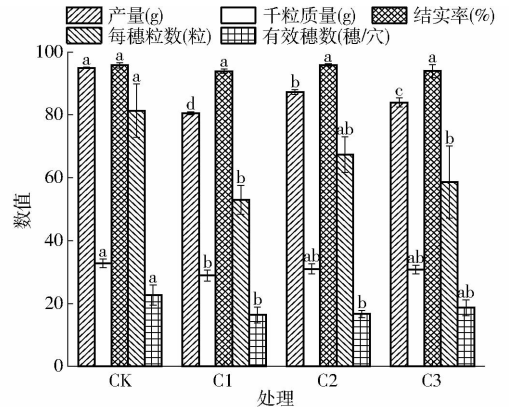


图4 水稻产量及其构成要素

Fig.4 Rice yield and its components

C1。减氮 10% 使土壤综合肥力略有下降,施加生物炭可有效提高土壤综合肥力,C3 处理对土壤肥力的补偿效果优于 C2 处理。根据等距法^[25]将 IFI 值划分为 5 个等级,分别为一级(0.8 ~ 1)、二级(0.6 ~ 0.8)、三级(0.4 ~ 0.6)、四级(0.2 ~ 0.4)、五级(0 ~ 0.2)。本研究中 CK、C1 处理土壤综合肥力处于三级,C2、C3 处理土壤综合肥力提升至二级。

2.2 减氮配施生物炭对水稻产量及构成要素的影响

2.2.1 水稻产量及其构成要素

各处理产量及其构成要素如图 4 所示。C1 处理较 CK 处理水稻产量显著降低 15.17% ($P < 0.05$),每穗粒数、有效穗数和千粒质量分别显著减少 34.83%、27.97% 和 12.00%。减氮条件下施加生物炭对水稻产量有一定的补偿效应,但仍未恢复到 CK 水平,其中 C2 处理补偿效果优于 C3 处理。减氮条件下施用生物炭对水稻结实率无显

著影响。

2.2.2 水稻产量构成要素和产量的通径分析

采用通径分析解析减氮配施生物炭条件下水稻产量构成要素对水稻产量的贡献。图 5 为通径图,图中产量构成要素之间的数值为相关系数,产量构成要素与产量之间的数值为直接通径系数, e 为随机误差项; * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$ 。各产量构成要素对水稻产量的直接影响和间接影响如表 8 所示。根据对决定系数 R^2 的贡献率可知,各要素对产量的影响从大到小依次为每穗粒数、千粒质量、有效穗数、结实率,其中每穗粒数对产量的直接影响大于间接影响;结实率、有效穗数和千粒质量对水稻的间接影响大于直接影响,它们主要通过影响每穗粒数进而影响水稻产量。此外,误差项对产量的贡献率为 0.0985,大于结实率对产量的贡献率。

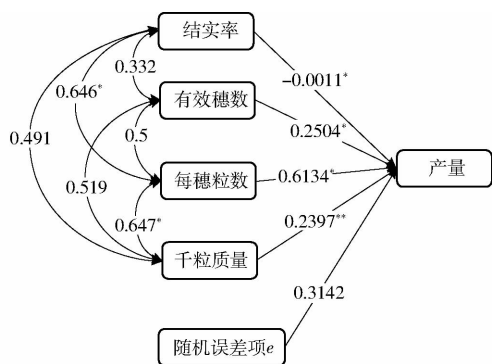


图 5 产量构成要素与产量间通路图

Fig. 5 Path diagram between yield components and yield

表 8 水稻产量构成要素对水稻产量的直接影响和间接影响

Tab. 8 Direct and indirect effects of rice yield components on rice yield

产量构成要素	直接通路系数	间接通路系数				总计	对 R ² 的贡献率
		结实率	有效穗数	每穗粒数	千粒质量		
结实率	-0.0011		0.0831	0.3963	0.1177	0.5971	-0.0007
有效穗数	0.2504	-0.0004		0.3067	0.1244	0.4307	0.1708
每穗粒数	0.6134	-0.0007	0.1252		0.1551	0.2796	0.5478
千粒质量	0.2397	-0.0005	0.1230	0.3969		0.5194	0.1836

表 9 水稻产量的驱动作用

Tab. 9 Driving force of rice yield

参数	铵态氮含量	硝态氮含量	pH 值	全钾含量
总效应	0.667	0.699	-0.596	-0.285
直接效应	0.356	0.696	-0.487	-0.191
间接效应	0.311	0.003	-0.109	-0.094

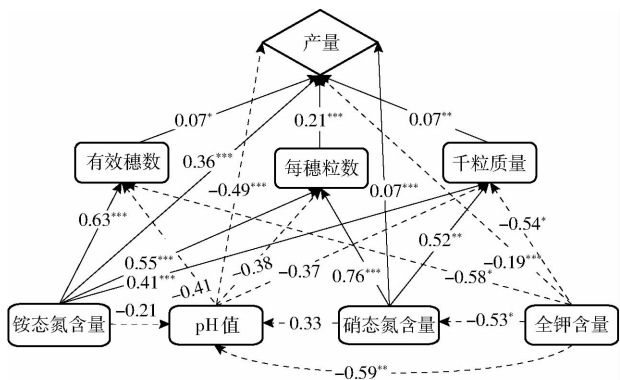


图 6 结构方程模型路径图

Fig. 6 Structural equation model path diagram

CFI 为 1 (>0.9), NFI 为 0.974 (>0.9), RMSEA 为 0 (<0.05), SRMR 为 0.027 (<0.09), 模型解释总方差达到 99.9%, 表明该模型适配极好。减氮 10% 条件下施加生物炭, 使土壤养分指标和产量构成要素均发生了变化, 从而对水稻产量产生了直接或间接的影响。减氮和施加生物炭改变了土壤 pH 值和铵态氮、硝态氮、全钾含量, 这些指标的变化可直接影响水稻产量或通过影响水稻产量构成要素而对水稻产量产生间接影响。其中, 土壤铵态氮和硝态氮含量的增加直接促进了水稻产量的增加, 而 pH 值和全钾含量的增加则抑制了水稻产量的提升。此外, 铵态氮含量还可以通过影响水稻的有效穗数、每穗粒数和千粒质量来间接促进产量的提高, 而硝态氮含量则通过影响水稻每穗粒数和千粒质量来间接提高水稻产量。根据表 9 可知, 各养分指标的总驱动作用由大到小依次为硝态氮含量、铵态氮含量、

2.3 水稻产量驱动因子

为探究减氮及施用生物炭条件下水稻产量的驱动因子, 构建土壤理化指标-产量构成要素-产量三者之间的结构方程模型。由于结实率对水稻产量的贡献率小于随机误差项, 故在初始概念模型中将该要素剔除。经过多次修正, 得到最终模型如图 6 (图中实线表示正向影响, 虚线表示负向影响, 路径上的数据为路径系数, * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, *** 表示 $P < 0.001$) 所示。修正后模型适配度指标 $\chi^2/df = 0.482 (<3)$, GFI 为 0.931 (>0.9),

pH 值、全钾含量。

3 讨论

3.1 减氮配施生物炭对土壤肥力的影响

土壤容重和孔隙度是衡量土壤结构特性的重要指标, 土壤容重的变化会影响土壤多孔性、作物根系生长和生物量积累^[26]。本研究发现氮肥施用量减少 10% 不会对土壤孔隙度和容重产生显著影响。施用生物炭后土壤孔隙度增加, 土壤容重降低, 土壤结构得到改善。这可能是由于生物炭稀疏多孔的性质和较低的自身容重, 可以稀释土壤^[27]; 同时其强大的吸附能力和富含的有机质有助于团聚体形成, 从而改善了土壤结构, 降低土壤容重, 增大孔隙度^[28], 增强土壤养分供应, 降低土壤板结, 有利于作物生长^[29]。土壤持水能力与土壤结构密切相关^[30]。本研究发现减少氮肥施用导致土壤田间持水率显著降低, 而生物炭施加则使土壤含水率和田间持水率增加。生物炭稀疏多孔、比表面积大, 能够引起土壤孔径分布和聚集过程的重组, 改善土壤通气性和透水性, 进而提升土壤持水性能。在生物炭制备过程中容易形成丰富的含氧官能团(羧基、羟

基、内酯基等),它们的存在赋予了生物炭一定的极性,使其具有良好的亲水性,从而增强了对土壤水分的持留能力。另外 O_2- 和 $C-O-H$ 的极性氢键促进了 H_2O 分子与生物炭表面的相互作用,从而提高了土壤持水率^[31]。

酸碱度是土壤最重要的属性,良好的土壤酸碱性是作物高产的前提^[32]。尿素在土壤中会发生水解反应产生氨气,氨气与土壤中的水结合会形成碱性氢氧化铵,因此在农田中施用尿素一般会使土壤 pH 值升高^[33],而减少 10% 尿素用量则会使土壤 pH 值降低。在减氮情况下施加生物炭使 pH 值升高,这是由于生物炭含有矿物元素形成的碳酸盐,其表面含丰富的碱性基团,因此一般呈碱性,可以通过中和土壤酸碱度提高 pH 值^[34]。另外,生物炭通过其表面的含氧官能团能够结合土壤 Al^{3+} 离子,导致土壤中可交换的 Al 含量降低,从而增加了土壤可交换碱性离子丰度,这可能也是土壤 pH 值升高的原因。有机质含量是衡量土壤肥力的重要指标,在本研究中减少氮肥施用不会显著改变土壤有机质含量,施加高浓度生物炭使土壤有机质含量显著增加。生物炭是碳含量较高的一种土壤改良剂,有机质含量通常高达 60% 以上。施加高浓度生物炭大幅增加了土壤的碳源,且生物炭中的碳结构相对稳定,不易被微生物降解,能够长期存在于土壤中,从而增加土壤有机质含量^[35]。另外,生物炭可以提供土壤微生物生长和活动所需的碳源,促进土壤中微生物的繁殖和活动。微生物通过分解有机物质,将其转化为更稳定的有机质,也可能是土壤有机质含量增加的原因。氮素是植物生长所需的关键营养元素之一,铵态氮和硝态氮是植物可吸收的氮素形态,其含量直接影响土壤肥力^[36]。本研究发现,减氮 10% 对土壤全氮含量无显著影响,但却显著降低了土壤铵态氮和硝态氮含量,这可能是由于减少氮肥施用减缓了土壤中铵态氮、硝态氮等不同氮素形态的转化过程,导致其含量降低;同时,氮在土壤中与有机质有关,有机质的分解过程可能会释放铵态氮和硝态氮。减少氮肥施用降低了土壤中有机质的分解速率,铵态氮和硝态氮的释放也会减少,从而影响其含量。施加生物炭显著增加了土壤中全氮、硝态氮含量,降低了铵态氮含量。生物炭本身富含氮素,可以调节土壤的氮循环^[37],提高土壤对氮元素的保留^[38]。此外,生物炭因其比表面积大和多孔性的特性能够吸附土壤中的氮素,减少氮素淋失,有助于增加土壤全氮含量^[39]。硝态氮主要来自铵态氮的硝化作用^[40]。生物炭可通过提高土壤 pH 值,改善土壤通透性,吸附

土壤无机氮和影响硝化和反硝化作用的抑制剂,导致硝化作用相对增强,土壤中硝态氮含量增加而铵态氮含量降低^[41]。本研究还发现,添加 5% 生物炭较添加 2.5% 生物炭土壤中硝态氮含量显著降低,铵态氮含量显著增加,这可能是由于土壤硝化速率随着生物炭施用量的增加呈先增大后减小的变化趋势^[42]。生物炭对土壤氮循环的作用机制及长期效应有待进一步深入研究。

本文借鉴模糊数学的思想,基于隶属度函数和相关系数权重测算了各处理土壤综合肥力指数 (IFI),结果表明减氮 10% 会使土壤综合肥力略有降低,而施加生物炭可以显著提高土壤综合肥力,且施加生物炭浓度越高,土壤肥力提升效果越好。生物炭施加可以显著改善土壤结构、持水能力和养分指标,提高土壤综合肥力等级,因此可以将其作为一种有效的土壤改良剂,在减氮情况下配施生物炭以减轻化肥减少带来的负面影响。

3.2 减氮配施生物炭对水稻产量的影响

氮肥在水稻生产中扮演着至关重要的角色,减少氮肥使用会抑制水稻分蘖,从而降低水稻产量。本研究发现,减氮 10% 显著降低了水稻产量,这是因为减少氮肥施用显著降低了铵态氮和硝态氮含量,导致水稻缺氮,分蘖减少,叶片黄化,生长缓慢,从而影响水稻产量^[43]。施加生物炭对水稻产量具有一定的补偿效应,仍未使产量恢复到常规施氮水平。生物炭通常含有丰富的营养元素,如 K、Ca、Mg 和 Na 等,施入土壤后其所含的可溶性养分可以直接被植物吸收利用。因此从某种程度上讲,生物炭本身就是一种特殊的肥料,可以促进作物生长,提高作物产量。另一方面,生物炭通过改善土壤理化性质,提高土壤肥力,提供和贮存营养元素,改变作物水分、养分供给条件,进而促进作物生长和品质的形成^[44]。另外本研究还发现,施炭量对产量的影响存在阈值,添加 2.5% 生物炭比添加 5% 生物炭增产效果更好。这可能是由于过量的生物炭会增加土壤密度,降低土壤透气透水性,抑制植株根系的生长导致产量降低^[45]。产量构成要素方面,减氮导致每穗粒数、有效穗数和千粒质量显著降低。每穗粒数和有效穗数的减少可能是由于氮肥减少导致水稻分蘖生长和穗分化时期发生缺氮现象,养分供应不足。施加生物炭可补偿氮肥减少对水稻产量构成要素造成的负面影响,添加 2.5% 生物炭对每穗粒数的补偿效果优于添加 5% 生物炭。可能是过量的生物炭导致土壤碳氮比失衡,微生物酶活性下降,从而影响养分吸收,不利于水稻生长。

水稻产量形成是一个复杂的系统过程,其中各

要素相互关联,相互影响。本研究采用通径分析解析减氮配施生物炭条件下水稻产量构成要素的变化对水稻产量的影响。结果表明,各产量构成要素对水稻产量的贡献率从大到小依次为每穗粒数、千粒质量、有效穗数、结实率。结实率贡献率小于误差项,表明其对水稻产量的影响不显著。这可能是由于水稻结实率主要受气候、水分管理、种植方式、环境胁迫等因素影响,而本研究中的氮素和生物炭不是水稻结实率的主要调控因子,因此各处理间水稻结实率无显著差异,进而导致结实率对水稻产量的影响不显著。有效穗数和千粒质量与水稻产量正相关,对水稻产量的间接作用大于直接作用,主要通过影响每穗粒数进而影响水稻产量。每穗粒数对产量的影响主要是直接作用,且与产量呈正相关,表明增加每粒穗数可以提高产量。因此,在未来的研究中应着重于每穗粒数的调控机制,以更好地优化水稻产量。

3.3 减氮配施生物炭条件下水稻产量的驱动因子

本研究通过土壤肥力-产量构成要素-产量的结构方程模型,探寻减氮配施生物炭条件下水稻产量的驱动因子。修正后结构方程模型解释了总方差的99.9%,揭示了水稻产量受多因子的协同影响。研究发现硝态氮含量是对水稻产量影响最大的直接驱动因子。此外,土壤铵态氮含量、硝态氮含量、pH值和全钾含量还通过影响水稻产量构成要素来间接影响水稻产量,其中pH值和全钾含量对水稻产量有负面效应。硝态氮和铵态氮是水稻吸收的两种主要氮素形式,其对水稻整个生育期的生长起着重要的作用,为水稻提供了重要的氮素来源^[46]。铵态氮可促进水稻分蘖抽穗和籽粒充实,有助于提高每穗粒数、有效穗数和千粒质量;硝态氮含量有助于提高每穗的花序数量,促进形成更大、更充实的籽粒,有利

于水稻产量的形成。本研究发现,减少氮肥用量会导致硝态氮和铵态氮含量减少,进而抑制水稻生长,而生物炭施加可以部分抵消这一影响,使硝态氮和铵态氮含量有所增加,从而对水稻生长产生一定的补偿作用,且硝态氮含量对水稻产量的影响效应大于铵态氮含量。有研究发现水稻的穗粒数和千粒质量均随硝态氮含量的提高而增加^[47]。土壤酸碱度会影响水稻分蘖期生长、穗期干物质积累以及根系生长。水稻适宜的生长环境pH值为6~7,当pH值大于7时,较高的pH值会显著减弱水稻对养分的吸收能力,从而抑制水稻生长导致产量下降^[48]。而当土壤中钾含量过高时,可能导致与其他元素的平衡失调,抑制水稻对镁、钙、铁等元素的吸收,导致植株养分失衡,影响生长和发育。

4 结论

(1) 减氮10%对土壤综合肥力的影响有限;施用生物炭则明显提高了土壤肥力,其中添加5%生物炭对土壤肥力的提升效果优于添加2.5%生物炭。

(2) 减氮10%导致水稻产量显著降低;施加生物炭可一定程度改善氮肥减少带来的不利影响,其中添加2.5%生物炭对水稻产量的补偿效果优于添加5%生物炭,但仍未恢复到常规施氮水平。

(3) 减少氮肥及施加生物炭通过影响土壤pH值、全钾含量、硝态氮含量和铵态氮含量进而直接或间接影响水稻产量。其中,硝态氮含量和铵态氮含量是水稻产量的重要驱动因子,其不仅直接影响水稻产量,还可以通过影响每穗粒数、有效穗数和千粒质量间接影响水稻产量。pH值和全钾含量则对水稻产量有负面作用。可通过提高土壤中硝态氮和铵态氮含量达到增产的效果。

参 考 文 献

- [1] 韩晓增,李娜. 中国东北黑土地研究进展与展望[J]. 地理科学,2018,38(7):1032-1041.
HAN Xiaozeng, LI Na. Research progress of black soil in Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica,2018,38(7):1032-1041. (in Chinese)
- [2] 马超. 黑龙江省黑土地保护性耕作实施基本情况及问题研究[J]. 中国农学通报,2022,38(17):143-147.
MA Chao. Basic situation and problems of conservation tillage in black soil in Heilongjiang Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2022,38(17):143-147. (in Chinese)
- [3] TONG Y, LIU J, LI X, et al. Cropping system conversion led to organic carbon change in China's Mollisols regions[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1):18064.
- [4] 周雪,崔俊涛,李明堂,等. 土壤微生物助力东北黑土区农业资源与环境保护与发展[J]. 吉林农业大学学报, 2022, 44(6):679-687.
ZHOU Xue, CUI Juntao, LI Mingtang, et al. Contribution of soil microorganisms to agricultural resources and environment development in black soil region of Northeast China[J]. Journal of Jilin Agricultural University,2022,44(6):679-687. (in Chinese)
- [5] 刘伟. 生物炭基肥与化肥配施对水稻产量的影响[J]. 农业科技通讯,2022(2):74-77.
- [6] 宁川川,陈悦桂,柳瑞,等. 减氮配施秸秆生物炭对双季稻产量和硅、氮营养的影响[J]. 应用生态学报,2023,34(4):993-1001.

- NING Chuanchuan, CHEN Yuegui, LIU Rui, et al. Effects of N fertilizer reduction combined with straw biochar application on the yield, Si and N nutrition of double-cropping rice[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(4): 993 – 1001. (in Chinese)
- [7] 汪本福, 余振渊, 程建平, 等. 氮素对水稻产量和品质形成的影响研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(1): 76 – 83. WANG Benfu, YU Zhenyuan, CHENG Jianping, et al. Research progress of effects of nitrogen on yield and quality of rice[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(1): 76 – 83. (in Chinese)
- [8] 柳瑞, 高阳, 李恩琳, 等. 减氮配施生物炭对水稻生长发育、干物质积累及产量的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(5): 926 – 932. LIU Rui, GAO Yang, LI Enlin, et al. Effects of reduced nitrogen and biochar application on plant growth, dry matter accumulation and rice yield[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(5): 926 – 932. (in Chinese)
- [9] 胡庆海, 李俊华, 王学求, 等. 河北省永清县农耕地土壤肥力主要指标现状评价[J]. 物探与化探, 2023, 47(6): 1611 – 1619. HU Qinghai, LI Junhua, WANG Xueqiu, et al. Evaluation of the primary soil fertility indices for the agricultural area of Yongqing County, Hebei Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(6): 1611 – 1619. (in Chinese)
- [10] GUAN Wenlu, SHAO Xiaohou, LI Yuanyuan. Effects of irrigation and nitrogen management on the growth and nitrogen concentration of paddy soil and rice plants[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2020(6): 4053 – 4063.
- [11] 王娟, 陈安全, 宋文瑾, 等. 生物炭种类与施量对新复垦区土壤水分入渗过程的影响[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 388 – 394. WANG Juan, CHEN Anquan, SONG Wenjin, et al. Effect of biochar species and application amounts on soil water infiltration of newly reclaimed area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 388 – 394. (in Chinese)
- [12] FIORENTINO N, SANCHEZ-MONEDERO M, LEHMANN J, et al. Interactive priming of soil N transformations from combining biochar and urea inputs: a ¹⁵N isotope tracer study[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 131: 166 – 175.
- [13] BAKSHI S, BANIK C, LAIRD D A. Quantification and characterization of chemically-and thermally-labile and recalcitrant biochar fractions[J]. Chemosphere, 2018, 194: 247 – 255.
- [14] CHEN Xi, YANG Shihong, DING Jie, et al. Effects of biochar addition on rice growth and yield under water-saving irrigation [J]. Water, 2021, 13(2): 209.
- [15] 杨青川, 艾玉廷, 鲁建承, 等. 生物炭对水稻茎秆抗倒性的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2021, 52(1): 1 – 7. YANG Qingchuan, AI Yuting, LU Jiancheng, et al. Effect of biochar on lodging resistance of rice stem [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2021, 52(1): 1 – 7. (in Chinese)
- [16] 徐彬, 王小利, 蒙婧熙, 等. 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 Bin, WANG Xiaoli, MENG Ruoxi, et al. 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)
- [17] 荣国华, 周景云, 吴鸿宇, 等. 流动分析仪与凯氏定氮仪测定土壤全氮含量之比较研究[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 204 – 208. RONG Guohua, ZHOU Jingyun, WU Hongyu, et al. Comparative study in the flow analyzer and the Kjeldahl nitrogen analyzer for measuring soil total nitrogen[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 204 – 208. (in Chinese)
- [18] ZHANG Bingchao, HU Han, GUO Zhengyu, et al. Plastic-film-side seeding, as an alternative to traditional film mulching, improves yield stability and income in maize production in semi-arid regions[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2023, 22(4): 1021 – 1034.
- [19] 刁硕, 王红旗, 邱晨. 土壤酸碱度测定方法的差异研究与探讨[J]. 环境工程, 2015, 33(增刊1): 1015 – 1017. DIAO Shuo, WANG Hongqi, QIU Chen. Differences and discussion on determination methods of soil pH value [J]. Environmental Engineering, 2015, 33(Supp. 1): 1015 – 1017. (in Chinese)
- [20] WANG Shunsheng, LIU Tengfei, YANG Junyue, et al. Simulation effect of water and nitrogen transport under wide ridge and furrow irrigation in winter wheat using HYDRUS – 2D[J]. Agronomy, 2023, 13(2): 17.
- [21] 刘晶晶. 土壤中铵态氮测定方法探讨[J]. 当代化工, 2022, 51(6): 1509 – 1512. LIU Jingjing. Determination method of ammonium nitrogen in soil[J]. Contemporary Chemical Industry, 2022, 51(6): 1509 – 1512. (in Chinese)
- [22] 魏丽红. 土壤全磷测定中样品分解与比色方法的比较研究[J]. 辽宁农业职业技术学院学报, 2009, 11(2): 1 – 3. WEI Lihong. Comparison of decomposition and colorimetry methods in determination of soil total phosphorus[J]. Journal of Liaoning Agricultural Technical College, 2009, 11(2): 1 – 3. (in Chinese)
- [23] ZHANG Jun, ZHAO Yusen, YING Xin. Changes in and evaluation of surface soil quality in *Populus x Xiaohei* shelterbelts in midwestern Heilongjiang Province, China[J]. Journal of Forestry Research, 2021, 32(3): 1221 – 1233.
- [24] 李子君, 李英姿, 王海军. 鲁中南山地丘陵区土地利用方式对土壤理化性质的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2023, 54(2): 254 – 266. LI Zijun, LI Yingzi, WANG Haijun. Effects of land use types on soil physical and chemical properties in mountainous and hilly areas in central and southern Shandong Province[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition),

- 2023,54(2):254-266. (in Chinese)
- [25] 李政昊,刘斯泓,李嘉琦,等. 辽宁省铁岭植烟区土壤肥力特征及综合评价[J]. 土壤通报,2022,53(3):631-639.
LI Zhenghao, LIU Sihong, LI Jiaqi, et al. Soil fertility characteristics and comprehensive evaluation of tobacco-planting area in Tieling of Liaoning Province[J]. Chinese Journal of Soil Science,2022,53(3):631-639. (in Chinese)
- [26] 李志洪,王淑华. 土壤容重对土壤物理性状和小麦生长的影响[J]. 土壤通报,2000,31(2):55-57,96.
LI Zhihong, WANG Shuhua. Effects of soil bulk density on soil physical properties and wheat growth[J]. Chinese Journal of Soil Science,2000,31(2):55-57,96. (in Chinese)
- [27] BURRELL L D, ZEHETNER F, RAMPAZZO N, et al. Long-term effects of biochar on soil physical properties [J]. Geoderma,2016,282:96-102.
- [28] 王小芳,李毅,姚宁,等. 生物炭改良棉花-甜菜间作土壤理化性质与盐分效果分析[J]. 农业机械学报,2022,53(4):352-362.
WANG Xiaofang, LI Yi, YAO Ning, et al. Effects of biochar on soil physical and chemical properties and salt in cotton-sugarbeet intercropping field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(4):352-362. (in Chinese)
- [29] 刘金霞,肖朝霞. 秸秆还田与减施氮肥对双季稻产量及土壤理化性质的影响[J]. 热带农业科学, 2023,43(4):1-5.
LIU Jinxia, XIAO Chaoxia. Effects of returning double-season rice straw to the field and reducing N-fertilizer on yield and soil physicochemical properties[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture,2023, 43(4):1-5. (in Chinese)
- [30] 刘小粉,刘春增,贾萌萌,等. 化肥减施条件下紫云英翻压量对土壤物理特性和水稻产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2021,49(16):67-73.
LIU Xiaofen, LIU Chunzeng, JIA Mengmeng, et al. Effects of *Astragalus vulgaris* application amount on soil physical properties and rice yield under condition of reduced chemical fertilizer application[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021,49(16):67-73. (in Chinese)
- [31] RATNAJIT S, LAKSHMAN G, RAYMOND T, et al. Investigating the influence of biochar amendment on the physicochemical properties of podzolic soil[J]. Agriculture,2020,10(10):471.
- [32] 杨红,徐唱唱,曹丽花,等. 米林县不同种植年限蔬菜大棚土壤 pH 和无机氮变化特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2016,35(12):2397-2404.
YANG Hong, XU Changchang, CAO Lihua, et al. Research on the variation characteristics of pH and mineral nitrogen concentrations in different planting time polytunnel soils of Milin County in Tibet[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016,35(12):2397-2404. (in Chinese)
- [33] 梁佩筠,许超,吴启堂,等. 淹水条件下控释氮肥对污染红壤中重金属有效性的影响[J]. 生态学报,2013,33(9):2919-2929.
LIANG Peijun, XU Chao, WU Qitang, et al. Effect of different controlled-release nitrogen fertilizers on availability of heavy metals in contaminated red soils under waterlogged conditions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(9):2919-2929. (in Chinese)
- [34] NKOH J N, ABDULHAALI M B, SHAMIM M, et al. A critical-systematic review of the interactions of biochar with soils and the observable outcomes[J]. Sustainability,2021,13(24):13726.
- [35] 姚奇,俞若涵,张洪宇,等. 生物炭施用对冬小麦农田土壤养分及作物产量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2022(3):68-74.
YAO Qi, YU Ruohan, ZHANG Hongyu, et al. Effects of biochar application on soil nutrients and crop yield in winter wheat farmland[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China,2022(3):68-74. (in Chinese)
- [36] 郑恩楠,朱银浩,胡建宇,等. 水肥耦合对水稻生长土壤呼吸与无机氮的影响[J]. 农业机械学报,2021,52(9):272-279.
ZHENG Ennan, ZHU Yin hao, HU Jianyu, et al. Coupling of water and fertilizer methods on growth of rice, soil respiration and inorganic nitrogen [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(9):272-279. (in Chinese)
- [37] LIU Qi, ZHANG Yanhui, LIU Benjuan, et al. How does biochar influence soil N cycle? A Meta-analysis[J]. Plant and Soil, 2018, 426(1-2):211-225.
- [38] 汤家喜,李玉,朱永乐,等. 生物炭与膨润土对辽西北风沙土理化性质的影响研究[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(3):143-150.
TANG Jiayi, LI Yu, ZHU Yongle, et al. Effect of biochar and bentonite on physicochemical properties of sandy soil in northwestern Liaoning Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022,36(3):143-150. (in Chinese)
- [39] 张汴泓,王成己,杨铭榆,等. 生物炭对植烟土壤氮循环微生物及其功能基因的影响[J]. 南方农业学报,2022, 53(9):2444-2456.
ZHANG Bianhong, WANG Chengji, YANG Mingyu, et al. Effects of biochar on nitrogen cycling microbes and their functional genes in tobacco-growing soils[J]. Journal of Southern Agriculture,2022, 53(9):2444-2456. (in Chinese)
- [40] 王娜,徐嘉翼,张鑫,等. 聚天门冬氨酸尿素对水稻产量及田面水氮素变化的综合影响[J]. 农业资源与环境学报,2021, 38(1):96-103.
WANG Na, XU Jiayi, ZHANG Xin, et al. Effects of polyaspartic acid urea on rice yield and nitrogen concentrations in paddy field ponding water[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment,2021, 38(1):96-103. (in Chinese)

- XIA Changgao, SUN Yan, ZHOU Wenwen. Study on energy management of double power electric tractor[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(1): 234 - 240. (in Chinese)
- [16] WANG Y, SUN Z, CHEN Z. Development of energy management system based on a rule-based power distribution strategy for hybrid power sources[J]. Energy, 2019, 175: 1055 - 1066.
- [17] CASTAINGS A, LHOMME W, TRIGUI R, et al. Comparison of energy management strategies of a battery/supercapacitors system for electric vehicle under real-time constraints[J]. Applied Energy, 2016, 163: 190 - 200.
- [18] 徐立友,刘恩泽,刘孟楠,等. 燃料电池/蓄电池混合动力电动拖拉机能量管理策略[J]. 河南科技大学学报(自然科学版),2019,40(2): 80 - 86.
- XU Liyou, LIU Enze, LIU Mengnan, et al. Energy management strategy of fuel cell and storage battery hybrid electric tractor [J]. Journal of Henan University of Science and Technology(Natural Science), 2019, 40(2): 80 - 86. (in Chinese)
- [19] IBRAHIM M, JEMEI S, WIMMER G, et al. Nonlinear autoregressive neural network in an energy management strategy for battery/ultra-capacitor hybrid electrical vehicles[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 136: 262 - 269.
- [20] WIECZOREK M, LEWANDOWSKI M. A mathematical representation of an energy management strategy for hybrid energy storage system in electric vehicle and real time optimization using a genetic algorithm[J]. Applied Energy, 2017, 192: 222 - 233.
- [21] GOMOZOV O, TROVAO J P, KESTELYN X, et al. Adaptive energy management system based on a real-time model predictive control with nonuniform sampling time for multiple energy storage electric vehicle [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017,66(7): 5520 - 5530.
- [22] SONG Z, HOFMANN H, LI J, et al. Optimization for a hybrid energy storage system in electric vehicles using dynamic programming approach[J]. Applied Energy, 2015, 139: 151 - 162.
- [23] ZHANG S, XIONG R. Adaptive energy management of a plug-in hybrid electric vehicle based on driving pattern recognition and dynamic programming[J]. Applied Energy, 2015, 155: 68 - 78.
- [24] SHEN J, KHALIGH A. A supervisory energy management control strategy in a battery/ultracapacitor hybrid energy storage system[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1(3): 223 - 231.
- [25] XIONG R, CAO J, YU Q. Reinforcement learning-based real-time power management for hybrid energy storage system in the plug-in hybrid electric vehicle[J]. Applied Energy, 2018, 211: 538 - 548.
- [26] WANG J, LIU P, HICKS-GARNER J, et al. Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(8): 3942 - 3948.
- [27] LIU C, WANG Y, CHEN Z. Degradation model and cycle life prediction for lithium-ion battery used in hybrid energy storage system[J]. Energy, 2019, 166: 796 - 806.

(上接第 401 页)

- [41] 张垚,索龙,潘凤娥,等. 生物质炭对砖红壤性质与养分及硝化作用的影响[J]. 农业资源与环境学报,2016, 33(1):55 - 59.
- ZHANG Yao, SUO Long, PAN Feng'e, et al. Effects of biochar application on soil physical properties, nutrients and nitrification in latosol[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment,2016, 33(1):55 - 59. (in Chinese)
- [42] 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)
- [43] 张莉,李赞堂,王士银,等. 水稻氮素吸收低效型突变体 osnad1 的生理和遗传分析[J]. 作物杂志,2018(3):68 - 76.
- ZHANG Li, LI Zantang, WANG Shiyin, et al. Physiological and genetic analysis of rice mutant osnad1 defective in nitrogen absorption[J]. Crops,2018(3):68 - 76. (in Chinese)
- [44] 王思宇,刘赛男,黄玉威,等. 生物炭对植物土传病害的影响与作用机制研究进展[J]. 沈阳农业大学学报,2022,53(5): 611 - 619.
- WANG Siyu, LIU Sainan, HUANG Yuwei, et al. Research progress on the influenced mechanism of biochar on soil-borne diseases of plants[J]. Journal of Shenyang Agricultural University,2022,53(5):611 - 619. (in Chinese)
- [45] 夏桂敏,刘宇庭,罗秀兰,等. 覆膜条件下铁改性磷负载生物炭对花生磷素利用及产量的影响[J]. 农业工程学报,2023, 39(20):176 - 187.
- XIA Guimin, LIU Yuting, LUO Xiulan, et al. Effects of iron-modified and phosphorus loaded biochar on the phosphorus utilization and yield of peanut under film mulching[J]. Transactions of the CSAE,2023,39(20):176 - 187. (in Chinese)
- [46] 王晓琪,姚媛媛,陈宝成,等. 淹水条件硝态氮和铵态氮配施对水稻生长与土壤养分的影响[J]. 土壤,2020, 52(2):254 - 261.
- WANG Xiaoqi, YAO Yuanyuan, CHEN Baocheng, et al. Effects of combined application of nitrate and ammonium on rice growth and soil nutrients under flooding conditions[J]. Soils,2020, 52(2):254 - 261. (in Chinese)
- [47] 杜加银,胡兆平,陈海宁. 肥料中不同比例硝态氮对红壤水稻农艺性状及产量的影响[J]. 现代农业科技, 2017(21):4 - 5.
- DU Jiayin, HU Yaoping, CHEN Haining. Effects of different proportion of nitrate on agronomic characters and yield of rice in red soil[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2017(21):4 - 5. (in Chinese)
- [48] 易亚科,周志波,陈光辉. 土壤酸碱度对水稻生长及稻米镉含量的影响[J]. 农业环境科学学报,2017,36(3):428 - 436.
- YI Yake, ZHOU Zhibo, CHEN Guanghui. Effects of soil pH on growth and grain cadmium content in rice[J]. Journal of Agro-Environment Science,2017,36(3):428 - 436. (in Chinese)