

刘志华, 张昕宇, 侯丽坤, 高芮淳, 周欣, 王玉超, 张璐阳, 宋接佳恩, 姜振峰, 李德萍. 生物质炭耦合种植模式对黑土有机碳组分和腐殖质特征及作物产量的影响[J]. 土壤学报, 2026,

LIU Zhihua, ZHANG Xinyu, HOU Likun, GAO Ruichun, ZHOU Xin, WANG Yuchao, ZHANG Luyang, SONG Jiejiaen, JIANG Zhenfeng, LI Deping. Effects of Biochar Coupled with Cropping Patterns on Mollisol Soil Organic Carbon Fractions, Humus Characteristics, and Crop Yield[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

## 生物质炭耦合种植模式对黑土有机碳组分和腐殖质特征及作物产量的影响\*

刘志华<sup>1</sup>, 张昕宇<sup>1</sup>, 侯丽坤<sup>1</sup>, 高芮淳<sup>1</sup>, 周欣<sup>1</sup>, 王玉超<sup>1</sup>, 张璐阳<sup>1</sup>, 宋接佳恩<sup>1</sup>, 姜振峰<sup>2</sup>, 李德萍<sup>3†</sup>

(1. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学农学院, 哈尔滨 150030; 3. 黑龙江省农垦科学院, 哈尔滨 150036)

**摘要:** 为探究生物质炭不同施用深度与种植模式耦合下对土壤碳库、作物产量的影响, 利用 2019 年建立的定位试验, 以不施生物质炭处理为对照 (CK), 种植模式为主区, 生物质炭施用方式为副区, 设置大豆-玉米轮作 (SM), 大豆连作 (S)、玉米连作 (M) 三种种植模式, 以及生物质炭 0~20 cm 混施 (B1)、0~40 cm 混施 (B2) 两种生物质炭施用处理, 2023 年采集 0~20 cm、20~40 cm 成熟期土壤, 测定土壤碳组分、腐殖质及作物产量。结果表明, 轮作土壤有机质、微生物生物量碳等碳组分含量显著高于连作, 大豆连作有机质显著高于玉米连作; 4 500 kg·hm<sup>-2</sup> 生物质炭对 0~20 cm 土壤有机质含量无显著影响, 但提高 0~20 cm 微生物生物量碳 (增加 11.3%~33.7%), 优化腐殖质 (胡敏酸含量增加 6.7%~25.7%、富里酸含量减少 0.4%~22.5%), 提高作物产量 (大豆增产 24.2%~32.4%, 玉米增产 13.0%~24.3%); 轮作与生物质炭协同作用下, 微生物生物量碳含量提高 22.8%~33.7%, 可溶性有机碳含量提高 17.6%~31.1%, 易氧化态有机碳含量提高 14.9%~26.6%, 胡敏酸 (HA) 含量提高 14.5%, 富里酸 (FA) 含量提高 11.8%~15.5%, 腐殖化 PQ 值 (HA/(HA+FA)) 提高 11.7%~17.4%。综上, 生物质炭耦合轮作有利于改善土壤碳库, 提升碳活性、优化腐殖质并增产, 有望在未来农业生产和土壤环境改善中发挥重要作用。

**关键词:** 大豆玉米轮作; 生物质炭; 土壤碳组分; 腐殖质; 增产

中图分类号: S153.6<sup>+2</sup> 文献标志码: A

### Effects of Biochar Coupled with Cropping Patterns on Mollisol Soil Organic Carbon Fractions, Humus Characteristics, and Crop Yield

LIU Zhihua<sup>1</sup>, ZHANG Xinyu<sup>1</sup>, HOU Likun<sup>1</sup>, GAO Ruichun<sup>1</sup>, ZHOU Xin<sup>1</sup>, WANG Yuchao<sup>1</sup>, ZHANG Luyang<sup>1</sup>, SONG Jiejiaen<sup>1</sup>, JIANG Zhenfeng<sup>2</sup>, LI Deping<sup>3†</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 3. Heilongjiang Academy of Land Reclamation Sciences, Harbin 150036, China)

\*黑龙江省自然科学基金项目 (LH2024C109) 和国家重点研发计划项目 (2024YFD1501003-03) 资助 Supported by the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province, China (No. LH2024C109) and the National Key R&D Program of China (No. 2024YFD1501003-03)

通讯作者 Corresponding author, E-mail: liping10276@126.com

作者简介: 刘志华 (1979-), 女, 副教授, 博士生导师, 研究方向为土壤生态。E-mail: zhihua-liu@neau.edu.cn

收稿日期: 2025-09-19; 收到修改稿日期: 2026-03-26; 网络首发日期 (www.cnki.net):

**Abstract:** 【Objective】 This study aimed to explore the effects of the coupling of different biochar application depths and cropping patterns on the soil carbon pool and crop yield. 【Method】 A long-term stationary experiment established in 2019 was adopted, with cropping pattern as the main plot and biochar application method as the subplot. Three cropping patterns were designed: soybean-maize rotation (SM), continuous soybean cropping (S), and continuous maize cropping (M). Three treatments were set up: biochar mixed application at 0-20 cm (B1), biochar mixed application at 0-40 cm (B2), and no biochar application (CK). Soil samples were collected from the 0-20 cm and 20-40 cm soil layers at the crop maturity stage in 2023, and the soil carbon fractions, humus components, and crop yield were determined. 【Result】 The results showed that: the contents of soil carbon fractions (e.g., soil organic matter (SOM) and microbial biomass carbon (MBC)) in the rotation system were significantly higher than those in continuous cropping systems, and the SOM content under continuous soybean cropping was significantly higher than that under continuous maize cropping. The application of biochar at 4 500 kg·hm<sup>-2</sup> had no significant effect on SOM content in the 0-20 cm soil layer, but it increased the activity of MBC in the 0-20 cm soil layer (by 11.3%-33.7%), optimized humus properties (humic acid (HA) content increased by 6.7%-25.7% while fulvic acid (FA) content decreased by 0.4%-22.5%). This treatment also improved crop yield (soybean yield increased by 24.2%-32.4% and maize yield increased by 13.0%-24.3%). Under the synergistic effect of rotation and biochar application, MBC content increased by 22.8%-33.7%, dissolved organic carbon (DOC) content increased by 17.6%-31.1%, readily oxidizable organic carbon (ROC) content increased by 14.9%-26.6%, HA content increased by 14.5%, FA content increased by 11.8%-15.5%, and the humus quality index (PQ) increased by 11.7%-17.4%. 【Conclusion】 The coupling of biochar application and crop rotation is beneficial for improving the soil carbon pool, enhancing carbon activity, optimizing humus properties, and increasing crop yield. This practice is expected to play an important role in future agricultural production and soil environment improvement.

**Key words:** Soybean-maize rotation; Biochar; Soil carbon fractions; Humus; Increasing yield

有机质是土壤质量的核心指标，其有机碳组分、腐殖质组成和稳定性直接调控土壤养分供给能力，进而影响作物生长及产量形成，是土壤生态与农业生产领域的核心研究方向。黑土以富含有机质著称，是我国重要的粮食生产基地，但近年来，黑土退化问题突出，东北典型黑土区农田退化面积为  $0.99 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，有机质含量从 1958 年的  $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \sim 60 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  降至 1990 年的  $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \sim 50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，每年以  $0.1 \sim 0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  速度损失<sup>[1]</sup>。腐殖质作为有机质的主要组成部分，其结构稳定性直接决定有机质转换速率与碳库固存能力<sup>[2]</sup>，而有机碳组分（如活性有机碳、惰性有机碳）的比例变化则反映土壤肥力演变趋势，二者共同制约黑土生产力可持续性，因此，明确有机碳组分与腐殖质的调控机制，是缓解黑土有机质下降、保障作物产量稳定的关键。

改善黑土质量的农艺措施中，轮作与外源有机物料添加已被证实有效。大豆和玉米轮作（以下简称“豆玉轮作”）是黑土区核心种植模式，不仅能够提升土壤有机质含量<sup>[3]</sup>，较玉米或大豆连作可使作物增产 5.9%~17.3%<sup>[4]</sup>，还能通过调节碳输入类型影响有机碳组分分配。生物质炭作为新型外源碳剂，可显著提升土壤有机碳含量并减少碳损失<sup>[5-6]</sup>。例如，施用 4 年后土壤有机碳含量较初始增加 11%~32%<sup>[7]</sup>；6 年后土壤有机碳储量翻倍<sup>[8]</sup>，其作用机制与补充稳定碳源、提升土壤碳固定能力密切相关<sup>[5-6]</sup>。

虽已有研究证实轮作或生物质炭单独对土壤有机碳总量、作物产量有积极影响<sup>[3-8]</sup>，但仍存在明显缺口：一是多数研究聚焦有机碳总量变化，对有机碳组分（活性、惰性碳）的细分效应及协同调控规律尚不明确；二是关于轮作与生物质炭耦合对黑土腐殖质组成（如胡敏酸、富里酸比例）及稳定性的影响缺乏系统研究。针对黑土区豆玉轮作与生物质炭耦合下，有机碳组分、腐殖质特征与作物产量的关联机制研究仍较薄弱，难以支撑黑土碳库固存与稳产的双重目标。

基于上述研究缺口，本研究以东北黑土为研究对象，选取生物质炭为外源添加物，设置豆玉轮作、连作两种种植模式，系统探究不同处理对黑土有机质含量、有机碳组分及腐殖质组成的影响，明确三者与作物产量的关联规律。研究结果可为揭示轮作-生物质炭耦合调控黑土碳库稳定性的内在

机理提供数据支撑,对保障东北黑土粮食生产安全与生态可持续性具有重要实践意义。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 供试材料

试验于2023年在东北农业大学实验实习基地(黑龙江省哈尔滨市,松嫩平原中部,45° 76' N, 126° 90' E)开展,该区域属温带大陆性季风气候,无霜期为130~150 d,冬季长达4个月,夏季2~3个月,年平均气温3.6℃,年降水量500~600 mm。试验区为典型黑土,2019年土壤初始理化性质如表1所示。

表1 土壤基础性质

Table1 The basic properties of soil

土壤类型 Soil type	OM/(g·kg <sup>-1</sup> )	EC/(μS·cm <sup>-1</sup> )	pH	AN/(mg·kg <sup>-1</sup> )	AP/(mg·kg <sup>-1</sup> )	AK/(mg·kg <sup>-1</sup> )
黑土 <sup>①</sup>	29.70	65.00	6.85	103.0	21.10	170.0

注: OM: 有机质; EC: 电导率; AN: 碱解氮; AP: 有效磷; AK: 速效钾。Note: OM: Organic matter; EC: Electrical conductivity; AN:

Alkaline hydrolyzable nitrogen; AP: Available phosphorus; AK: Available potassium. ①Black soil.

供试作物品种: 大豆选用当地主栽高产品种“黑河35”,玉米选用广泛种植的耐密品种“先玉335”,均符合黑土区农业生产实际。供试生物质炭购自辽宁金和福农业有限公司,以玉米秸秆为原料,在400℃缺氧条件下热解制备(该温度下制备的生物质炭兼具较高稳定性与养分释放潜力),其关键性质如下: pH9.57,有机质670 g·kg<sup>-1</sup>,碱解氮68.1 mg·kg<sup>-1</sup>,有效磷1.01 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾34.3 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

采用田间试验,以种植制度为主区,以生物质炭施用技术为副区,旨在明确二者耦合对黑土有机碳组分、腐殖质及作物产量的协同效应。每个处理三次重复,小区采用随机区组排列。小区面积4 m<sup>2</sup>,小区间距1 m,四周设置1 m宽保护行;全区统一采用人工播种,大豆种植密度为每公顷28万株,玉米种植密度为每公顷6万株,秋翻地,施用种肥,N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O复合肥300 kg·hm<sup>-2</sup>。

主区处理(种植制度): 设置3种模式: (1)大豆-大豆-玉米轮作(SM),3年完整轮作周期,2020—2022年为第一个周期(2020年大豆,2021年大豆,2022年玉米),2023年为第二个周期的第一年(种植大豆);(2)大豆连作(S): 2020—2023年连续4年种植大豆;(3)玉米连作(M): 2020—2023年连续4年种植玉米。2021—2022年土壤基础数据见Hou等<sup>[9]</sup>。

副区处理(生物质炭施用): 设置3种模式: (1)不添加生物质炭(CK),空白对照;(2)土壤0~20 cm混施(B1),生物质炭均匀混入0~20 cm耕层;(3)土壤0~40 cm混施(B2),生物质炭均匀混入0~40 cm土层。生物质炭施用量为4 500 kg·hm<sup>-2</sup>,基于黑土区玉米秸秆常规还田量为15 000 kg·hm<sup>-2</sup>,玉米秸秆炭化率约30%<sup>[9]</sup>,换算后确定数值,于2019年秋整地时一次性施入,按设计深度人工翻耕混匀(B1翻耕深度20 cm,B2翻耕深度40 cm),后续不再补施,确保长期定位效应。

常规田间管理,未施化肥。于2023年5月6日播种,2023年9月29日取样,代表玉米和大豆的成熟期,利用五点取样法采集0~20 cm、20~40 cm土壤,一部分鲜样于-20℃冰箱保存,另一部分自然风干后过2 mm筛,小区全部测产。

### 1.3 测定方法

土壤有机质含量采用重铬酸钾-浓硫酸氧化—外加热法测定,参照鲍士旦<sup>[10]</sup>的方法;土壤微生物生物量碳含量采用氯仿熏蒸—硫酸钾浸提法测定,参照Song等<sup>[11]</sup>的方法;土壤可溶性碳含量采用硫

酸钾浸提法测定。土壤易氧化态碳含量采用高锰酸钾氧化法测定，参照 Blair 等<sup>[12]</sup>的方法。土壤腐殖质组成采用焦磷酸钠-氢氧化钠法测定，参照 NY/T 1867—2010<sup>[13]</sup>的方法测定。

取小区内所有大豆、玉米植株，放通风处风干。玉米产量测定：单区处理随机取 10 穗，用电子天平测百粒重量，用直尺测穗长、单穗秃尖长，数出穗粒数及行数，并测定其他产量因子。大豆产量测定：大豆植株随机选取 10 株，采用直尺、天平和算术方式考查单株粒数、荚数、粒重和百粒重等因子。大豆、玉米采用称重法测定生物量。具体参照孙生林等<sup>[14]</sup>的方法，公式如下：

$$\text{大豆单产} / (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{百粒重} \times \text{株数} \times \text{株粒数} \times 166.7 \times 10^{-5} \times 90\% \times 15;$$

$$\text{玉米单产} / (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{百粒重} \times \text{穗数} \times \text{穗粒数} \times 166.7 \times 10^{-5} \times 85\% \times 15.$$

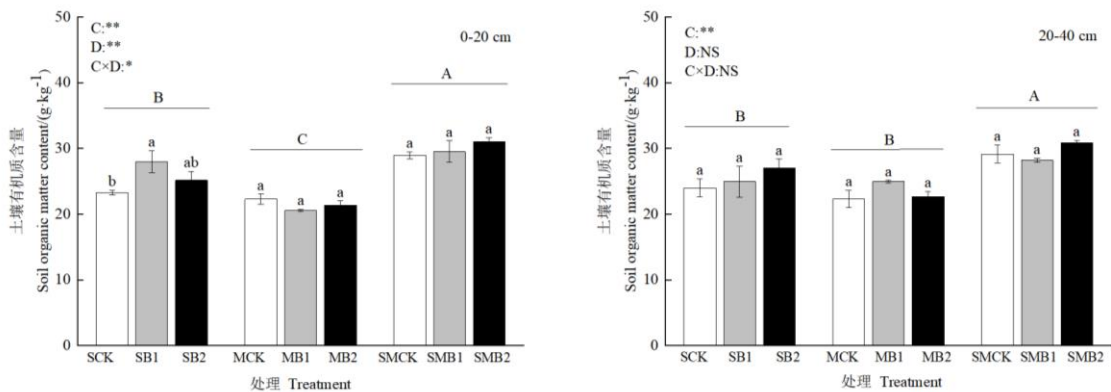
#### 1.4 数据处理

试验结果均采用 3 次重复试验的平均值±标准误表示，利用 Excel 2010 整理试验数据，采用 SPSS 27.0 数据分析软件进行单因素方差分析（One-way ANOVA），显著性水平设定为 0.05，使用最小显著差异法（LSD）进行显著性检验，Origin 2021 作图。

## 2 结果

### 2.1 生物质炭对不同种植模式土壤有机质的影响

如图 1 所示，轮作第 4 年（2023 年），土壤有机质（SOM）含量表现为豆玉轮作（SM）高于大豆连作（S）、玉米连作（M），表层（0~20 cm）表现为：SM>S>M，深层（20~40 cm）：SM>M>S。主体间效应显示，0~40 cm 耕层中种植模式显著性  $P<0.01$ ，表明种植模式对成熟期 SOM 含量影响极显著。具体而言，生物质炭施入对 2023 年大豆连作 0~20 cm 土层 SOM 含量有影响，具体表现为大豆连作下生物质炭 0~20 cm 混施处理（SB1）较大豆连作下不施生物质炭处理（SCK）的 SOM 含量增加 20.5%。



注：SCK：大豆连作不施生物质炭，SB1：大豆连作下生物质炭 0~20 cm 混施，SB2：大豆连作下生物质炭 0~40 cm 混施；MCK：玉米连作不施生物质炭，MB1：玉米连作下生物质炭 0~20 cm 混施，MB2：玉米连作下生物质炭 0~40 cm 混施；SMCK：大豆 - 玉米轮作不施生物质炭，SMB1：大豆 - 玉米轮作下生物质炭 0~20 cm 混施，SMB2：大豆 - 玉米轮作下生物质炭 0~40 cm 混施；“C、D、C×D”是用于主体间效应分析，C：种植模式，D：生物质炭施用深度，C×D：种植模式和生物质炭使用深度的交互作用，“\*”表示对结果有显著影响（ $P<0.05$ ），“\*\*”表示对结果有极显著（ $P<0.01$ ），“NS”表示对因素对结果无影响。不同小写英文字母表示同一种植方式不同生物质炭处理间差异达到显著水平（ $P<0.05$ ）；不同大写英文字母表示排除生物质炭的影响下不同种植模式之间的差异达到显著水平（ $P<0.05$ ）。下同。Note: SCK: Continuous soybean cropping without biochar application, SB1: Continuous soybean cropping with biochar mixed into the 0-20 cm plough layer, SB2: Continuous soybean cropping with biochar mixed into the 0-40 cm plough layer; MCK: Continuous maize cropping without biochar application, MB1: Continuous maize cropping with biochar mixed into the 0-20 cm plough layer, MB2: Continuous maize cropping with biochar mixed into the 0-40 cm plough layer; SMCK: Soybean-maize rotation without biochar application, SMB1: Soybean-maize rotation with

biochar mixed into the 0-20 cm plough layer, SMB2: Soybean-maize rotation with biochar mixed into the 0-40 cm plough layer. C, D and C×D are for the analysis of inter-subject effects, where C: Cropping pattern, D: Biochar application depth, C×D: Interaction between cropping pattern and biochar application depth. "\*" indicates a significant effect on the results ( $P<0.05$ ), "\*\*\*" indicates an extremely significant effect ( $P<0.01$ ), and "NS" indicates no significant effect of the factor on the results. Different lowercase letters indicate significant differences among different biochar treatments under the same cropping pattern ( $P<0.05$ ); different uppercase letters indicate significant differences among different cropping patterns with the effect of biochar excluded ( $P<0.05$ ). The same below.

图 1 生物质炭对不同处理下土壤有机质含量的影响

Fig.1 Effects of biochar on soil organic matter content under different treatments

## 2.2 生物质炭对不同种植模式碳组分的影响

**2.2.1 生物质炭对不同种植模式土壤微生物生物量碳的影响** 如图 2 所示, 种植模式间比较, 土壤微生物生物量碳 (MBC) 含量 0~20 cm 和 20~40 cm 耕层表现为: SM>M>S。主体间效应显示, 种植模式 (C)、生物质炭施用深度 (D) 对成熟期 0~40 cm 耕层 MBC 影响显著 ( $P<0.05$ ), 两者交互作用 C×D 仅对表层 0~20 cm 耕层影响显著 ( $P<0.05$ )。生物质炭提高表层 0~20 cm 和深层 20~40 cm 土壤 MBC 含量效果不同。在表层 0~20 cm 中, 大豆连作配生物质炭 20~40 cm 混施 (SB2) 较 SCK 提高土壤 MBC 含量 27.0%, 玉米连作配施生物质炭 0~20 cm 混施 (MB1)、玉米连作配施生物质炭 0~40 cm 混施 (MB2) 较玉米连作不配施生物质炭 (MCK) 提高土壤 MBC 含量 11.3%、12.4%, SMB1、SMB2 较 SMCK 提高土壤 MBC 含量 30.6%、33.7%。在深层 20~40 cm 耕层中, 仅 SMB2 较 SMCK 提高土壤 MBC 含量 22.8%, 其余无显著影响。

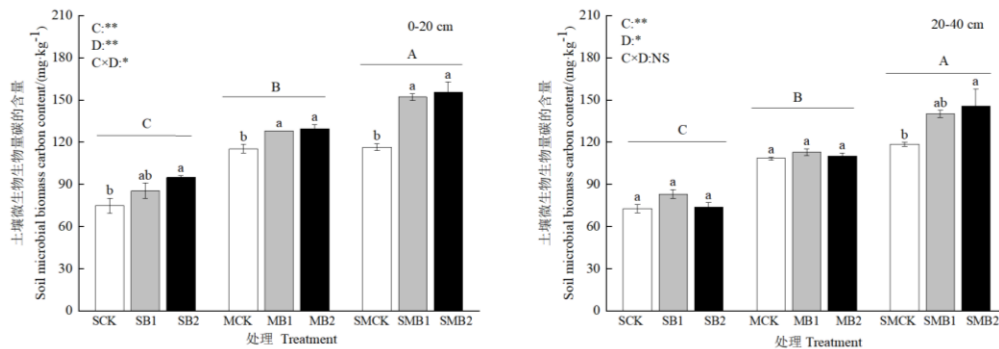


图 2 生物质炭对不同处理下土壤微生物生物量碳含量的影响

Fig.2 Effects of biochar on microbial biomass carbon content under different treatments

**2.2.2 生物质炭对不同种植模式土壤可溶性有机碳的影响** 如图 3 所示, 种植模式间比较, 表层土壤可溶性有机碳 (DOC) 含量表现为: SM>M>S, 深层土壤中 DOC 含量表现为 SM 大于 M 和 S。主体间效应显示, C、D 以及两者交互作用 C×D 均有显著影响 ( $P<0.01$ )。生物质炭对 0~20 cm 耕层土壤 DOC 含量均有提高作用。在 0~20 cm 表层土壤中, SB1、SB2 处理土壤 DOC 含量较 SCK 分别提高 22.5%、32.5%, SMB1、SMB2 较 SMCK 分别提高 30.2%、31.1%, MB1 较 MCK 提高 12.5%。与表层土壤不同, 生物质炭仅显著提高 M、SM 土壤 DOC 含量, 具体表现为 MB1 较 MCK 提高 10.4%, SMB1、SMB2 较 SMCK 分别提高 20.4%、17.6%。

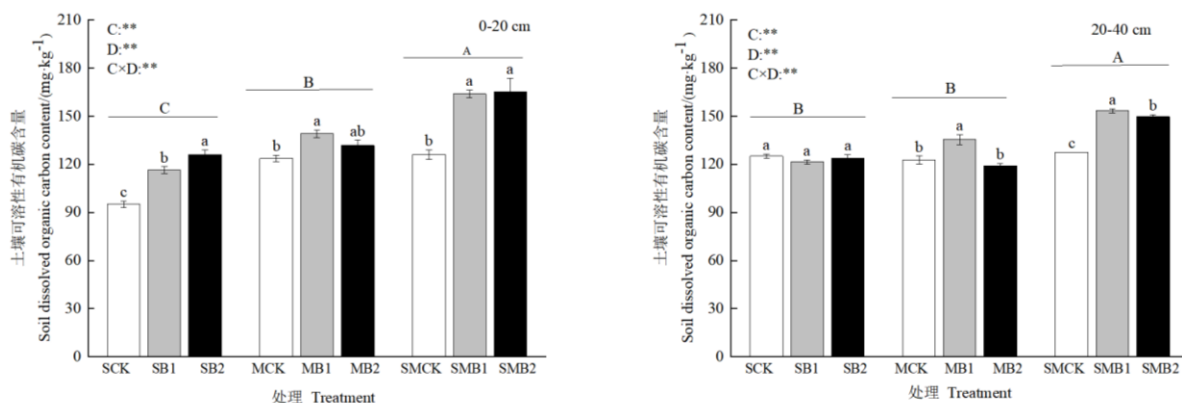


图3 生物质炭对不同处理下土壤可溶性有机碳含量的影响

Fig.3 Effects of biochar on dissolved organic carbon content under different treatments

**2.2.3 生物质炭对不同种植模式土壤易氧化态碳的影响** 如图4所示, 种植模式间比较, 0~40 cm 耕层中易氧化态有机碳 (ROC) 含量均表现为: SM>M。C、D 及两者交互作用对易氧化态碳含量均有极显著影响 ( $P<0.01$ )。在 0~20 cm 土层, SB1 处理土壤 ROC 含量较 SCK 提高 36.4%; SMB1、SMB2 较 SMCK 提高量 26.6%、26.2%。在 20~40 cm 土层, SB1、SB2 较 SCK 分别提高 22.4%、48.5%, SMB1、SMB2 较 SMCK 分别提高 14.9%、26.4%。

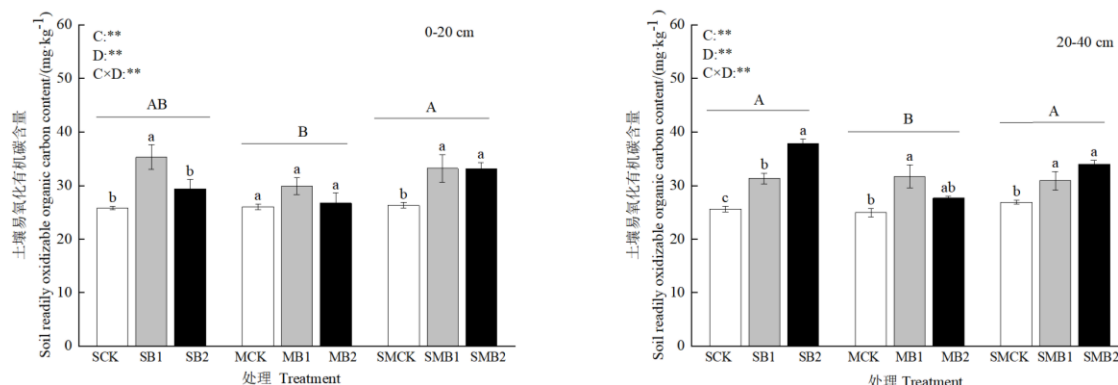


图4 生物质炭对不同处理下土壤易氧化态有机碳含量的影响

Fig.4 Effects of biochar on readily oxidizable organic carbon content under different treatments

### 2.3 生物质炭对不同种植模式土壤腐殖质的影响

生物质炭 B1、B2 对表层 S、M、SM 三种种植模式中胡敏酸 (HA) 含量无显著影响, 不同模式之间比较, 表层中胡敏酸含量表现为: SM>S>M (表 2)。

生物质炭提高表层土壤富里酸含量, 不同模式之间比较, 表层中富里酸含量表现为: SM>M>S (表 2)。具体表现为, 与对照相比, SB1 较 SCK 降低土壤富里酸含量 12.7%, SMB1、SMB2 较 SMCK 分别降低土壤富里酸含量 15.5%、11.8%。

生物质炭添加提高土壤胡敏素含量, 不同种植模式之间的比较, 成熟期土壤胡敏素含量从高到低为: SM>S>M, 具体表现为 SB1 较 SCK 提高土壤胡敏素含量 32.1%, 其余无显著影响 (表 2)。

土壤腐殖化 PQ 值为胡敏酸在 HA+FA 之中的比值, 是表现有机质腐殖化范围的指标。不同模式之间比较, 表层中 PQ 值表现为: SM>M>S (表 2)。在表层土壤中, SB1 较 SCK 提高大豆连作成熟期土壤 PQ 值 23.1%, SMB1、SMB2 较 SMCK 提高大豆玉米轮作土壤 PQ 值 14.9%、17.4%。

表 2 生物质炭对不同处理下 0~20 cm 耕层腐殖质的影响

Table 2 Effects of biochar on humus in 0-20 cm topsoil under different treatments

处理代号 Treatment codes	腐殖质组分 Humus component			
	胡敏酸 Humic acid/(g·kg <sup>-1</sup> )	富里酸 Fulvic acid/ (g·kg <sup>-1</sup> )	胡敏素 Humin/ (g·kg <sup>-1</sup> )	PQ/%
SCK	2.64±0.04a	2.49±0.07a	8.19±0.12b	51.48±0.38b
SB1	3.32±0.15a	1.93±0.17b	10.82±0.66a	63.37±1.67a
SB2	3.06±0.39a	2.22±0.16ab	9.13±0.56ab	57.51±5.03ab
MCK	2.59±0.15a	2.29±0.04a	7.88±0.28a	53.04±1.54a
MB1	2.47±0.04a	2.26±0.07a	7.05±0.17a	52.24±0.89a
MB2	2.55±0.25a	2.09±0.09a	7.57±0.29a	54.72±3.10a
SMCK	3.23±0.09a	2.89±0.11a	10.49±0.22a	52.79±1.52b
SMB1	3.61±0.11a	2.35±0.16b	10.98±0.80a	60.67±1.90a
SMB2	3.70±0.19a	2.26±0.03b	11.86±0.12a	61.97±0.99a
S	B	B	B	A
M	B	B	C	B
SM	A	A	A	A
C	**	**	**	*
D	NS	**	NS	**
C×D	NS	NS	**	NS

注：同列不同小写英文字母表示同一种植方式下不同生物质炭处理间差异达显著水平 ( $P<0.05$ )，不同大写英文字母表示排除生物质炭影响后不同种植模式间差异达显著水平 ( $P<0.05$ )；PQ：土壤腐殖质量指标，为 HA/(HA+FA) 的百分比。下同。Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different biochar treatments under the same cropping pattern ( $P<0.05$ ); Different uppercase letters indicate significant differences among different cropping patterns after excluding the effect of biochar ( $P<0.05$ ); PQ: Humus quality index of soil, referring to the percentage of HA in the sum of HA and FA ( $PQ = HA/(HA+FA)$ ). The same below.

与表层不同的是，生物质炭对深层富里酸和胡敏素含量无显著影响（表 3）。在深层 20~40 cm 中，生物质炭仅对 SM 模式有影响，具体为 SMB2 较 SMCK 提高 HA 含量 14.5%。深层中胡敏酸含量表现为 SM 大于 S 和 M。SMB1、SMB2 较 SMCK 提高大豆玉米轮作土壤 PQ 值 11.7%、16.1%。种植模式之间比较，深层土壤表现出大豆玉米轮作成熟期土壤 PQ 高于玉米连作。

表 3 生物质炭对不同处理下 20~40 cm 耕层腐殖质的影响

Table 3 Effects of biochar on humus in 20-40 cm soil under different treatments

处理代号 Treatment codes	腐殖质组分 Humus component			
	胡敏酸 Humic acid/(g·kg <sup>-1</sup> )	富里酸 Fulvic acid/ (g·kg <sup>-1</sup> )	胡敏素 Humin/ (g·kg <sup>-1</sup> )	PQ/%
SCK	2.59±0.15a	2.21±0.15a	8.95±0.47a	54.04±0.47a
SB1	3.02±0.30a	2.14±0.19a	9.14±1.24a	58.30±4.48a
SB2	3.19±0.07a	1.97±0.36a	10.35±0.37a	62.38±3.63a
MCK	2.51±0.30a	2.37±0.52a	7.88±0.62a	52.23±5.10a
MB1	2.72±0.22a	2.04±0.24a	9.54±0.10a	57.17±4.80a
MB2	2.68±0.27a	2.36±0.38a	7.94±0.56a	53.43±6.64a
SMCK	3.15±0.09b	2.90±0.04a	10.68±0.88a	52.06±0.61b
SMB1	3.53±0.11ab	2.55±0.24a	10.09±0.16a	58.17±1.67a
SMB2	3.66±0.17a	2.39±0.09a	11.67±0.19a	60.46±2.04a

S	B	A	B	A
M	C	A	B	A
SM	A	A	A	A
C	**	NS	**	NS
D	*	NS	NS	NS
C×D	NS	NS	NS	NS

## 2.4 生物质炭对不同种植模式作物产量的影响

生物质炭施用对大豆产量有提高作用，与同期大豆连作相比，轮作大豆产量分别提高 8.4% (SMB1)、9.1% (SMB2)；生物质炭使轮作大豆单株节数提高 15.0% (SMB2)，节间长提高 18.5% (SMB2)，单株荚数提高 15.7% (SMB1)；生物质炭施用下连作和轮作大豆单株粒数和百粒重随之提高，分别提高 12.1%~14.7% (单株粒数)、10.1%~18.1% (百粒重)，最终影响大豆产量，使之提高 24.2%~32.4%。种植模式之间比较，单就大豆产量而言，生物质炭施用条件下，轮作大豆产量高于连作 (表 4)。

就玉米产量而言，MB2 较 MCK 玉米单株穗重提高 20.8%、穗长提高 13.2%、行数提高 8.7%、产量提高 24.3%，MB1 较 MCK 玉米行数提高 8.5%、产量提高 13.0%，玉米芯重受生物质炭影响不显著 (表 5)。

表 4 生物质炭对大豆产量及其构成因子的影响

Table 4 Effects of biochar on soybean yield and its components

处理代号	株高	单株荚数	单株粒数	百粒重	产量
Treatment codes	Plant height/cm	Pod number	Grains	100 Grains weight/g	Yield/(kg·hm <sup>-2</sup> )
SCK	68.13±1.13a	17.23±0.26a	42.33±1.26b	18.81±0.16b	1 793±64b
SB1	68.83±0.52a	18.17±0.44a	48.13±1.30a	21.63±0.61a	2 346±129a
SB2	71.47±1.79a	18.03±0.35a	47.63±1.24a	20.77±0.14a	2 227±70a
SMCK	73.03±1.88a	18.17±0.28b	44.40±1.12b	19.24±0.30c	1 921±36.b
SMB1	75.22±5.22a	21.03±0.75a	49.77±1.82a	22.72±0.05a	2 544±92a
SMB2	75.77±6.31a	18.90±0.64b	50.93±0.30a	21.19±0.21b	2 429±37a

表 5 生物质炭对玉米产量及其构成因子的影响

Table 5 Effects of biochar on maize yield and its components

处理代号	单株穗质量	玉米芯质量	穗长	行数	产量
Treatment codes	Spike weight per plant/g	Corn cob mass/g	Spike length/cm	Rows	Yield/(kg·hm <sup>-2</sup> )
MCK	221.5±7.91b	35.81±1.46a	17.23±0.62b	16.47±0.33b	7 633±366b
MB1	243.8±5.27b	36.54±0.86a	18.69±0.37ab	17.87±0.29a	8 622.±63a
MB2	267.4±5.93a	32.21±1.34a	19.51±0.36a	17.90±0.06a	9 485±167a

## 3 讨论

### 3.1 生物质炭耦合种植模式对作物产量的影响

土壤地力条件的优良直接通过作物产出体现, 生物质炭因其高孔隙率、丰富的化学官能团、强吸附力等特性, 为土壤生物提供营养物质和繁殖场所, 促进土壤养分向地上植物供给, 进而提升土壤产出<sup>[15]</sup>。本研究发现, 相同种植模式下, 生物质炭的施用提高了大豆和玉米产量, 大豆产量增幅范围达 15.6%~32.4% (表 4), 玉米产量提高 13.0%~24.3% (表 5), 且产量呈现逐年稳增态势。生物质炭耦合种植模式时对作物产量的影响因生物质炭施用深度和种植模式出现差异, 对大豆产量呈增加效应 (表 4), 对连作玉米产量呈负效应 (表 5), 具体地, 浅施生物质炭 B1 处理 (0~20 cm 混施) 的作物产量表现更优: 连作大豆产量较 B2 (0~40 cm 混施) 处理高 5.3%, 轮作产量较 B2 处理高 4.7%, 玉米连作产量较 B2 低 9.1%。该趋势主要源于生物质炭施用深度差异所导致的耕层分布和浓度的不同: 在等量的生物质炭施用下, B1 处理组集中施用于 0~20 cm 表层土壤, 生物质炭在浅层土壤中呈现高度富集状态; 而 B2 处理组集中施用于 0~40 cm 深层土壤, 生物质炭在较深层土壤中被稀释, 耕层平均浓度及浅层含量均显著低于 B1 处理组。有研究表明, 生物质炭对土壤改良效果与其施用密度密切相关<sup>[4]</sup>。玉米作为典型深根系作物, 其养分吸收与根系生长更依赖深层土壤有效养分的持续供给。B2 处理下生物质炭在 0~40 cm 土层中分布更为分散, 浅层富集度不足, 对表层土壤养分库容与供应强度的提升作用较弱, 进而削弱了对玉米根系发育及养分吸收的促进效果; 而 B1 处理通过表层集中施用, 显著提高了浅层土体生物质炭含量与改良效应, 更有利于满足玉米生育期内的养分需求, 最终呈现出更为积极的土壤培肥与作物生长效应。此外, 生物质炭改变土壤物理结构、化学养分及微生物量<sup>[3]</sup>, 尤其提高微生物生物量碳水平 (图 2), 对作物产量形成持续促进作用, 这与前人研究结果<sup>[16]</sup>一致。玉米作为东北地区主栽作物, 其产量的稳定性对国家粮食安全至关重要。已有研究证实, 在华北平原玉米-小麦轮作体系中, 连续施用生物质炭可增加土壤有机碳含量, 显著提升玉米产量<sup>[17-18]</sup>。本研究中 B1 处理的玉米产量增幅低于 B2 (表 5), 可能与玉米须根系生长特性有关, 20~40 cm 土层分布着大量功能根系, 负责水分和深层养分吸收。0~40 cm 混施生物质炭能直接为深层根系提供养分和适宜根际环境, 而 0~20 cm 施用生物质炭的养分易被表层浅根快速消耗, 无法满足玉米中后期深层养分需求<sup>[19]</sup>。

### 3.2 生物质炭耦合种植模式对土壤有机质和碳组分的影响

土壤有机碳是评价土壤肥力的核心指标, 生物质炭作为富碳的有机物料, 经生物质的厌氧热解而成, 可通过增加有机碳输入影响土壤肥力<sup>[20]</sup>。研究发现, 生物质炭能够对有机质有提升作用, 同时有机质的重要组成——有机碳含量随着生物质炭的施入而呈现增加态势 (图 1)。Islam 等<sup>[21]</sup>发现, 生物质炭能稳定土壤有机质物理框架, 改变土壤微生物活性, 为土壤碳动态转换提供渠道。微生物生物量碳是土壤中“活体有机碳”, 周转速度快, 对土壤环境变化极其敏感; 可溶性碳是土壤微生物获取能量和碳的首要来源, 其含量直接影响微生物的代谢活性和生长繁殖; 易氧化有机碳是土壤肥力的“核心指标”, 与土壤团聚体稳定性、养分有效性、土壤保肥供肥能力呈正相关。本研究中, 施用生物质炭 4 年后, 虽然对 SOM 含量影响不显著 (图 1), 但 MBC 含量提高 11.3%~33.7% (图 2), DOC 含量提高 12.5%~32.5% (图 3), ROC 含量提高 26.2%~36.4% (图 4), 均表现为增加态势, 整体表现为:  $SM > M > S$ , 且生物质炭施用深度 (D) 与种植模式的交互作用 ( $C \times D$ ) 对碳组分影响显著 (图 1~图 4)。生物质炭添加后, 易氧化有机碳含量升高 (图 4), 说明生物质炭不仅增加了土壤碳储量, 还提升了碳库的活性。本研究发现, 生物质炭对 SOM 的固存效应并非普遍存在, 而是依赖于种植体系的养分循环特性——大豆连作表层土壤的碳库亏缺更明显 (图 3), B1 处理的表层碳输入恰好弥补了这一亏缺, 而轮作和玉米连作体系的碳循环更稳定, 生物质炭的补充效应被掩盖。此外, 大田环境中温度、湿度的剧烈波动会影响微生物矿化效率, 且成熟期土壤养分已被植株全生育期消耗<sup>[22]</sup>, 这也是生物质炭对 SOM 整体提升不显著的重要原因。

而碳组分差异的核心原因是种植模式的根系分布特性: 轮作模式中大豆浅根与玉米深根形成立体吸收网络, 能与生物质炭施用深度精准匹配——表层 B1 处理的碳源可被浅根微生物直接利用, 深层 B2 处理的碳源能适配深根根际微环境; 而连作模式 (S、M) 根系分布单一, S 模式以浅根为主、深层根系薄弱, M 模式碳库以稳定碳为主, 均难以充分转化不同深度的生物质炭碳源, 导致碳组分

提升效应受限<sup>[23]</sup>。

### 3.3 生物质炭耦合种植模式对腐殖质组分的影响

有机质经微生物转化分解形成腐殖质,其主要组成为胡敏酸(HA)、富里酸(FA)、胡敏素(HM),生物质炭可通过提高微生物代谢效率而促进腐殖质生成<sup>[24]</sup>。胡敏酸含有大量羟基和羧基,其含量高与土壤有机质复杂程度正相关,而腐殖质累积可进一步提升土壤肥力<sup>[25]</sup>。本研究结果显示,表层0~20 cm土壤胡敏酸含量和深层20~40 cm无差异,浅施生物质炭(B1)提高胡敏酸含量10.1%~29.6%(表2,表3),种植模式对腐殖质各组分及PQ值的影响占主导地位,生物质炭的调控效应依赖于施用深度与种植模式的耦合,且表层(0~20 cm)和深层(20~40 cm)表现出明显差异(表2,表3)。这一分布特征印证了轮作模式的优势:豆玉轮作(SM)通过大豆与玉米的养分需求互补、根系分布立体,优化了土壤微生物代谢环境<sup>[26-27]</sup>,促进腐殖质向稳定化(HA、HM累积)和高腐殖化(PQ值提升)方向发展,而连作模式(S、M)的养分循环单一,腐殖质组分优化效果受限。

由此可以发现,生物质炭对腐殖质组分的影响并非广谱性,而是表现出显著的“深度-模式”特异性:表层(0~20 cm):生物质炭的调控集中在FA降低和PQ提升,仅S模式的HM显著累积(表2),原因在于表层是微生物活动的主要区域,B1处理(0~20 cm混施)的生物质炭能直接参与微生物代谢——S模式表层土壤腐殖化程度较低,生物质炭的碳源输入可针对性促进HM生成<sup>[28]</sup>;SM模式则通过轮作与生物质炭的协同,强化FA向HA的转化,进而提升PQ<sup>[29]</sup>。深层(20~40 cm):生物质炭仅对SM模式有效,表现为HA提升和PQ提高,对S、M模式无显著影响(表3)。这是因为SM模式的玉米深根能延伸至深层土壤,与B2处理的生物质炭形成靶向匹配——生物质炭通过调节深层根际真菌群落代谢,促进HA生成<sup>[30]</sup>,而大豆连作、玉米连作的模式深层根系薄弱,无法激活生物质炭的腐殖质调控效应。

## 4 结论

大豆-玉米轮作(SM)在土壤有机质、微生物生物量碳等碳组分含量及大豆产量上均优于大豆连作(S)和玉米连作(M),且大豆连作有机质含量高于玉米连作;4 500 kg·hm<sup>-2</sup>生物质炭对土壤有机质提升有限,但可显著提高表层土壤活性碳组分、优化腐殖质组成(提高胡敏素、降低富里酸、提升PQ)并增加作物产量(大豆连作和轮作产量提升15.6%~32.4%)。二者耦合效果优于单一连作模式,协同作用对改善土壤碳库、优化腐殖质特性、提升土壤肥力及作物生产力具有积极意义。

### 参考文献(References)

- [1] Hu Z B, Liu Y W, Mao X G. Assessment of farmland degradation degree in typical black soil areas of Northeast China at grid scale[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2025, 56(1): 37-46. [胡智博, 刘昱雯, 毛学刚. 栅格尺度中国东北典型黑土区农田退化程度评估[J]. 土壤通报, 2025, 56(1): 37-46.]
- [2] Che Y J, Gu S Y, Wang Z Y, et al. DOC fluorescence spectral structure of black soil in different regions under conservation tillage[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(9): 1544-1555. [车延静, 谷思玉, 王紫颖, 等. 保护性耕作下不同区域农田黑土溶解性有机碳荧光特性分析[J]. 中国生态农业学报, 2024, 32(9): 1544-1555.]
- [3] Sun J Y, Ru J R, Qiu G W, et al. Benefit analysis of different rotation patterns in black soil region of northwest Heilongjiang Province[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2023, 29(18): 5-9. [孙继英, 汝甲荣, 邱广伟, 等. 黑龙江省西北部黑土区不同轮作模式效益分析[J]. 安徽农学通报, 2023, 29(18): 5-9.]
- [4] Liao Y W, Awan M I, Amer M, et al. Evaluating short-term effects of rice straw management on carbon fractions, composition and stability of soil aggregates in an acidic red soil with a vegetable planting history[J]. Heliyon, 2024, 10(1): e23724.
- [5] Li J M, Li S Q, Zhao R, et al. Soil organic carbon dynamics (2008–2020) across different cultivated land use types in a subtropical region[J]. Geoderma Regional, 2025, 40: e00926.

- [6] Zheng H J, Liu D Y, Liao X, et al. Field-aged biochar enhances soil organic carbon by increasing recalcitrant organic carbon fractions and making microbial communities more conducive to carbon sequestration[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 340: 108177.
- [7] Blanco-Canqui H, Laird D A, Heaton E A, et al. Soil carbon increased by twice the amount of biochar carbon applied after 6 years: Field evidence of negative priming[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2020, 12(4): 240-251.
- [8] Yuan J X, Yang B J, Hu Q L, et al. Effects of paddy field cropping patterns on soil organic carbon and carbon pool management index in the middle reaches of the Yangtze River[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(7): 1205-1214. [袁嘉欣, 杨滨娟, 胡启良, 等. 长江中游稻田种植模式对土壤有机碳及碳库管理指数的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2021, 29(7): 1205-1214.]
- [9] Hou L K, Wang Y C, Wang Z P, et al. Effects of biochar on soil quality in a maize soybean rotation on mollisols[J]. *Agronomy*, 2025, 15(5): 1226.
- [10] Bao S D. *Soil and agricultural chemistry analysis*[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [11] Song D L, Xi X Y, Zheng Q, et al. Soil nutrient and microbial activity responses to two years after maize straw biochar application in a calcareous soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 180: 348-356.
- [12] Blair G J, Lefroy R, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [13] Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Determination of humus content in soil: NY/T1867-2010[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2010. [中华人民共和国农业部. 土壤腐殖质组成的测定: NY/T1867—2010 [S]. 北京: 中国农业出版社, 2010.]
- [14] Sun S L, Chen B R, Xue J S. An approach to the methods of calculating yield of corn[J]. *Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University*, 1988(1): 39-44. [孙生林, 陈炳荣, 薛继生. 计算玉米产量方法的探讨[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 1988(1): 39-44.]
- [15] Chang F, Yue S C, Li S, et al. Periodic straw-derived biochar improves crop yield, sequesters carbon, and mitigates emissions[J]. *European Journal of Agronomy*, 2025, 164: 127516.
- [16] Yang W J, Li Y L, Liu W J, et al. Sustainable high yields can be achieved in drylands on the Loess Plateau by changing water use patterns through integrated agronomic management[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 296: 108210.
- [17] Zhang K D, Li Y X, Jiang Z H, et al. Effects of biochar application on growth and yield of fresh waxy maize[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2023, 21(17): 5870-5877. [张凯迪, 李宇欣, 蒋志慧, 等. 生物炭施用量对鲜食糯玉米生长、产量的影响[J]. *分子植物育种*, 2023, 21(17): 5870-5877.]
- [18] Zhang S J, Yang J, Zhao S, et al. The impact of diversified crops and wheat-maize rotations on soil quality in the North China Plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2025, 58(2): 238-251. [张斯佳, 杨杰, 赵帅, 等. 华北平原多样化作物与小麦-玉米轮作对土壤质量的影响[J]. *中国农业科学*, 2025, 58(2): 238-251.]
- [19] Kalu S, Seppänen A, Mganga K Z, et al. Biochar reduced the mineralization of native and added soil organic carbon: Evidence of negative priming and enhanced microbial carbon use efficiency[J]. *Biochar*, 2024, 6(1): 7.
- [20] Zhou D D. Sorption characteristics and mechanisms of bio-chars with organic contaminants in water[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. [周丹丹. 生物炭质对有机污染物的吸附作用及机理调控[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.]
- [21] Islam M U, Jiang F H, Guo Z C, et al. Does biochar application improve soil aggregation? A meta-analysis[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 209: 104926.
- [22] Zhou Z Y, Wang M J, Feng X Q, et al. Effects of crop rotation patterns and nitrogen fertilizer levels on storage and structure of soil organic carbon in paddy fields[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2024, 38(5): 577-590. [周子榆, 王孟佳, 冯向前, 等. 轮作模式和氮肥处理对稻田土壤有机碳储量及其结构的影响[J]. *中国水稻科学*, 2024, 38(5): 577-590.]
- [23] Shi D L, Wang X L, Liu A K, et al. Response of microbial biomass carbon and nitrogen and rice quality in a yellow soil paddy field to biochar combined with nitrogen fertilizer[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(1): 443-449. [史登林, 王小利, 刘安凯, 等. 黄壤稻田土壤微生物量碳氮及水稻品质对生物炭配施氮肥的响应[J]. *环境科学*, 2021, 42(1): 443-449.]
- [24] Guo J L, Jin H, Guo C X, et al. Effects of organic materials on soil organic carbon and fractions of active carbon in soda saline soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2019, 25(8): 1290-1299. [郭军玲, 金辉, 郭彩霞, 等. 不同有机物料对苏打盐化土有机碳和活性碳组分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(8): 1290-1299.]

- [25] Meng F R, Dou S, Yin X B, et al. Effects of maize stalk biochar on humus composition and humic acid structure in black soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(1): 122-128. [孟凡荣, 窦森, 尹显宝, 等. 施用玉米秸秆生物质炭对黑土腐殖质组成和胡敏酸结构特征的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(1): 122-128.]
- [26] Wang Q Y, Cao D Y, Wang D, et al. Effects of long-term application of biochar on nutrients, fractions of humic in brown soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(13): 2612-2622. [王庆阳, 曹殿云, 王迪, 等. 长期施用生物炭对棕壤养分及腐殖质组分的影响[J]. *中国农业科学*, 2024, 57(13): 2612-2622.]
- [27] Liu Q M, He X Y, Wang K L, et al. Biochar drives humus formation during composting by regulating the specialized metabolic features of microbiome[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 458: 141380.
- [28] Jin Y X, Yuan Y, Liu Z Q, et al. Effect of humic substances on nitrogen cycling in soil-plant ecosystems: Advances, issues, and future perspectives[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 351: 119738.
- [29] Zhao S X, Yu X L, Li Z H, et al. Effects of biochar pyrolyzed at varying temperatures on soil organic carbon and its components: Influence on the composition and properties of humic substances[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(2): 769-782. [赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 等. 不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响[J]. *环境科学*, 2017, 38(2): 769-782.]
- [30] Zhang G, Dou S, Xie Z B, et al. Effect of biochar application on composition of soil humus and structural characteristics of humic acid[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(2): 614-620. [张葛, 窦森, 谢祖彬, 等. 施用生物质炭对土壤腐殖质组成和胡敏酸结构特征影响[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(2): 614-620.]

(责任编辑: 陈荣府)