



沈阳农业大学学报
Journal of Shenyang Agricultural University
ISSN 1000-1700, CN 21-1134/S

《沈阳农业大学学报》网络首发论文

题目: 生物炭对中国水稻产量与氮肥利用效率的影响
作者: 孙媛媛, 顾闻琦, 吴迪, 修立群, 唐亮, 张伟明, 陈温福
收稿日期: 2025-04-10
网络首发日期: 2025-05-28
引用格式: 孙媛媛, 顾闻琦, 吴迪, 修立群, 唐亮, 张伟明, 陈温福. 生物炭对中国水稻产量与氮肥利用效率的影响[J/OL]. 沈阳农业大学学报.
<https://link.cnki.net/urlid/21.1134.S.20250527.1413.002>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

孙媛媛, 顾闻琦, 吴迪, 等. 生物炭对中国水稻产量与氮肥利用效率的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2025, 56(3)

SUN Y Y, GU W Q, WU D, et al. Effects of Biochar incorporation on rice yield and nitrogen fertilizer use efficiency in China[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2025, 56(3)

生物炭对中国水稻产量与氮肥利用效率的影响

孙媛媛, 顾闻琦, 吴迪, 修立群, 唐亮, 张伟明*, 陈温福*

(沈阳农业大学 农学院/水稻所/国家生物炭研究院, 沈阳 110161)

摘要: [目的] 探明生物炭在我国水稻生产上的应用效果、主要因子及调控途径。[方法] 检索、查阅相关研究文献, 综合分析、评估生物炭我国水稻产量和氮肥利用效率的影响, 定量分析土壤性质、生物炭特性及农艺措施等主要因子对生物炭效应的影响及贡献。[结果] 生物炭还田可以使我国水稻产量平均提高 9.70%, 氮肥利用效率平均提高 12.00%。生物炭的材质、C/N、pH 和制备温度是影响其作用效果的关键因素, 其中秸秆和壳类生物炭的作用效应最为显著。对于不同水稻土壤, 生物炭在碱性 (pH>7.5)、酸性 (pH<6.5) 和细质、中等质地土壤中的作用效果最显著。而在生物炭还田后, 剂量和时间效应明显, 即施用量与作用效果正相关 (在施炭量 > 10 t·hm⁻², 增产效应显著), 但随还田时间延长而效应减弱。同时, 农艺措施也会影响生物炭的还田效果, 在干湿交替和高氮肥 (> 250 kg·hm⁻²) 栽培条件下, 生物炭的作用最显著。对于不同稻作区而言, 生物炭在南方稻作区的作用显著。进一步的机器学习分析表明, 影响生物炭还田效应的主要因素依次为: 土壤性质 > 生物炭特性 > 农艺措施。[结论] 在我国水稻生产中应用生物炭, 可有效提高水稻产量和氮肥利用效率, 通过科学统筹生物炭材质、剂量、农艺措施及应用土壤的性质, 可实现水稻增产提(氮)效, 为促进我国水稻低碳、绿色、可持续发展提供理论与技术支撑。

关键词: 生物炭; 水稻; 产量; 氮肥利用率

中图分类号: S511.06

文献标识码: A

文章编号: 1000-1700(2025)03-0000-00

Effects of Biochar Incorporation on Rice Yield and Nitrogen Fertilizer Use Efficiency in China

SUN Yuan-yuan, GU Wen-qi, WU Di, XIU Li-qun, TANG Liang,
ZHANG Wei-ming*, CHEN Wen-fu*

(National Biochar Research Institute, Rice Research Institute, College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

Abstract: [Objective] This study aims to elucidate the efficacy, key determinants, and regulatory mechanisms of biochar application in Chinese rice production systems. [Method] Through a comprehensive literature analysis, we evaluated biochar's impact on rice yield and nitrogen use efficiency (NUE) in China. Quantitative assessments identified the relative contributions of soil properties, biochar characteristics, and agronomic practices to the observed effects. [Result] The results indicate that biochar incorporation increased rice yields by an average of 9.70% and enhanced NUE by 12.00% nationwide. Key biochar properties—raw material, C/N ratio, pH, and pyrolysis temperature—significantly influenced performance, with crop residue- and husk-derived biochar demonstrating superior efficacy. Biochar was most effective in alkaline (pH>7.5) and acidic (pH<6.5) soils with fine to medium textures. A positive dose-response relationship existed, with notable yield improvements at application rates exceeding 10 t·hm⁻².

收稿日期: 2025-04-10

基金项目: 黑土地保护与利用科技创新工程专项项目 (XDA28090300); 国家重点研发计划项目 (2023YFD1501202; 2016YFD0300904-4); 院士专项基金项目 (2009)

第一作者: 孙媛媛 (1994-), 男, 博士研究生, 从事生物炭与作物生理生态研究, E-mail: biochar1sun@stu.syau.edu.cn

通信作者: 张伟明 (1981-), 男, 博士, 副教授, 从事生物炭与作物调控、土壤改良研究, E-mail: biochar_zwm@syau.edu.cn

陈温福 (1955-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 从事水稻与生物炭科学技术研究, E-mail: wfchen5512@126.com

however the efficacy declined over time. Meanwhile, the agronomic practices, particularly alternate wetting and drying irrigation and high nitrogen fertilization ($>250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), optimized biochar performance. Regional analysis highlighted greater benefits in southern rice-growing areas. Machine learning revealed a hierarchical influence pattern, with soil properties exerting the greatest impact, followed by biochar characteristics and agronomic practices. **[Conclusion]** Strategic biochar implementation offers a viable pathway to enhance productivity and resource efficiency in Chinese rice systems. Optimizing biochar selection, application dose, and management practices based on site-specific soil conditions can simultaneously boost yields and NUE, thereby advancing low-carbon, environmentally sustainable rice production in China.

Key words: biochar; rice; yield; nitrogen fertilizer use efficiency

我国是全球水稻生产和消费的主要国家之一,水稻种植面积大、单产水平高,在保障国家粮食安全中发挥重要作用^[1]。但是,受工业、城镇化和农业种植业结构调整等方面的影响,特别是在全球气候变化背景下,高强度耕作、过量施肥、环境污染等对水稻稳产、增产造成严峻挑战^[2],如何在有限的资源与环境条件下提高地力和养分利用效率,促进水稻生产可持续发展,已成为当前亟待解决的重要问题。近年来,生物炭(Biochar)作为一种新型土壤改良剂,得到国内外广泛关注和研究认可,在农业、环境等领域应用广泛^[3]。研究表明,将秸秆等农业废弃物制备成生物炭用于农业生产,可有效改良土壤理化特性,提升土壤肥力,提高养分利用效率,促进作物生长^[4]。但是,在水稻生产上,生物炭的应用效果存在很大差异,有研究认为生物炭可显著提高水稻产量和氮肥利用效率^[5-7],但也有研究表明生物炭对水稻产量无显著影响,甚至有降低趋势^[8-9]。前人通过整合分析研究认为,在全球范围内生物炭还田可以提高水稻产量 18.7%~28.4%^[6],平均提高氮肥利用效率达 12.04%^[10],其响应水平与气候环境条件等密切相关^[11]。在东亚地区,生物炭可以促进水稻产量平均提高 16.2%^[12],而在我国生物炭可促进氮肥利用效率提高 4.76%,且在不同作物和南、北方地区间差异显著^[13]。上述研究表明,生物炭对水稻产量和氮肥利用效率有积极调控作用,但在我国现有相关研究多集中于特定试验条件,点散而面广,缺乏系统的综合定量分析,对水稻生产的理论与技术支撑和实践指导还相当有限,特别是基于大田生产条件下,生物炭对我国水稻产量和氮肥利用效率影响的作用规律、主要因子及贡献率等方面的综合分析、评估研究还少见报道。

为此,本研究在检索、查阅主要相关文献基础上,综合分析、评估生物炭对我国水稻产量与氮肥利用效率的影响,旨在量化生物炭还田对水稻产量和氮肥利用效率的综合影响,明确影响生物炭效应的主要因子及其相对贡献,阐明生物炭调控水稻产量和氮肥利用效率的作用途径。研究结果将为科学评价生物炭在我国水稻生产中的应用效果提供理论基础,为优化生物炭作物生产应用技术,促进水稻地力与产能可持续发展提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

以“生物炭”“水稻”“产量”“氮肥”为主题词,在 Web of Science 和 CNKI 数据库中检索相关文献,根据我国水稻生产实际情况和评价要求,设定主要文献检索范围(表 1),检索时间截至 2024 年 1 月 1 日,共获得 49 篇论文。

表1 文献检索范围

Table 1 Literature screening conditions

检索条件 Screening category	具体范围 Condition
地点及试验方法 Location and experiment method	中国境内的水稻田间试验 Rice field experiments conducted in China
试验组设置 Experiment treatments setup	不添加生物炭的对照组和生物炭处理试验组,其余田间管理措施一致 Control group (without biochar) vs. biochar-treated group, with consistent field management practices otherwise
重复次数 Number of replicates	每种处理至少设置 3 次重复 At least 3 replicates established per treatment
研究内容 Research contents	明确报道水稻产量及氮肥施入量 Explicitly report rice yield and nitrogen fertilizer application rate
生物炭处理 Biochar treatments	使用未经改性处理的一次性生物炭施入 Single-dose application of unmodified biochar

1.2 方法

使用 Get Data Graph Digitizer 2.24 软件提取图形数据,并按式(1)换算标准差和标准误。本研究中氮肥利用效率以氮肥偏生产力(PFPN, Nitrogen Fertilizer Partial Productivity)表示,计算方法如式(2)。

$$SD = SE * \sqrt{n} \quad (1)$$

式(1)中:SD代表标准差;SE代表标准误;n代表试验重复数。

$$PFPN = \frac{Y}{F} \quad (2)$$

式(2)中:PFPN代表氮肥偏生产力;Y代表水稻每公顷水稻产量(kg);F代表氮肥施入量为每公顷纯氮施入量(kg)。

1.2.1 数据分类 根据生物炭效应的主要影响因素,将检索文献数据按生物炭性状、土壤因素、农艺措施等进行分类。生物炭性状:(1)施入量分为0~10,10~20,<20 t hm⁻²; (2)C/N分为30,50,100,200; (3)pH值分为<8.5,8.5~10.0,>10.0; (4)制备温度分为<400℃,400~500℃,500~600℃,600~700℃; (5)原材料分为秸秆类、壳类、粪便类和木质类。土壤因素:(1)土壤质地根据美国农业部(United States Department of Agriculture, USDA)土壤质地三角^[14-15],分为细、中、粗质地; (2)土壤pH值分为>7.5,6.5~7.5,<6.5^[16]。稻作区:鉴于相关研究分布零散、不均以及气候环境条件等差异性,为便于统计分析,根据我国水稻生产区划^[17],将稻作区划分为北方稻作区和南方稻作区。农艺措施:(1)氮肥施入量分为<150,150~250,>250 kg hm⁻²; (2)水分管理分为长期淹水、干湿交替; (3)生物炭施用时长分为<1年,1~2年,>2年。

1.3 数据分析

本研究采用对数响应比ln R作为效应值^[18],计算方法见式(3),分别计算生物炭还田处理的水稻产量和氮肥利用效率的响应比。对缺失标准差的数据,采用已知变异系数均值法估算^[19]。方差变量(Vln R)的计算方法见式(4)。采用随机效应模型^[20]分析,并计算95%置信区间^[21]。

$$\ln R = \frac{\ln X_T}{\ln X_C} \quad (3)$$

式中:X_T代表试验组的平均值;X_C代表对照组的平均值。

$$V_{\ln R} = \frac{SD_T^2}{n_T X_T^2} + \frac{SD_C^2}{n_C X_C^2} \quad (4)$$

式中:SD_T²代表试验组的方差SD_C²代表对照组的方差;n_T代表试验组的重复数;n_C代表对照组的重复数;X_T代表试验组的平均值;X_C代表对照组的平均值。

1.4 机器学习分析

为评估不同因素对生物炭效应的相对重要性及贡献,本研究采用随机森林(Random Forest)^[22-23]和增强回归树模型(XGBoost)^[24]机器学习模型进行分析,将数据库按照7:3分为训练集和测试集,通过贝叶斯逐步优化策略,将模型训练集优化至R²>0.9,预测值优化至R²>0.6。其中,基于随机森林算法,以ln R为预测指标,构建变量重要性分析模型,变量重要性采用均方差增加值进行评估。增强回归树采用学习速率为0.01,树复杂性为5,袋分数为0.75的设置参数进行变量重要性的建模评估。

1.5 数据处理与可视化

采用Excel 2019软件对数据结果进行统计和建立数据库,采用Origin 2023软件绘图,采用Python中RandomForestClassifier和XGBoost工具进行机器学习分析。

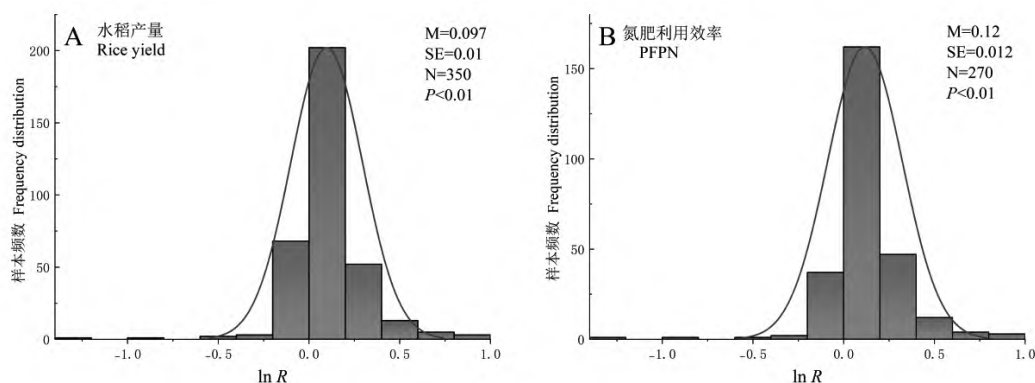
2 结果与分析

2.1 生物炭对水稻产量和氮肥利用效率的影响

由图1可知,生物炭还田显著提高我国水稻产量和氮肥利用效率,平均增幅分别为9.70%和12.00%。其中,水稻产量和氮肥利用效率对生物炭还田的ln R,主要分布在-0.2~0.2,分布检验表明生物炭对我国水稻产量和氮肥利用效率的ln R满足数据分析的必要条件(符合正态分布,P<0.01)。

2.2 生物炭对水稻产量和氮肥利用效率影响的主要因子

2.2.1 生物炭性状 由图2可知,当生物炭施入量>10 t hm⁻²,C/N<100,pH<8.5,制备温度400~600℃时,增

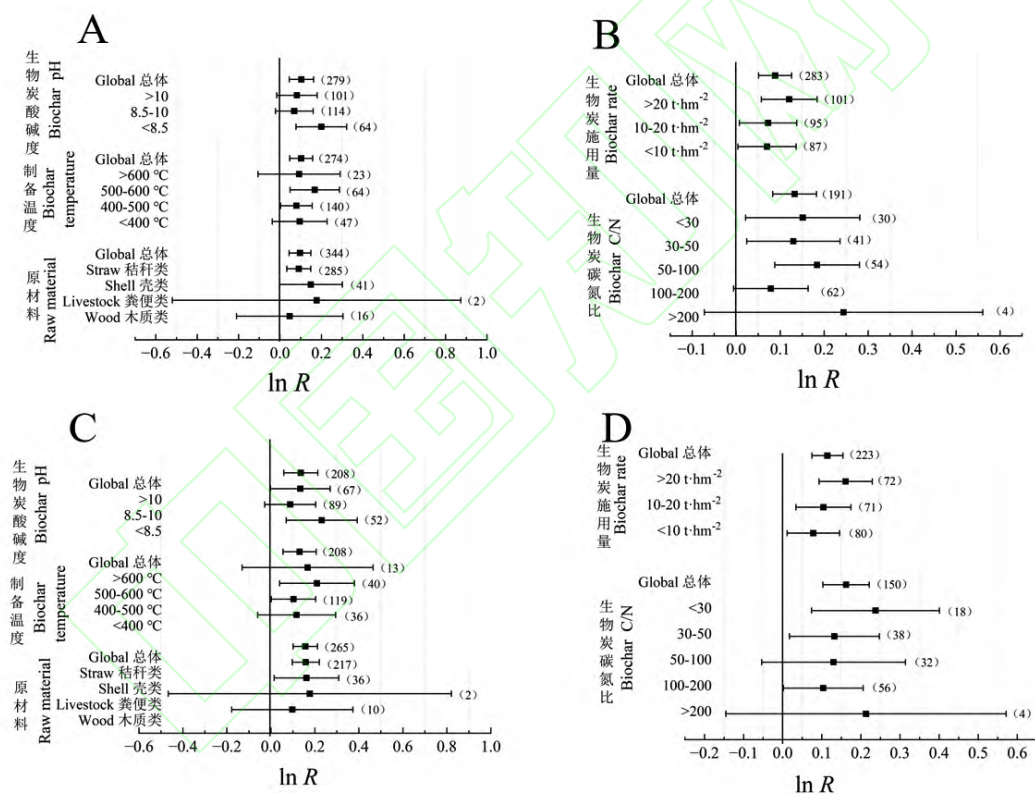


M. 平均值; SE. 标准误; N. 样本量; P. 显著性检验概率水平; 曲线为数据的高斯分布

M. Mean; SE. Standard errors; N. Sample sizes; P. Probability level of the significance test; The curve represents the Gaussian distribution of the data

图1 水稻产量(A)和氮肥利用效率(B)的数据分布

Figure 1 Data distribution of rice yield(A) and nitrogen fertilizer partial productivity(B)



误差线表示95%的置信区间, 误差线与零线相交表示处理与对照间无显著差异; 括号内数字表示样本数量。下同

The error line represents a 95% confidence interval, and the intersection of the error line and the zero line indicates no significant difference between the treatment and the control; Numbers in brackets indicate the number of samples. The same below

图2 生物炭性状对生物炭调控水稻产量(A和B)和氮肥利用效率(C和D)的影响

Figure 2 Effects of biochar properties on rice yield(A and B) and nitrogen fertilizer partial productivity(C and D) with biochar incorporation

产效应显著, 产量增幅为7.25%~19.98%。其中, pH<8.5的生物炭效果最佳。生物炭施入量与氮肥利用效率增加效应正相关, 增幅为7.84%~16.10%。其中, 当C/N<200、pH<8.5时提升效果显著, 分别可达16.21%和23.11%。制备温度>500℃时效果显著, 但>600℃后略有下降。在原材料材质上, 秸秆类和壳类生物炭效果最佳, 分别提高15.84%和16.15%。

2.2.2 土壤性质及稻作区 由图3可知,在pH>7.5或<6.5的土壤中,施用生物炭提高水稻产量24.87%和7.5%,提高氮肥利用效率28.97%和9.48%。在pH值为6.5~7.5时提高作用不显著。在细质土壤中,生物炭效果最佳,可提高水稻产量和氮肥利用效率18.8%和17.07%。随着土壤质地中粗质增加,生物炭作用效果逐渐变小,在粗质土壤中生物炭的作用效果不显著。在南方稻作区生物炭对水稻产量和氮肥利用效率的影响达显著水平(8.9%和11.44%),而在北方稻作区提升未达显著水平。北方稻作区生物炭对水稻产量和氮肥利用效率影响的平均效应值要高于南方。

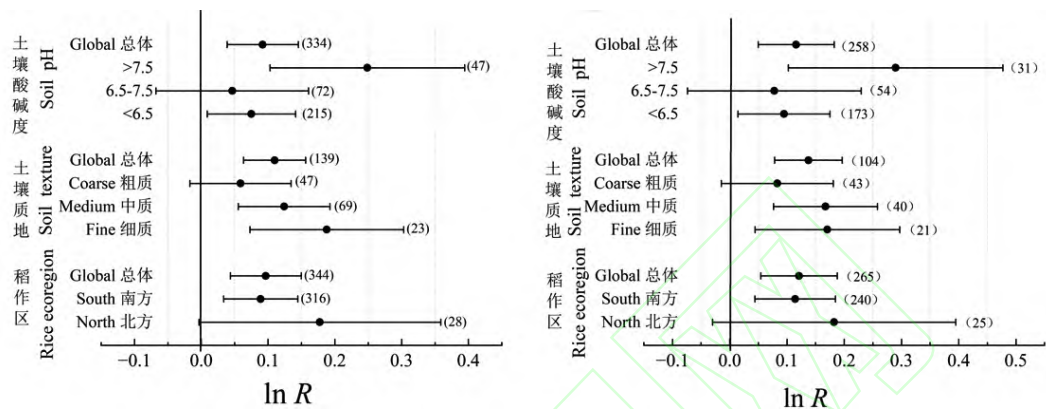


图3 土壤性质对生物炭调控水稻产量(A)和氮肥利用效率(B)的影响

Figure 3 Effects of soil properties on rice yield(A) and nitrogen fertilizer partial productivity(B) with biochar incorporation

2.2.3 农艺措施 由图4可知,干湿交替水分管理可显著提高生物炭的效应值。在高氮肥(>250kg·hm⁻²)时,生物炭的效应可达显著水平(17.18%)。在生物炭还田<1年时可显著提高水稻产量10.45%,但随着还田时间延长增产效应减弱。其他农艺措施条件下,水稻产量效应值虽表现为正效应,但和对照相比差异并不显著。生物炭还田可以有效提高氮肥利用效率11.27%~12.35%,其中在干湿交替水分管理(15.72%)、还田时长<1年(12.93%)和高氮施入量(20.98%)条件下,可达显著水平。而在其他农艺措施条件下,效应值差异不显著,为5.56%~12.05%。

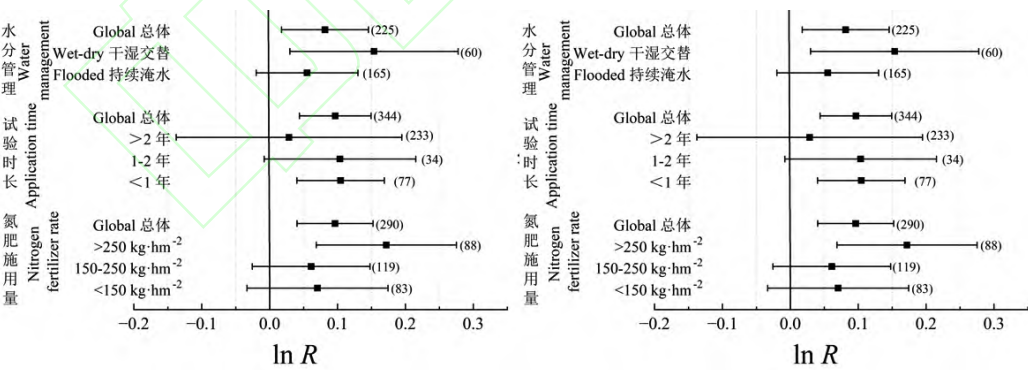
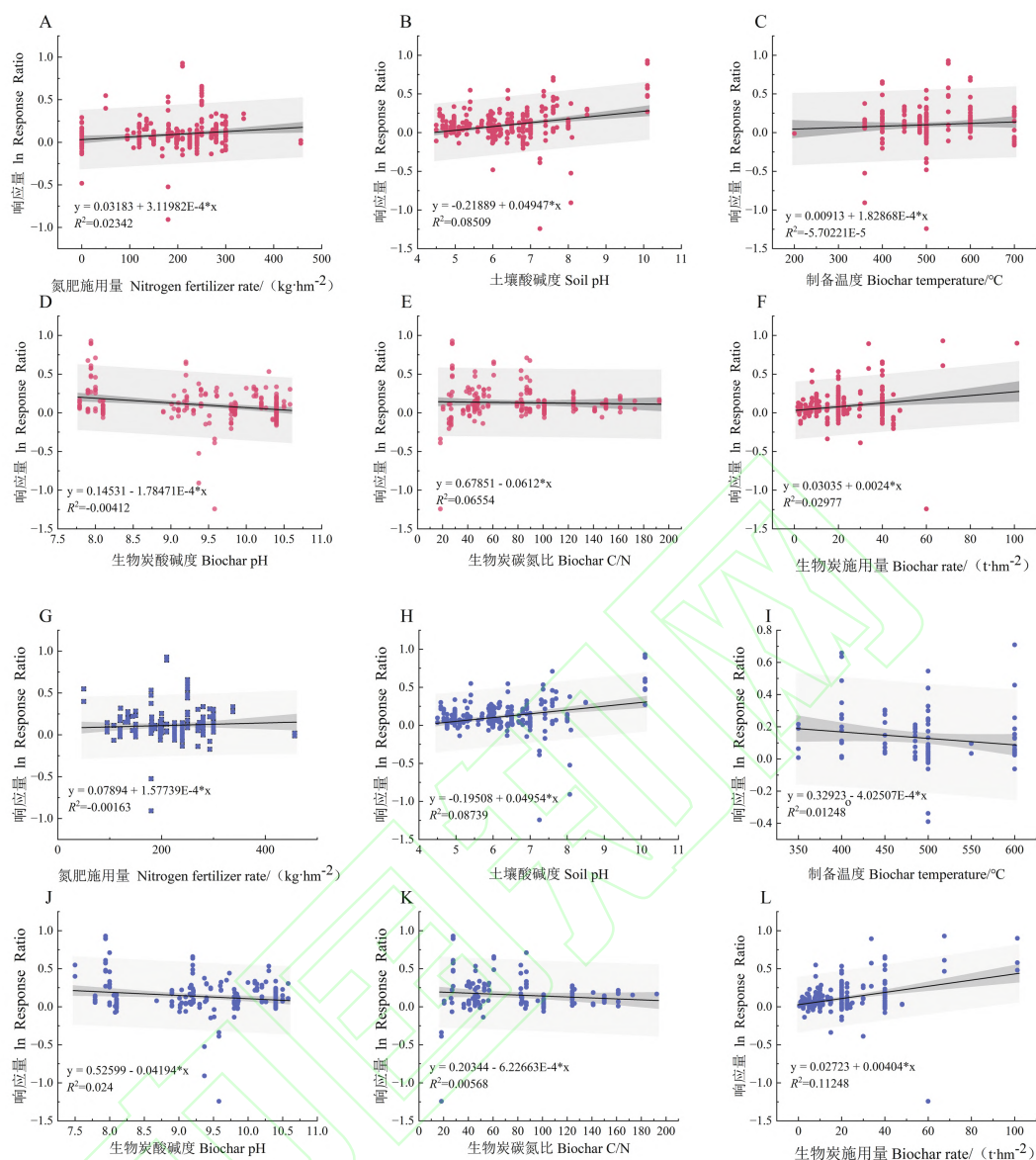


图4 农艺措施对生物炭调控水稻产量(A)和氮肥利用效率(B)的影响

Figure 4 Effects of agronomic measures on rice yield(A) and nitrogen fertilizer partial productivity(B) with biochar incorporation

2.3 生物炭调控水稻产量和氮肥利用效率的主效因子及贡献率分析

混合线性模型分析结果表明(图5 A~F),氮肥、生物炭施入量,土壤pH值与生物炭提升产量的效应值正相关,生物炭pH值与生物炭效应值负相关,而生物炭C/N、制备温度与生物炭效应值不存在线性关系。由图5G~L可知,土壤pH值和生物炭施用量均可提高生物炭提升氮肥利用效率的效应值,而生物炭pH值和制备温度提高,则导致生物炭效应值降低。



A ~ F. 水稻产量与变量因子的关系; G ~ L. 氮肥利用效率与变量因子的关系
A-F. The relationship between rice yield and variable factors; G-L. The relationship between nitrogen fertilizer partial productivity and variable factors

图5 水稻产量和氮肥利用效率与变量因子的相关性分析

Figure 5 Correlation analysis of variables with rice yield and nitrogen fertilizer partial productivity

基于随机森林模型,由生物炭对水稻产量效应值的影响因子判别评估结果可知(图6A和C),土壤pH值相对贡献值可达23.1%,其余因子贡献值依次分别为生物炭C/N(16.40%)>生物炭施用量(14.12%)>生物炭pH值(12.82%)>氮肥施用量(9.93%)>土壤质地(8.17%)。同时,通过增强回归树模型评估,发现土壤质地(19.83%)>土壤pH值(19.53%)>生物炭C/N(13.15%)>生物炭原材料(9.23%)>氮肥施用量(8.57%)>还田时长(8.39%)。生物炭对氮肥利用效率效应值影响的因子判别评估结果表明(图6B和D),基于随机森林模型评估,土壤pH值和生物炭C/N相对贡献值分别为25.37%和22.55%,其余因子贡献值依次分别为生物炭pH值(12.26%)>制备温度(11.94%)>生物炭施用量(11.77%)>氮肥施用量(11.35%)。在增强回归树模型评估下,土壤pH值的相对贡献值最高(29.53%),其余因子分别为稻作区(16.27%)>生物炭施用量(16.10%)>氮肥施用量(13.66%)>生物炭C/N(12.38%)。综上,机器学习分析结果表明,影响生物炭效应的因素重要性排序为土壤性质>生物炭特性>农艺措施,其中土壤pH值、质地和生物炭C/N、pH值是最重要的影响因素。

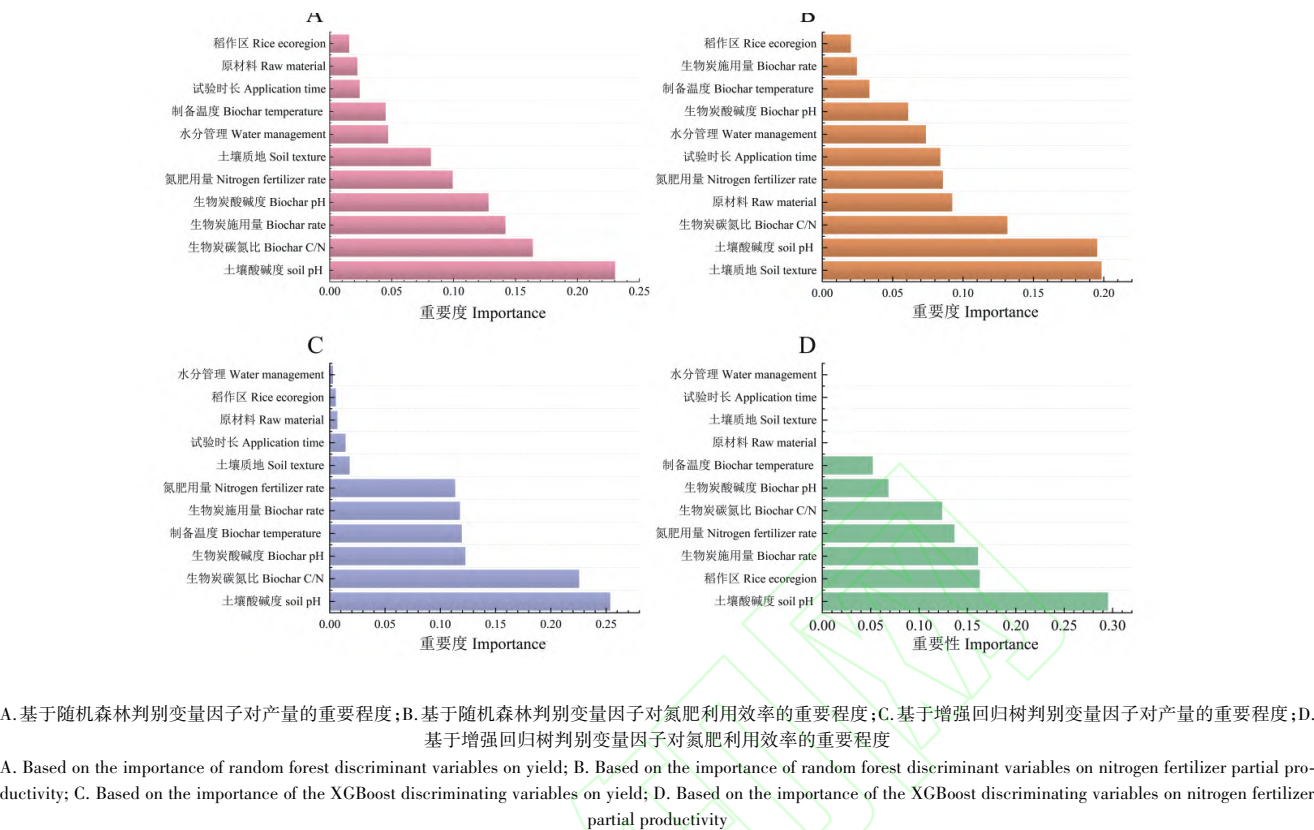


图6 变量因子机器学习判别分析

Figure 6 Machine learning discriminant analysis of variables

3 讨论

3.1 生物炭对水稻产量和氮肥利用效率的影响

研究表明,在我国水稻生产中应用生物炭可促进水稻增产,这与前人研究结果一致^[12,25]。生物炭促进水稻增产的主要原因是改良土壤物理特性、促进土壤养分提升、提高作物抗逆性及生理功能和持续提升土壤肥力^[3]。生物炭具有丰富多微孔结构和较大比表面积^[26],施入土壤后可降低土壤容重,改良土壤物理结构,增加土壤孔隙度,为水稻根系及地上部生长提供良好的土壤水、气、热等物理环境条件^[27];生物炭本身含有N、P、K、Ca、Mg等多种养分元素,在土壤中可以释放一定养分,增加土壤有效养分含量,并且由于其具有较强吸附力和丰富表面官能团,可吸持氮、磷、钾等养分,从而减少养分淋溶损失,进而提高土壤养分总量及有效性,从而促进作物对养分的吸收利用^[28];生物炭可以调节土壤pH值、抑制土壤酸化,降低污染物生物有效性,提高作物对重金属污染、盐碱等胁迫环境条件的耐受性与抗性^[29-30],生物炭含有的小分子物质以及一些其他活性物质,可以调控根系养分吸收、合成与利用,增强作物光合与抗氧化等生理功能^[31];与易分解的有机物料不同,生物炭具有高度稳定性,可在土壤中长期存在,发挥改良土壤结构、提升养分、激发微生物等多效协同作用,从而持续提高土壤肥力,促进作物稳产、增产^[4]。

同时,本研究发现生物炭显著提高氮肥利用效率,其主要作用途径及机制为增加氮素供应,减少氮素损失,促进氮素吸收利用,激发氮功能微生物。生物炭含有的氮素,可在土壤中释放,为作物生长提供一定氮素养分补充^[32]。生物炭的较强吸附能力可吸持铵态氮(NH₄⁺-N)、减少硝态氮(NO₃⁻-N)损失^[33]。同时,生物炭通过改善土壤通气状况和影响微生物活动,可能影响反硝化作用等气态氮损失过程^[27]。这种“开源”(缓慢供氮)与“节流”(减少损失)的双重作用,利于增加土壤有效氮库容量。生物炭可改善作物根系生长环境,促进根系生长及其对氮的吸收利用^[14]。同时,生物炭可能通过表面活性物质或影响信号分子,直接或间接刺激植物体内的氮代谢通路,提高氮素同化效率^[31]。生物炭为土壤微生物提供了良好栖息环境(如多孔隙结构)和潜在养分、能量来源(如不稳定碳组分和氮源养分),可能选择性地富集与氮循环相关的特定功能微生物(如固氮菌、氨氧

化菌),从而优化氮素转化的速率和方向^[34]。生物炭调控下的氮肥利用效率提升,有利于促进水稻生长,增加水稻生物量(扩源),为水稻最终产量提升(增库)奠定基础。

3.2 生物炭调控水稻产量和氮肥利用效率的主要因子

生物炭的效果并非普遍一致,而是受到生物炭性状、土壤性质及农艺管理措施等复杂因子调控。生物炭的原料、制备温度、C/N和pH值是影响其效果的主要因素。本研究发现,秸秆和壳类生物炭效果显著,可能与其富含硅(水稻喜硅)或具有更良好的孔隙结构有关^[35]。粪便类生物炭表现良好增产效应,可能与其含有较高的养分有关。400~600℃制备的生物炭效果最佳,这可能在此温度区间,生物炭既保留活性官能团(利于养分吸附和微生物互作),又形成较大的比表面积和孔隙度,并且低温炭利于减少氮损失,从而在养分保留、吸附和释放等方面达到了较好平衡^[36-37],这表明在水稻生产中应用生物炭,选择适宜的原料和热解工艺条件颇具重要性。高pH值生物炭可能会抑制土壤中有机氮的矿化,从而降低氮素有效性^[38]。高C/N比(>100)生物炭效果下降,可能引发微生物与作物间的氮素竞争,短期内不利于作物生长,尤其在低氮输入条件下。在机器学习评估中,生物炭的C/N和原材料贡献值占比较高(22.38%),进一步表明生物炭原材料及性质在提高产量和氮肥利用效率中的重要性。本研究结果表明,生物炭提高氮肥利用效率和产量存在剂量效应,在 $>10\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时增产效应更显著,这符合其作为土壤改良剂的作用模式,需要达到一定阈值才能显著改变土壤性质;在提高氮素利用效率方面,生物炭可通过微生物途径提高氮素有效性^[39],并通过生物炭表面的活性分子促进作物对氮素的吸收、转化^[40],形成“开源”。同时,生物炭可降低氮素的气态、径流和淋溶损失,增加对氮素的持留^[41],形成“节流”,这种“开源—节流”的双重协同效应提高了氮肥利用效率,而较高施炭量的作用增强,存在剂量效应。进一步的随机森林模型分析也表明,生物炭C/N、pH值、制备温度和施用量对提高氮肥利用率具有重要作用。

本研究结果表明,土壤pH值和质地是影响生物炭效应的主要因素,其中生物炭在碱性(pH>7.5)和酸性(pH<6.5)土壤中效果最显著,这可能由于生物炭在这些pH条件下对土壤酸碱度的调控能力更强,可通过改善土壤微生物生存环境,增强养分矿化等过程,进一步提高养分有效性和缓冲能力^[42-44]。在细质土壤中,生物炭的效果更为显著,这可能由于细质土壤通常结构较差,生物炭的团聚和孔隙改良作用更明显。同时,生物炭与黏粒的相互作用可能形成更稳定的有机无机复合体,利于碳封存和肥力保持^[45];在不同稻作区,南方稻作区效果优于北方,这可能与南方高温、高湿气候加速土壤有机质分解、酸化以及氮素淋溶损失等有关,生物炭改良效果因此而更突出。同时,也可能与南、北方不同稻作制度,如品种、施肥、灌溉方式等方面的差异有关。

本研究结果表明,水分管理、氮肥施用量和还田时间是影响生物炭效应的主要因素。干湿交替(而非持续淹水)条件下生物炭效果更优,这可能与干湿交替促进生物炭与土壤的交互作用、改善土壤氧化还原条件、利于根系呼吸和养分转化(如硝化作用)等有关^[46]。本研究中,氮肥施用量对生物炭调控氮肥利用效率的影响表现为先降低后升高,在高氮($>250\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)条件下,生物炭提升氮肥利用率的效果最显著,这表明生物炭在高氮投入系统中的“节氮”潜力大,可通过减少过量氮肥的损失来提高氮肥利用率。生物炭可显著补偿氮肥盈余和亏缺对水稻生长的影响^[47],促进氮素利用效率和水稻产量提高。生物炭效应随还田时间延长而减弱,这归因于生物炭在土壤中的“老化”过程^[48-50],其表面性质、孔隙结构等可能发生变化(如孔隙堵塞、表面氧化、矿物包被),导致其吸附能力下降,进而对氮素周转和作物吸氮产生影响^[51]。而在两种模型的机器学习评估结果中,氮肥施用量、还田时长的相对贡献值较高,进一步表明适宜农艺措施在发挥生物炭效应中的重要性。

在大田生产条件下,施用生物炭可显著提高我国水稻产量(9.70%)和氮肥利用效率(12.00%)。生物炭C/N、pH值、原材料和制备温度是决定生物炭效应的主要因子,秸秆、壳类和400~600℃制备的生物炭作用显著。土壤pH值、质地是影响生物炭效应的关键土壤性质因素,生物炭在pH<6.5或pH>7.5和细质、中等质地土壤中应用效应更显著。农艺措施管理也会影响生物炭效应,在干湿交替、高氮投入下生物炭效果显著,但随还田时间延长而效应减弱。机器学习分析表明,影响生物炭效应的因子重要性排序为:土壤性质>生物炭特性>农艺措施。研究结果为在水稻生产中科学评估和应用生物炭提供依据,为利用生物炭控氮、增产、提效提供新途径,对促进水稻生产绿色、可持续发展具有重要现实意义。

参考文献:

- [1] ZHUANG H M,ZHANG Z,HAN J C,et al.Stagnating rice yields in China need to be overcome by cultivars and manage-

- ment improvements[J]. *Agricultural Systems*, 2024, 221: 104134.
- [2] 宋洪远, 江帆. 基于稳产视角的粮食安全: 现实基础、主要问题和对策建议[J]. *中国工程科学*, 2024, 26(5): 178–189.
SONG H Y, JIANG F. Food security based on the perspective of stable production: current status, key issues, and policy recommendations[J]. *Strategic Study of Chinese Academy of Engineering*, 2024, 26(5): 178–189.
- [3] CHEN W F, MENG J, HAN X R, et al. Past, present, and future of biochar[J]. *Biochar*, 2019, 1(1): 75–87.
- [4] 王道涵, 杨婷赞, 于令令, 等. 生物炭改良风沙土对植物生长及养分的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2024, 55(1): 29–36.
WANG D H, YANG T Y, YU L L, et al. Effects of biochar on plant growth and nutrients in aeolian sandy soil[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2024, 55(1): 29–36.
- [5] XIA L L, CAO L, YANG Y, et al. Integrated biochar solutions can achieve carbon-neutral staple crop production[J]. *Nature Food*, 2023, 4(3): 236–246.
- [6] KORAI P K, ALI SIAL T, PAN G X, et al. Wheat and maize-derived water-washed and unwashed biochar improved the nutrients phytoavailability and the grain and straw yield of rice and wheat: A field trial for sustainable management of paddy soils[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 297: 113250.
- [7] KHAN Z, KHAN M N, LUO T, et al. Compensation of high nitrogen toxicity and nitrogen deficiency with biochar amendment through enhancement of soil fertility and nitrogen use efficiency promoted rice growth and yield[J]. *GCB Bioenergy*, 2021, 13(11): 1765–1784.
- [8] JIN P H, CHEN Z, WANG H, et al. 12-year continuous biochar application: Mitigating reactive nitrogen loss in paddy fields but without rice yield enhancement[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 375: 109223.
- [9] YIN X H, CHEN J N, CAO F B, et al. 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.
- [10] 肖婧, 徐虎, 蔡岸冬, 等. 生物质炭特性及施用管理措施对作物产量影响的整合分析[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(10): 1830–1840.
XIAO J, XU H, CAI A D, et al. A meta-analysis of effects of biochar properties and management practices on crop yield[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(10): 1830–1840.
- [11] LIU Y, LI H D, HU T S, et al. 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.
- [12] LEE J M, JEONG H C, GWON H S, et al. Effects of biochar on methane emissions and crop yields in east Asian paddy fields: A regional scale meta-analysis[J]. *Sustainability*, 2023, 15(12): 9200.
- [13] 夏浩, 张梦阳, 刘波, 等. 生物炭对作物氮肥利用率影响的整合分析[J]. *华中农业大学学报*, 2021, 40(3): 177–186.
XIA H, ZHANG M Y, LIU B, et al. Effect of biochar on nitrogen use efficiency of crops: A meta-analysis[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2021, 40(3): 177–186.
- [14] LIU Q, ZHANG Y H, LIU B J, et al. How does biochar influence soil N cycle? A meta-analysis[J]. *Plant and Soil*, 2018, 426(1): 211–225.
- [15] CHESWORTH W, CAMPS A M, MACÍAS F, et al. Classification of soils: Soil taxonomy[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008: 113–120.
- [16] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 175.
HUANG C. Soil Science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 175.
- [17] 苑俊丽, 梁新强, 李亮, 等. 中国水稻产量和氮素吸收量对高效氮肥响应的整合分析[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(17): 3414–3423.
FAN J L, LIANG X Q, LI L, et al. Response of rice yield and nitrogen uptake to enhanced efficiency nitrogen fertilizer in China: A meta-analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(17): 3414–3423.
- [18] LINQUIST B A, ADVIENTO-BORBE M A, PITTELKOW C M, et al. Fertilizer management practices and greenhouse gas emissions from rice systems: A quantitative review and analysis[J]. *Field Crops Research*, 2012, 135: 10–21.
- [19] LIU C, LU M, CUI J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1366–1381.
- [20] 马立晓, 李婧, 邹智超, 等. 免耕和秸秆还田对我国土壤碳循环酶活性影响的荟萃分析[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(9): 1913–1925.
MA L X, LI J, ZOU Z C, et al. Effects of no-tillage and straw returning on soil C-cycling enzyme activities in China: Meta-analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(9): 1913–1925.

- [21] XU H W, WANG M G, YOU C M, et al. Warming effects on C:N:P stoichiometry and nutrient limitation in terrestrial ecosystems[J]. *Soil and Tillage Research*, 2024, 235: 105896.
- [22] 徐 佳, 刘 峰, 吴华勇, 等. 基于人工神经网络和随机森林学习模型从土壤属性推测关键成土环境要素的研究[J]. *土壤通报*, 2021, 52(2): 269–278.
XU J, LIU F, WU H, et al. Predicting of key environmental factors from soil properties based on artificial neural network and random forest learning model[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(2): 269–278.
- [23] BIAU G, SCORNET E. Rejoinder on: A random forest guided tour[J]. *TEST*, 2016, 25(2): 264–268.
- [24] ELITH J, LEATHWICK J R, HASTIE T. A working guide to boosted regression trees[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2008, 77(4): 802–813.
- [25] XU Z C, ZHOU R, XU G R. Global analysis on potential effects of biochar on crop yields and soil quality[J]. *Soil Ecology Letters*, 2025, 7(1): 240267.
- [26] 张伟明, 修立群, 吴 迪, 等. 生物炭的结构及其理化特性研究回顾与展望[J]. *作物学报*, 2021, 47(1): 1–18.
ZHANG W M, XIU L Q, WU D, et al. Review of biochar structure and physicochemical properties[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(1): 1–18.
- [27] ZHANG Y Y, YAN C, WANG T, et al. Biochar strategy for long-term N₂O emission reduction: Insights into soil physical structure and microbial interaction[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2025, 202: 109685.
- [28] TIKORIA R, KUMAR D, SHARMA R, et al. Insights into the role of biochar as potential agent in the management of disease caused by phytopathogens: A review[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2023, 23(4): 4856–4885.
- [29] SUN X X, WANG J N, ZHANG M, et al. Combined application of biochar and sulfur alleviates cadmium toxicity in rice by affecting root gene expression and iron plaque accumulation[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2023, 266: 115596.
- [30] 李金业, 程 昊, 梁晓敏, 等. 酸化土壤改良与固碳研究进展[J]. *生态学报*, 2024, 44(17): 7871–7884.
LI J Y, CHENG H, LIANG X M, et al. Research progress of acidified soil amelioration and carbon sequestration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(17): 7871–7884.
- [31] 卞荣军, 刘晓雨, 郑聚锋, 等. 生物质炭可溶性有机物化学组成及生物活性意义[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(11): 2174–2186.
BIAN R J, LIU X Y, ZHENG J F, et al. Chemical composition and bioactivity of dissolvable organic matter in biochars[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(11): 2174–2186.
- [32] KERNER P, STRUHS E, MIRKOEI A, et al. Microbial responses to biochar soil amendment and influential factors: A three-level meta-analysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(48): 19838–19848.
- [33] LIU Q, LIU B J, ZHANG Y H, et al. Biochar application as a tool to decrease soil nitrogen losses (NH₃ volatilization, N₂O emissions, and N leaching) from croplands: Options and mitigation strength in a global perspective[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(6): 2077–2093.
- [34] WANG B H, GAO Y, LAI X Q, et al. The effects of biochar derived from feedstock with different Si and Al concentration on soil N₂O and CO₂ emissions[J]. *Environmental Pollution*, 2023, 317: 120731.
- [35] LENG L J, XIONG Q, YANG L H, et al. An overview on engineering the surface area and porosity of biochar[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 763: 144204.
- [36] 何逸婷, MARIOS D, 孙 嘉, 等. 不同原料、热解温度对生物质炭化学性质及结构组成的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2023, 46(4): 718–726.
HE Y T, MARIOS D, SUN J, et al. Effects of feedstock and pyrolysis temperature on chemical properties and structural composition of biochar[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2023, 46(4): 718–726.
- [37] LUO M K, JIANG X, LIU Y L, et al. Enhanced adsorption complexation of biochar by nitrogen-containing functional groups[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, 11(6): 111194.
- [38] WANG D, LAN Y, CHEN W F, et al. The six-year biochar retention interacted with fertilizer addition alters the soil organic nitrogen supply capacity in bulk and rhizosphere soil[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 338: 117757.
- [39] 盖霞普, 翟丽梅, 王洪媛, 等. 生物炭对土壤微生物量及其群落结构的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2017, 48(4): 399–410.
GAI X P, ZHAI L M, WANG H Y, et al. Impacts of biochar on soil microbial biomass and community structure[J]. *Journal of Shenyang Agricultural university*, 2017, 48(4): 399–410.
- [40] CRASWELL E T, CHALK P M, KAUDAL B B. Role of ¹⁵N in tracing biologically driven nitrogen dynamics in soils amended with biochar: A review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 162: 108416.

- [41] WU Y, YAN Y H, WANG Z W, et al. Biochar application for the remediation of soil contaminated with potentially toxic elements: Current situation and challenges[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 351: 119775.
- [42] MARTÍ E, SIERRA J, DOMENE X, et al. One-year monitoring of nitrogen forms after the application of various types of biochar on different soils[J]. *Geoderma*, 2021, 402: 115178.
- [43] XIA H, RIAZ M, TANG X F, et al. Insight into mechanisms of biochar-fertilizer induced of microbial community and microbiology of nitrogen cycle in acidic soil[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 336: 117602.
- [44] LIU Z W, ZHANG W, MA R L, et al. Biochar-plant interactions enhance nonbiochar carbon sequestration in a rice paddy soil[J]. *Communications Earth & Environment*, 2023, 4: 494.
- [45] GU W Q, WANG Y N, SUN Y Y, et al. Assessing the formation and stability of paddy soil aggregate driven by organic carbon and Fe/Al oxides in rice straw cyclic utilization strategies: Insight from a six-year field trial[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 951: 175607.
- [46] HAQUE A N A, UDDIN M K, SULAIMAN M F, et al. Rice growth performance, nutrient use efficiency and changes in soil properties influenced by biochar under alternate wetting and drying irrigation[J]. *Sustainability*, 2022, 14(13): 7977.
- [47] LI Y Q, YANG Y, SUN Y D, et al. Using nitrogen-loaded biochar for soil improvement to decrease applied nitrogen and stabilize rice yield under alternate wet-dry irrigation[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 223: 105493.
- [48] 李明玉, 丁梧秀, 王新武, 等. 施加生物炭对土壤理化性质的影响及其农业应用[J]. *东北农业大学学报*, 2024, 55(1): 79-96.
LI M Y, DING W X, WANG X W, et al. Influence of applying biochar on soil physicochemical properties and its agricultural applications[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2024, 55(1): 79-96.
- [49] 张 聪, 王震洪. 生物炭及其老化对农田 NH_3 挥发及 N_2O 排放的影响[J]. *生态学报*, 2024, 44(4): 1418-1428.
ZHANG C, WANG Z H. Effects of biochar and its aging on ammonia volatilization and nitrous oxide emission from farmland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(4): 1418-1428.
- [50] FENG Y Y, FENG Y F, LIU Q, et al. How does biochar aging affect NH_3 volatilization and GHGs emissions from agricultural soils?[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 294: 118598.
- [51] JOSEPH S, COWIE A L, VAN ZWIETEN L, et al. How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar[J]. *GCB Bioenergy*, 2021, 13(11): 1731-1764.