

杨爱峥, 苗思雨, 王秋菊, 李茉, 王丽红, 王小芳. 生物质炭、秸秆颗粒和沼液不同配施策略对黑土肥力和玉米产量的调控效应[J]. 土壤学报, 2027,

YANG Aizheng, MIAO Siyu, WANG Qiuju, LI Mo, WANG Lihong, WANG Xiaofang. Effects of Combined Application of Biochar, Straw Pellets and Biogas Slurry on Black Soil Fertility and Maize Yield[J]. Acta Pedologica Sinica, 2027,

生物质炭、秸秆颗粒和沼液不同配施策略对黑土肥力和玉米产量的调控效应*

杨爱峥¹, 苗思雨¹, 王秋菊², 李 茉¹, 王丽红¹, 王小芳^{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: 针对东北黑土区土壤退化、秸秆资源利用不足以及化肥过量施用等问题, 亟需探索兼顾资源循环利用、土壤改良与作物增产的农田管理模式。通过在东北黑土区开展连续两年田间试验, 探究秸秆不同利用方式包括秸秆颗粒单施 (FS)、生物质炭和秸秆颗粒质量比 1:2 混施 (MS)、生物质炭和秸秆颗粒质量比 2:1 混施 (MB) 以及施肥方式包括沼液替代化肥 (N1) 和常规化肥 (N2), 系统评估不同处理对土壤理化性质和玉米产量的影响, 通过熵权—逼近理想解排序法 (EW—TOPSIS) 评价方法对各处理的指标进行综合评分和排序。研究表明: (1) 生物质炭和秸秆颗粒混施耦合沼液替代化肥显著降低了土壤容重并提高了土壤孔隙度 ($P < 0.05$), 同时促进大团聚体的形成, 提高了土壤结构稳定性。其中, 生物质炭和秸秆颗粒质量比 2:1 混施并配施沼液 (MBN1) 处理改善效果最为显著, 较秸秆颗粒单施并配施沼液 (FSN1) 处理两年平均土壤容重显著降低 11.40%, 土壤孔隙度提高 9.59%, 土壤大团聚体占比增加 19.99% ($P < 0.05$)。N1 处理较 N2 处理进一步增强了土壤结构稳定性。(2) 生物质炭和秸秆颗粒混施对土壤养分和作物产量具有明显提升效果, N1 施肥方式较 N2 提升效果进一步增强。与全量秸秆还田 (CK) 处理相比, 生物质炭和秸秆颗粒质量比 1:2 混施并配施沼液 (MSN1) 处理的土壤全氮和全钾含量两年平均分别显著提高 23.60% 和 23.65% ($P < 0.05$); MSN1 处理较 CK 处理的产量两年平均显著提高 22.51% ($P < 0.05$)。(3) 基于 TOPSIS 模型与熵权法, 综合土壤物理指标、养分指标和产量指标, MSN1 处理得分 0.805, 排序第一, 为供试最优配施模式。综上, 生物质炭和秸秆颗粒质量比 1:2 混施并配施沼液处理可改善土壤结构, 提升土壤肥力并增加玉米产量, 是适宜黑土区玉米种植的农田管理模式。

关键词: 生物质炭; 秸秆颗粒; 沼液; 土壤结构; 土壤养分; 玉米产量

中图分类号: S158 文献标志码: A

Effects of Combined Application of Biochar, Straw Pellets, and Biogas Slurry on Black Soil Fertility and Maize Yield

YANG Aizheng¹, MIAO Siyu¹, WANG Qiuju², LI Mo¹, WANG Lihong¹, WANG Xiaofang^{1†}

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Heilongjiang

*国家重点研发计划课题 (2024YFD1500201)、国家自然科学基金项目 (52379036)、黑龙江省自然科学基金优秀青年项目 (YQ2024E002) 共同资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (2024YFD1500201), National Natural Science Foundation of China (No. 52379036) and the Excellent Youth Project of Natural Science Foundation of Heilongjiang Province, China (No. YQ2024E002)

†通讯作者 Corresponding author, E-mail: xiaofangwang@neau.edu.cn

作者简介: 杨爱峥 (1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事农业水土工程资源高效利用和盐碱土改良研究。E-mail: aizheng.yang@neau.edu.cn

收稿日期: 2026-03-30; 收到修改稿日期: 2026-08-03; 网络首发日期 (www.cnki.net): 202 - -

Abstract: 【Objective】 Soil degradation, insufficient utilization of straw resources, and excessive application of chemical fertilizers are major constraints to sustainable agricultural production in the black soil region of Northeast China. This necessitates the development of an effective field management practice that simultaneously promotes the recycling of straw resources, improves soil quality, and increases crop yield. Thus, this study aimed to determine a suitable combination of straw utilization practice and fertilization regime for maize production in this region.

【Method】 A two-year field experiment was conducted in the black soil region of Northeast China to investigate the effects of different straw utilization practices and fertilization regimes on soil physicochemical properties and maize yield. The straw utilization practices included the sole application of pelletized straw (FS), the combined application of biochar and pelletized straw at a mass ratio of 1:2 (MS), and the combined application of biochar and pelletized straw at a mass ratio of 2:1 (MB). Full-rate straw incorporation was used as the control treatment (CK). The fertilization regimes included complete substitution of chemical fertilizer with biogas slurry (N1) and conventional chemical fertilization (N2). The entropy weight–technique for order preference by similarity to an ideal solution (EW-TOPSIS) method was used to comprehensively evaluate and rank the treatments by integrating soil physical properties, soil nutrient contents, and maize yield. 【Result】 The results showed that: (1) The combined application of biochar and pelletized straw coupled with complete substitution of chemical fertilizer with biogas slurry significantly decreased soil bulk density and increased total soil porosity ($P<0.05$). This combination also promoted the formation of water-stable macroaggregates (>0.25 mm) and improved soil structural stability. Among the treatments, the co-application of biochar and pelletized straw at a mass ratio of 2:1 combined with biogas slurry treatment (MBN1) produced the greatest improvement in soil physical properties. Compared with the sole pelletized straw application combined with biogas slurry treatment (FSN1), the MBN1 treatment significantly decreased the two-year mean soil bulk density by 11.40%, increased total soil porosity and the proportion of water-stable macroaggregates (>0.25 mm) by 9.59% and 19.99% ($P<0.05$), respectively. In addition, N1 further improved soil structural stability compared with N2. (2) The combined application of biochar and pelletized straw increased soil nutrient contents and maize yield, and the improvements under N1 were greater than those under N2. Relative to the full-rate straw incorporation treatment (CK), the co-application of biochar and pelletized straw at a mass ratio of 1:2 combined with biogas slurry MSN1 treatment significantly increased the two-year mean soil total nitrogen and total potassium contents by 23.60% and 23.65%, respectively ($P<0.05$), and significantly increased the two-year mean maize yield by 22.51% ($P<0.05$). (3) According to the EW-TOPSIS evaluation integrating soil physical properties, soil nutrient contents, and maize yield, the MSN1 treatment obtained the highest comprehensive score of 0.805 and ranked first among all treatments. 【Conclusion】 The combined application of biochar and pelletized straw at a mass ratio of 1:2, together with complete substitution of chemical fertilizer with biogas slurry, improved soil structure, enhanced soil fertility, and increased maize yield. Therefore, the MSN1 treatment is a suitable field management practice for maize production in the black soil region of Northeast China.

Key words: Biochar; Straw pellets; Biogas slurry; Soil structure; Soil nutrients; Maize yield

东北黑土区是我国重要的粮食生产基地，区域内黑土有机质含量高、结构优良、基础肥力高，是国家粮食安全的重要保障^[1]。然而，在农业生产过程中每年产生大量农作物秸秆，但其高效还田与资源化利用不足，长期高强度耕作和不合理农业管理导致黑土退化问题日益突出，严重制约区域农业可持续发展^[2]。研究表明，长期不合理耕作造成黑土耕层团粒结构破坏，土壤板结硬化加剧，结构稳定性持续衰减^[3]。与此同时，农业生产化肥投入持续增加，长期过量施用易引发土壤酸化、养分失衡、结构退化等问题^[4]。因此，在保障粮食稳定增产的前提下，探寻合理的有机物料施用方式以改善黑土土壤结构、提升土壤肥力，已成为农业

绿色发展和耕地质量提升的关键科学问题。

秸秆还田被认为是农业废弃物资源化利用以及改善土壤理化性质、提升土壤质量的重要途径,但是效果因还田方式而异^[5]。秸秆还田能够为土壤持续补充有机质,并在分解过程中逐步释放氮、磷、钾等养分,提高土壤微生物活性和土壤肥力^[6]。然而,大量秸秆直接还田后,常存在秸秆块体较大、分布不均、腐解慢的问题,易造成土壤跑墒,并增加病虫害滋生与传播风险,进而影响秸秆资源化利用效果^[7]。相较而言,秸秆压缩颗粒通过颗粒化处理后,粒径减小、比表面积增大,与土壤接触更加充分,可为微生物参与腐解过程提供更有利的条件,促进秸秆腐解及养分释放^[8]。同时,秸秆压缩颗粒具有较强的吸水膨胀特性,施入土壤后可在一定程度上疏松土体、改善孔隙结构、增强土壤透气性,从而为作物根系生长和土壤生态功能提升提供良好条件^[9]。此外,由秸秆制备成的生物质炭具有较大的比表面积和发达的孔隙结构,能够有效改善土壤结构,增强土壤的持水、保肥能力,并促进土壤团聚体的形成^[10]。研究表明,施用生物质炭可显著降低土壤容重、提高土壤孔隙度,增强团聚体稳定性,改善土壤理化性质并提高土壤养分有效性^[11]。然而,过量施用生物质炭可能导致土壤结构过于疏松,削弱其持水能力,进而降低作物产量,增加农业生产成本^[12]。

随着我国畜禽养殖业规模化、集约化发展,粪污不合理处置易引发土壤生态破坏等环境问题。厌氧发酵是畜禽粪污资源化利用的重要途径,其产生的沼液富含氮、磷、钾及可溶性有机物,具有较高的养分利用潜力^[13],在化肥减量增效背景下,沼液替代化肥成为农田养分管理的重要方向,可缓解土壤酸化、板结与养分失衡问题,提升肥料利用效率^[14]。但沼液单独施用存在速效养分释放快、易淋溶渗漏以及长期结构改良作用有限等问题,难以持续支撑黑土有机质积累和团聚体稳定性提升。将沼液与秸秆颗粒、生物质炭协同配施,有望实现养分供给、碳源补充和结构改良的优势互补。其中,沼液可调节秸秆碳氮比,促进秸秆颗粒腐解与养分矿化^[15-16],生物质炭可吸附并缓释沼液中的氮、磷养分,减少淋溶损失,提升土壤持水保肥能力与团聚体稳定性^[17]。侯建勋等^[18]在黑土区研究表明,秸秆源有机物料配施可提升土壤养分有效性与酶活性;刘慧屿等^[19]发现生物质炭配施减量氮肥可改善土壤结构、提高氮素利用率;胡诚等^[15]指出外源氮输入可调节碳氮比、促进秸秆腐解。秸秆与生物质炭配施可提升团聚体稳定性与有机碳积累,且配施比例显著影响改良效果^[20-21]。尽管现有研究证实秸秆、生物质炭与沼液配施可改善土壤质量并提高作物产量,但现有研究多集中于单一物料施用或常规混合配施。目前,在东北黑土区关于生物质炭梯度配比、秸秆颗粒化处理与沼液替代化肥三者耦合还田的研究仍较不足,其对土壤结构、肥力及作物产量的综合影响有待进一步明确。

本研究以东北黑土区玉米农田为研究对象,通过设置不同生物质炭与秸秆颗粒混施比例并结合沼液替代化肥施用方式,系统研究其对土壤结构、养分及玉米产量的影响,通过逼近理想解排序法(TOPSIS)模型与熵权法相结合筛选适宜的组合模式,以期对东北黑土区秸秆资源高效利用和农业绿色可持续发展提供理论依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

试验于2023—2024年在黑龙江省哈尔滨市现代农业高新技术示范园(46°03'N, 125°44'E, 平均海拔162 m)进行。试验区属冷温带大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季温暖多雨,降水量相对较高,年平均降水量572.4 mm,降水主要集中在6—8月份,年最低气温为-30.3℃±0.5℃,年最高气温为32.9℃±0.6℃。试验区位于东北典型黑土区,属一年一熟雨养种植制度,种植作物为春玉米,长期实行旋耕整地和常规秸秆还田管理,无补充灌溉。试验

土壤类型为黑土，0~20 cm 土层的基本理化性质如下：土壤容重 $1.49 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，pH6.14，有机质 $42.87 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，碱解氮 $68.34 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，有效磷 $27.11 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，速效钾 $97.45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。两年玉米生育期内日气温与降水量变化如图 1 所示。

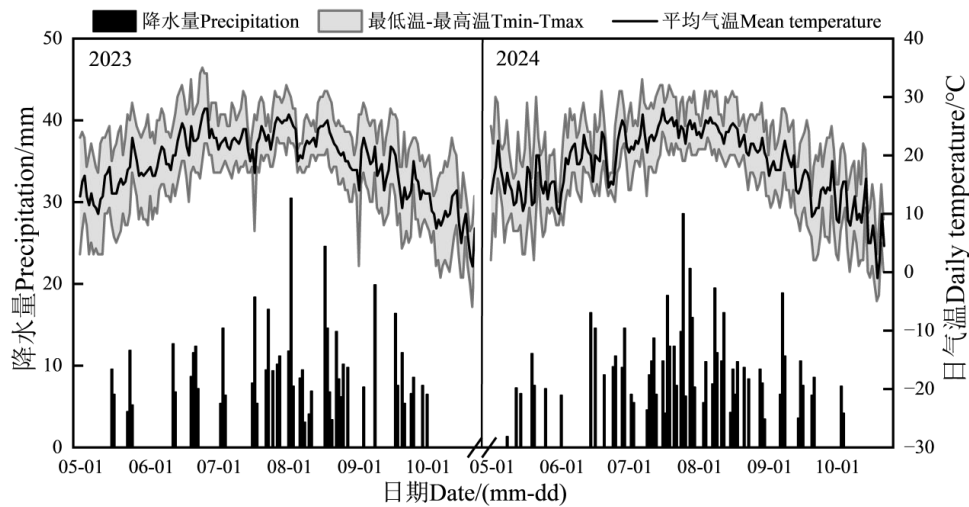


图 1 玉米生育期内日气温与降水量变化

Fig. 1 Changes of daily temperature and precipitation during maize growth period

1.2 田间试验设计

试验设置两种施肥方式：沼液替代化肥（N1）和常规化肥（N2）。依据东北黑土区玉米高产条件下秸秆资源量进行折算，以 $22 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 秸秆原料当量（干物质质量）为统一投入基准，按生物质炭产率 33.3%折算，设置三种不同的秸秆颗粒和生物质炭配施模式，其秸秆原料当量比为 3:0、2:1 和 1:2，分别为 $22 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 秸秆颗粒+ $0 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物质炭（FS）、 $14.6 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 秸秆颗粒+ $2.43 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物质炭（MS）和 $7.3 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 秸秆颗粒+ $4.86 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物质炭（MB），另外设置全量秸秆还田处理为对照组（CK）。试验共 7 个处理，每个处理重复 3 次，共 21 个小区，每个小区面积为 $5 \text{ m}\times 5 \text{ m}$ ，小区间设置 0.5 m 宽作为保护行，具体试验处理设置见表 1。本试验中所使用的生物质炭来自辽宁锦州的生物质炭制备厂，由玉米秸秆在 500°C 无氧条件下烧制而成，基本理化性质如下：pH 为 8.10，有机碳 $252.48 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，全氮 $8.14 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，全磷 $8.50 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，全钾 $13.53 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。秸秆颗粒为玉米秸秆经粉碎、干燥后，在机械加压条件下压缩成型的颗粒状物料，基本理化性质如下：pH 为 6.28，有机碳 $222.31 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，全氮 $7.88 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，全磷 $7.64 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，全钾 $11.25 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。沼液取自黑龙江省巴彦县某养猪场，属于养猪场所产粪污水经厌氧发酵后所产生的黑褐色、含有少量悬浮物以及不溶物的液体，基本理化性质如下：pH 为 7.34，有机碳 $5.70 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，全氮 $1.09 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，全磷 $0.67 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，全钾 $1.16 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。播种前将生物质炭和秸秆颗粒均匀地施用在土壤表面，通过旋耕机进行深耕处理，使生物质炭和秸秆颗粒与土壤充分混合。种植玉米品种为先玉 355，结合当地栽培规范设定行距 65 cm、株距 28 cm，种植密度为 $55\,000 \text{ plant}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，施肥水平、田间管理与当地一致。

表 1 试验处理设置

Table 1 Experimental treatments

处理编号	有机物料添加量	秸秆原料当量折算比	施肥方式
Treatment	Application rate of organic materials	Straw equivalent conversion ratio	Fertilization method
CK	全量秸秆还田	3:0	NPK 化肥
FSN1	$22 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 秸秆颗粒	3:0	沼液
FSN2	$22 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 秸秆颗粒	3:0	NPK 化肥
MSN1	$14.6 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 秸秆颗粒+ $2.43 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 生物质炭	2:1	沼液

MSN2	14.6 t·hm ⁻² 秸秆颗粒+2.43 t·hm ⁻² 生物质炭	2:1	NPK 化肥
MBN1	7.3 t·hm ⁻² 秸秆颗粒+4.86 t·hm ⁻² 生物质炭	1:2	沼液
MBN2	7.3 t·hm ⁻² 秸秆颗粒+4.86 t·hm ⁻² 生物质炭	1:2	NPK 化肥

注: CK: 全量秸秆还田+NPK 化肥; FSN1: 22 t·hm⁻² 秸秆颗粒+沼液; FSN2: 22 t·hm⁻² 秸秆颗粒+NPK 化肥; MSN1: 14.6 t·hm⁻² 秸秆颗粒+2.43 t·hm⁻² 生物质炭+沼液; MSN2: 14.6 t·hm⁻² 秸秆颗粒+2.43 t·hm⁻² 生物质炭+NPK 化肥; MBN1: 7.3 t·hm⁻² 秸秆颗粒+4.86 t·hm⁻² 生物质炭+沼液; MBN2: 7.3 t·hm⁻² 秸秆颗粒+4.86 t·hm⁻² 生物质炭+NPK 化肥。下同。Note: CK: Conventional straw return combined with NPK chemical fertilizer; FSN1: 22 t·hm⁻² straw pellets combined with biogas slurry; FSN2: 22 t·hm⁻² straw pellets combined with NPK chemical fertilizer; MSN1: 14.6 t·hm⁻² straw pellets + 2.43 t·hm⁻² biochar combined with biogas slurry; MSN2: 14.6 t·hm⁻² straw pellets + 2.43 t·hm⁻² biochar combined with NPK chemical fertilizer; MBN1: 7.3 t·hm⁻² straw pellets + 4.86 t·hm⁻² biochar combined with biogas slurry; MBN2: 7.3 t·hm⁻² straw pellets + 4.86 t·hm⁻² biochar combined with NPK chemical fertilizer. The same below.

1.3 试验测定与计算方法

1.3.1 土壤取样 2023 年至 2024 年在玉米生育期四个生长阶段(苗期、拔节期、灌浆期和成熟期)采集土壤样本。各处理小区在 0~20 cm 土层采用直径 40 mm 土钻按五点法取样,在同一小区内 5 个点位土样混合均匀后作为一个混合样,即每个处理在 3 个重复小区获得 3 份独立混合样,研究土壤理化性质的变化规律。

1.3.2 土壤容重、孔隙度、土壤含水率和土壤温度测定 采用环刀法测定土壤容重(BD),将原状土装入铝盒密封置于 105 °C 烘箱中烘至恒重后进行称量,再计算土壤总孔隙度(TP)。采用土壤水分廓线仪(Diviner2000 型,北京)测定土壤水分,QY-800s 型土壤水分温度监测系统连续监测 0~20 cm 土层土壤温度,并按设定时间间隔自动记录数据。

土壤容重 BD (soil bulk density, g·cm⁻³) 的测定采用环刀法:

$$BD = \frac{g_2 - g_1}{V_1} \quad (1)$$

式中, g_1 为环刀质量, g; g_2 为环刀和烘干后土壤样品的总质量, g; V_1 为环刀容积, cm³。

土壤总孔隙度 TP (soil total porosity, %) 通过环刀法测得土壤容重 BD 后计算得到, 公式如下:

$$TP = \left(1 - \frac{BD}{SD}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中, SD 为土壤颗粒密度, 取 2.65 g·cm⁻³。

1.3.3 土壤团聚体测定 土壤水稳性团聚体采用湿筛法进行测定, 分成五个粒级, 即大于 2 mm、2~0.5 mm、0.5~0.25 mm、0.25~0.106 mm 和小于 0.106 mm。具体操作为: 将 50 g 风干土样置于团聚体分离装置中(装置筛层孔径梯度依次为 2 mm、0.5 mm、0.25 mm 和 0.106 mm), 将试样转移至土壤团粒结构分析仪(DIK-2012, Daiki 公司, 日本)。用去离子水将土壤样品浸泡 10 min, 浸泡完成后, 启动振荡 30 min。分离完成后取出筛组沥干, 将各筛层团聚体定量转移至铝盒, 60 °C 恒温烘干至恒重后称量, 计算各级团聚体百分含量并选取平均重量直径(MWD, mm)、几何平均直径(GMD, mm)、大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量 WR_{0.25} (%) 来表征土壤团聚体稳定性。各指标计算公式如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i W_i \quad (3)$$

$$GMD = \exp\left(\sum_{i=1}^n W_i \ln \bar{x}_i\right) \quad (4)$$

$$WR_{0.25} = \left[1 - \frac{M_{X<0.25}}{M_T}\right] \quad (5)$$

式中, $\bar{x}_i$ 为第 i 粒级的平均直径, mm; W_i 为 $\bar{x}_i$ 相对应的粒级团聚体占总体积的百分比, %; $M_{X<0.25}$ 为小于 0.25 mm 团聚体的质量, g; M_T 为团聚体总质量, g。

1.3.4 土壤养分测定 土壤全氮测定先进行土壤样品消解, 称取风干土样 0.4 g, 置于消解管

中，加入 5 mL 浓硫酸和 1.85 g 混合催化剂，在 370 °C 下消解 4 h，定容后混合均匀，过滤，之后使用全自动间断化学分析仪（SmartChem 200，AMS Alliance 公司，法国）进行测定。全磷测定先进行土壤样品消解，再加入 5 mL 浓硫酸和 10 滴高氯酸，摇匀，先在 280 °C 下进行消煮，再将温度升高至 370 °C 消煮 1 h，冷却后定容，过滤，再使用全自动间断化学分析仪进行测定。全钾使用原子吸收光谱仪（iCE 3500，英国）进行样品分析。

1.3.5 产量测定 成熟期收获玉米植株时，在各处理小区中间选取具有代表性的样行进行收获。收获后将果穗分离，置于 105 °C 烘箱中杀青 30 min，随后在 80 °C 下烘干至恒重，测定地上部干物质量。同时，随机选取一定数量籽粒测定百粒重，并根据收获面积换算单位面积产量（t·hm⁻²）。

1.4 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结构、土壤养分及作物产量的影响。不同处理综合评价指标类型见表 2，效应评价等级见表 3。

表 2 不同处理综合评价指标类型

Table 2 Types of indicators for comprehensive evaluation of different treatments		
指标类别	评价指标	指标类型
Indicator category	Evaluation indexes	Indicator type
物理指标 Physical indicators	容重	极小型
	总孔隙度	极大型
	MWD	极大型
	GMD	极大型
	WR _{0.25}	极大型
养分指标 Nutrient indicators	土壤水分	极大型
	土壤温度	极大型
	全氮	极大型
	全磷	极大型
	全钾	极大型
产量指标 Yield indicators	百粒重	极大型
	穗行数	极大型
	行粒数	极大型
	产量	极大型

注：MWD，平均重量直径；GMD，几何平均直径；WR_{0.25}，>0.25 mm 水稳性团聚体含量。极小型指标代表指标数值越低综合评价效果越好，极大型指标代表指标数值越高综合评价效果越好。Note: MWD, Mean weight diameter; GMD, Geometric mean diameter; WR_{0.25}, Water-stable aggregate proportion of particle size > 0.25 mm. Smaller-the-better indicators denote that lower values represent better comprehensive performance; larger-the-better indicators denote that higher values represent better comprehensive performance.

表 3 效应评价标准

Table 3 Effectiveness evaluation criteria	
贴进度	评价效应等级
Closeness degree	Evaluation effect grade
0.8~1.0	优
0.6~0.8	良
0.3~0.6	中
0~0.3	差

1.5 数据处理与分析

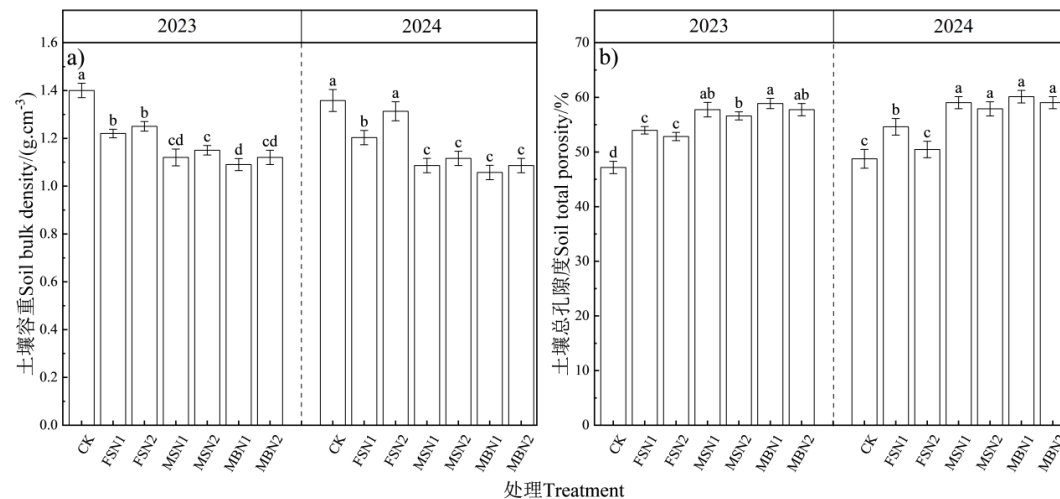
所有指标均采用平均值。采用 SPSS 26.0 软件对土壤理化性质进行单因素方差分析 (ANOVA) 和最小显著差异法 (LSD) 检验, 并使用 Excel 2019 进行数据处理。处理间差异在 ($P < 0.05$) 时被认为具有统计学意义。皮尔逊 (Pearson) 相关分析及图形绘制使用 Origin 2024 进行。

2 结果

2.1 生物质炭与秸秆颗粒混施联合沼液对土壤物理性质的影响

2.1.1 土壤容重和孔隙度 2023—2024 年不同处理对土壤容重的改良效果逐年增强 (图 2a)。混施处理的土壤容重显著低于 CK 和 FS 处理 5.74%~22.16% ($P < 0.05$)。随生物质炭混施比例增加, 对土壤容重改善效果增强, 但两个混施处理间无显著差异。此外, 沼液替代化肥施用后进一步降低了土壤容重, 2024 年 FSN1 较 FSN2 处理土壤容重显著降低了 8.38% ($P < 0.05$)。

两年不同处理对土壤孔隙度改善效果见图 2b。与 CK 相比, 不同还田方式对土壤孔隙度提升逐年增加, 表明不同有机物料添加对土壤孔隙度提升具有累积效应。生物质炭和秸秆颗粒混施处理的土壤孔隙度显著高于 FS 和 CK 处理 4.90%~24.80% ($P < 0.05$)。沼液替代化肥后进一步提高了土壤孔隙度, 在 2024 年 FS 处理中表现出显著差异, FSN1 较 FSN2 处理显著提升了 8.23% ($P < 0.05$)。相同施肥方式下, 随生物质炭混施比例增加, 对土壤孔隙度提升效果增强, 但两个不同比例混施处理间无显著差异。



注: 图中不同小写字母表示相同年份处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments in the same year ($P < 0.05$). The same below.

图 2 2023—2024 年不同处理的土壤容重 (BD, a) 和土壤总孔隙度 (TP, b)

Fig. 2 Soil bulk density (BD, a) and soil total porosity (TP, b) for different treatments during 2023-2024

2.1.2 土壤含水率和土壤温度 受降雨影响, 整体上 2023—2024 年各处理土壤含水率在整个生育期呈现出“先下降后升高再下降”的趋势 (图 3a)。生物质炭和秸秆颗粒混施处理的土壤含水率高于 FS 处理和 CK 处理。与 FS 处理相比, 混施处理的土壤含水率平均提高了 3.22%~26.95%。但随生物质炭施加比例增加对土壤含水率提升效果有所减弱。此外, 相同有机物料添加比例下, N1 处理的土壤含水率高于 N2 处理, MSN1 较 MSN2 处理平均提高了 2.15%。因此, MSN1 处理对土壤含水率提升效果表现最优。

受气温影响, 各处理中土壤温度随生育期推进呈现先升高后降低的趋势, 在灌浆期土壤温度达到峰值, 之后逐渐下降 (图 3b)。生物质炭和秸秆颗粒混施处理在整个生育期的土壤

温度均高于 FS 处理和 CK 处理。与 FS 处理相比,混施处理的土壤温度平均增加了 4.83%~22.84%,且随生物质炭混施比例增大,土壤温度提升效果增强,MBN2 较 MSN2 处理土壤温度平均提高了 7.33%。此外,在相同有机物料添加比例下,N1 处理土壤温度均高于 N2 处理,MSN1 较 MSN2 处理的土壤温度平均提高了 8.43%。

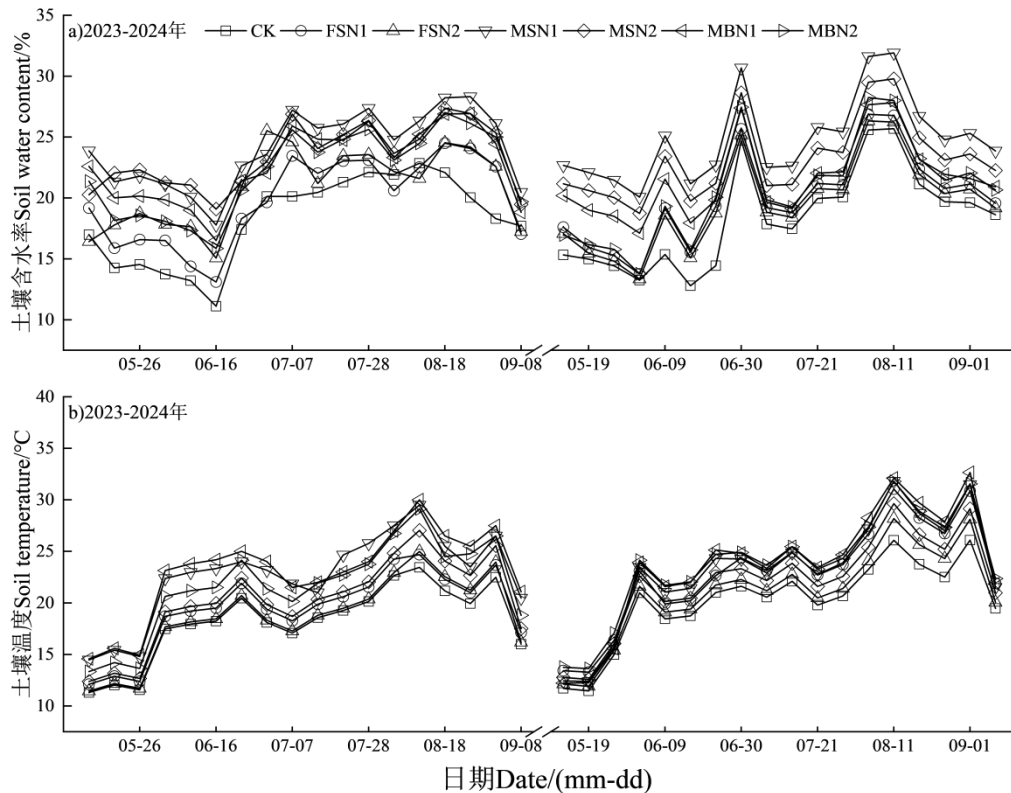
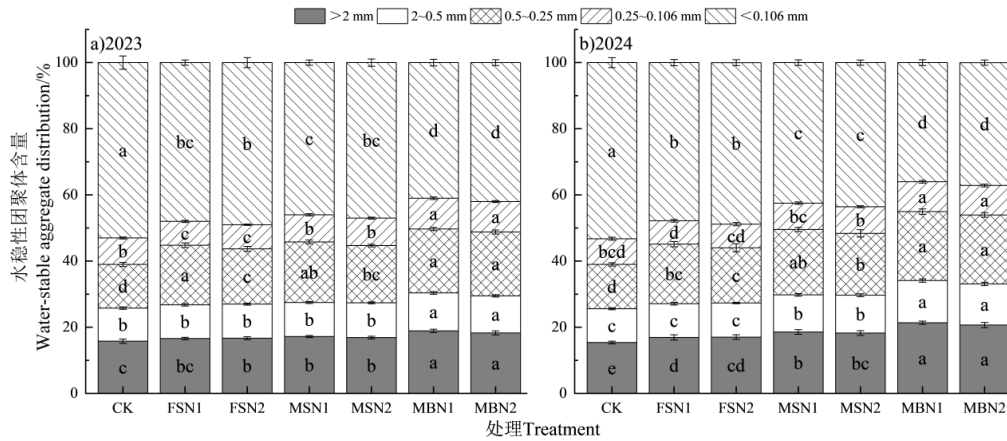


图3 2023—2024年不同处理的土壤含水率(a)和土壤温度(b)

Fig. 3 Soil water content (a) and soil temperature (b) for different treatments during 2023-2024

2.1.3 土壤水稳性团聚体分布 两年不同处理对土壤水稳性团聚体分布的影响见图4。与 FS 处理相比,生物质炭和秸秆颗粒混施处理对土壤大团聚体($>2\text{ mm}$)和中团聚体($2\sim0.5\text{ mm}$)具有显著提升效果($P<0.05$)。与 FSN2 处理相比,MBN2 处理对大团聚体和中团聚体占比两年平均显著提高了 15.49%和 14.72%。相同有机物料添加下,N1 方式进一步促进土壤大团聚体形成,但与 N2 处理间无显著差异。相同施肥方式下,随生物质炭混施比例增大,对土壤大团聚体和中团聚体的提升效果显著增强,MBN1 较 MSN1 处理土壤大团聚体和中团聚体占比显著提高了 12.43%和 12.67%($P<0.05$)。此外,与 CK 处理相比,混施处理的粉黏颗粒占比显著降低了 11.32%~32.36%($P<0.05$),且随生物质炭混施比例增大,进一步显著降低了粉黏颗粒占比($P<0.05$)。在相同有机物料施加比例下,两种施肥方式下的处理对粉黏颗粒占比降低效果无显著差异。



注：土壤水稳性团聚体采用湿筛法测定；同一处理不同粒径组分上方标注的不同小写字母代表该处理内各粒径团聚体含量差异显著 ($P < 0.05$)。Note: Soil water-stable aggregates were measured using the wet sieving method. Different lowercase letters above distinct aggregate fractions within the same treatment indicate significant differences in aggregate proportion among particle size classes for that treatment ($P < 0.05$).

图 4 2023—2024 年不同处理下土壤水稳性团聚体分布特征

Fig. 4 Distribution of soil water-stable aggregates for different treatments during 2023-2024

2.1.4 土壤团聚体稳定性 与 CK 处理相比, 生物质炭和秸秆颗粒混施处理对土壤团聚体的 MWD、GMD 及 $WR_{0.25}$ 具有显著促进作用 ($P < 0.05$), 提高了土壤团聚体稳定性 (表 4)。与 CK 处理相比, 生物质炭和秸秆颗粒混施处理显著提升了土壤团聚体稳定性, 使 MWD、GMD 和 $WR_{0.25}$ 分别显著提高了 7.57%~34.17%、15.49%~62.00%和 14.62%~40.94% ($P < 0.05$)。生物质炭和秸秆颗粒混施处理中, 随生物质炭施用比例增加, 土壤团聚体稳定性的提升效果显著增强 ($P < 0.05$)。在相同有机物料施加比例下, 与 N2 处理相比, N1 处理对土壤团聚体稳定性提升效果无显著差异。其中, MBN1 处理对土壤团聚体稳定性提升效果表现最佳, MBN1 较 FSN1 处理的 MWD、GMD 和 $WR_{0.25}$ 两年平均显著提高 17.80%、30.33% 和 16.36% ($P < 0.05$)。

表 4 2023—2024 年不同处理下土壤团聚体稳定性

Table 4 Soil aggregate stability for different treatments during 2023-2024

年份 Year	处理 Treatment	MWD/mm	GMD/mm	$WR_{0.25}/\%$
2023	CK	$0.678 \pm 0.019c$	$0.196 \pm 0.012c$	$39.00 \pm 0.81e$
	FSN1	$0.719 \pm 0.007b$	$0.222 \pm 0.004b$	$44.80 \pm 0.57bc$
	FSN2	$0.718 \pm 0.009b$	$0.218 \pm 0.012bc$	$43.70 \pm 0.49d$
	MSN1	$0.739 \pm 0.005b$	$0.232 \pm 0.007b$	$45.80 \pm 0.31b$
	MSN2	$0.730 \pm 0.010b$	$0.227 \pm 0.007b$	$44.70 \pm 0.10cd$
	MBN1	$0.807 \pm 0.012a$	$0.267 \pm 0.010a$	$49.70 \pm 0.36a$
	MBN2	$0.786 \pm 0.014a$	$0.258 \pm 0.009a$	$48.80 \pm 0.61a$
2024	CK	$0.669 \pm 0.014d$	$0.194 \pm 0.010d$	$39.00 \pm 0.73d$
	FSN1	$0.728 \pm 0.029c$	$0.224 \pm 0.004c$	$45.13 \pm 1.72c$
	FSN2	$0.728 \pm 0.022c$	$0.221 \pm 0.005c$	$44.03 \pm 1.25c$
	MSN1	$0.794 \pm 0.014b$	$0.259 \pm 0.009b$	$49.57 \pm 0.63b$
	MSN2	$0.784 \pm 0.027b$	$0.253 \pm 0.005b$	$48.38 \pm 2.02b$
	MBN1	$0.898 \pm 0.011a$	$0.315 \pm 0.010a$	$54.97 \pm 0.98a$
	MBN2	$0.874 \pm 0.019a$	$0.303 \pm 0.012a$	$53.96 \pm 1.11a$

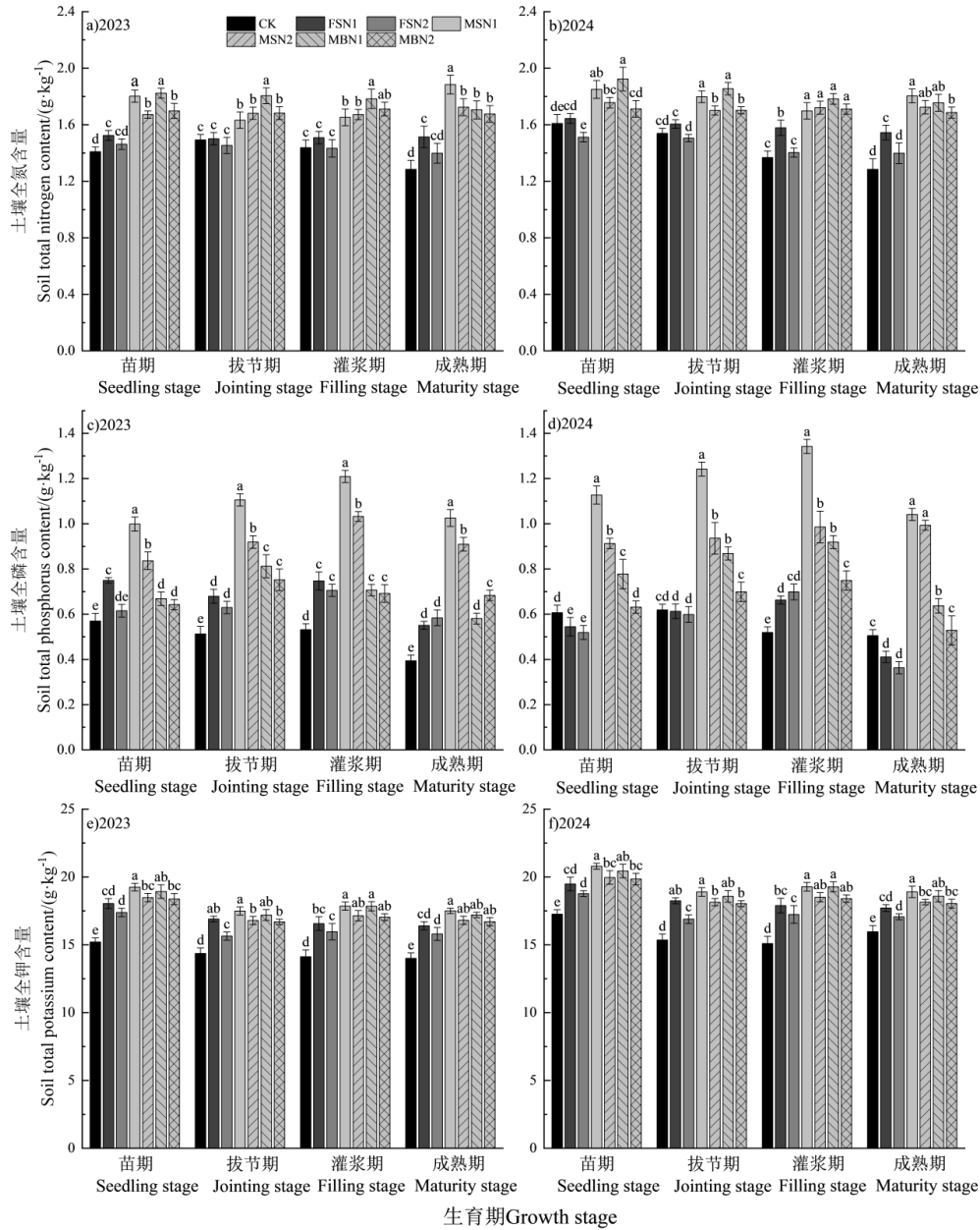
注：同列不同小写字母表示同一年份处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments in the same year ($P < 0.05$). The same below.

2.2 生物质炭与秸秆颗粒混施联合沼液对土壤全量养分的影响

2.2.1 土壤全氮 两年各处理土壤全氮含量随生育期推进均呈现苗期至灌浆期逐渐下降，成熟期有所回升的趋势（图 5a，图 5b）。与 CK 和 FS 处理相比，生物质炭和秸秆颗粒混施处理显著提高了土壤全氮含量 ($P < 0.05$)，但在 2024 年苗期，MBN2 处理与 CK 和 FSN1 处理间无显著差异。在混施处理中，沼液替代化肥后，生物质炭和秸秆颗粒混施配施沼液处理较 CK 和 FS 处理的土壤全氮含量具有显著提升效果 ($P < 0.05$)，与 FS 处理相比，MSN1 和 MBN1 处理土壤全氮两年分别显著提升了 12.23%~22.89% 和 14.81%~25.71% ($P < 0.05$)。

2.2.2 土壤全磷 2023—2024 年各处理的土壤全磷含量随生育期推进整体呈现先升高后下降的趋势，且 2024 年土壤全磷含量较 2023 年整体有所提高（图 5c，图 5d）。其中，在 N2 施肥方式下，与 FS 处理相比，MS 处理的土壤全磷含量两年平均显著提高了 60.78% ($P < 0.05$)。在 MS 处理中，N1 施肥模式显著提高了土壤全磷含量，平均增幅为 17.36%~24.13% ($P < 0.05$)，但在 2024 年成熟期 MSN1 和 MSN2 处理间无显著差异。相同施肥方式下，随生物质炭混施比例增加，对土壤全磷含量提升效果减弱。

2.2.3 土壤全钾 随生育期推进，两年内各处理的土壤全钾含量整体呈现逐渐下降的趋势，且随年际变化表现出累积效应，见图 5e、图 5f。与 CK 相比，FS 处理和混施处理显著提升了土壤全钾含量 ($P < 0.05$)。生物质炭与秸秆颗粒混施处理较 CK 处理的土壤全钾含量显著提高，平均增幅为 16.72%~24.98% ($P < 0.05$)。同时，在相同施肥方式下，随生物质炭混施比例增大，对土壤全钾含量提升效果有所减弱，但不同比例生物质炭和秸秆颗粒混施处理间无显著差异。在混施处理中，与 N2 施肥处理相比，N1 施肥处理土壤全钾含量进一步提升了 3.43%~4.17%，但两个相同混施比例的处理间无显著差异。



注：图中不同小写字母表示同一年份、同一生育期内各处理间土壤养分含量差异显著 ($P < 0.05$)。Note: Different lowercase letters in the figure indicate significant differences in soil nutrient content among treatments within the same year and the same growth stage ($P < 0.05$).

图5 2023—2024年不同处理下土壤全氮(a~b)、全磷(c~d)和全钾(e~f)含量

Fig. 5 Soil total nitrogen (a-b), total phosphorus (c-d) and total potassium (e-f) content for different treatments during 2023-2024

2.3 生物质炭与秸秆颗粒混施联合沼液对玉米产量及其构成的影响

表5展示了2023—2024年各处理下玉米产量及其构成。各处理下的穗行数、行粒数、百粒重和产量变化趋势基本一致。在相同施肥方式下,与CK处理相比,MS和MB处理均显著提高产量构成要素及产量,但两者间无显著差异。N2施肥方式下,MSN2和MBN2处理的产量较CK处理两年平均显著提高了15.17%和15.62% ($P < 0.05$),N1施肥方式进一步提高了产量,与CK处理相比,MSN1和MBN1处理两年增幅分别为18.15%~26.86%和19.17%~24.72% ($P < 0.05$)。在相同有机物料添加比例下,N1施肥方式较N2施肥方式增加了产量及其构成要素,MSN1处理较MSN2处理的产量在2024年显著提升了9.02%。综上,与CK处理相比,MSN1和MBN1处理显著提高了产量,两年平均增加了22.51%和21.94% ($P < 0.05$)。

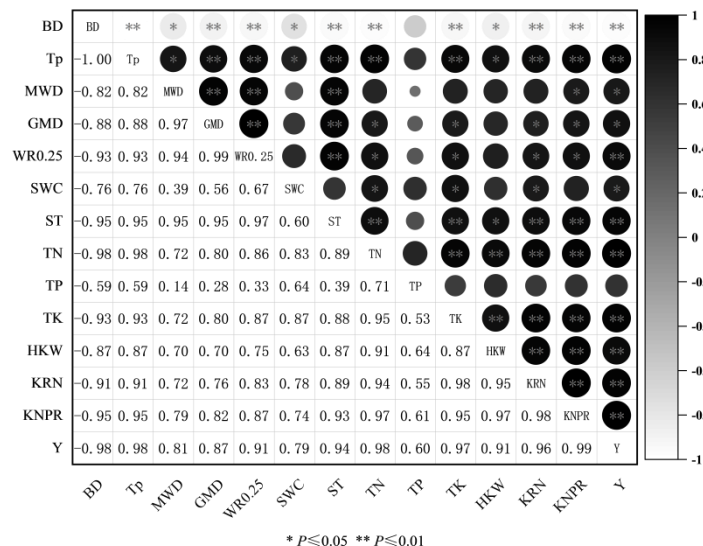
表 5 2023—2024 年不同处理下玉米产量及其构成

Table 5 Yield and yield components of maize for different treatments during 2023-2024

年份 Year	处理 Treatment	穗行数	行粒数	百粒重	产量
		Kernel row number	Kernel number per row	Hundred kernel weight/g	Yield/(t·hm ⁻²)
2023	CK	14.81±0.48c	35.61±1.49c	31.50±0.66d	8.87±0.27d
	FSN1	15.83±0.32ab	39.20±1.50b	33.41±0.84bc	9.73±0.36bc
	FSN2	15.42±0.41bc	37.52±1.73bc	32.12±0.67cd	9.34±0.34cd
	MSN1	16.45±0.53a	43.21±2.04a	36.42±1.09a	10.48±0.42a
	MSN2	15.81±0.39ab	40.13±1.42ab	33.44±0.97bc	10.11±0.30ab
	MBN1	16.21±0.43ab	42.63±1.81a	34.85±1.08ab	10.57±0.40a
	MBN2	15.92±0.44ab	40.84±1.05ab	34.23±1.13b	10.16±0.34ab
2024	CK	14.90±0.41c	35.91±1.42c	33.27±0.48e	8.86±0.37d
	FSN1	15.62±0.40bc	39.82±1.80b	34.43±0.72de	9.89±0.28bc
	FSN2	15.51±0.53bc	38.10±1.58bc	33.76±0.47e	9.42±0.29cd
	MSN1	16.53±0.52a	44.13±2.10a	37.29±0.61a	11.24±0.40a
	MSN2	15.90±0.38ab	40.81±1.81ab	35.18±0.60cd	10.31±0.28b
	MBN1	16.30±0.39ab	43.54±2.03a	36.74±0.74ab	11.05±0.34a
	MBN2	16.00±0.43ab	41.30±1.87ab	35.85±0.73bc	10.34±0.29b

2.4 不同处理的各指标相关性

图 6 展示了各处理的土壤物理指标、养分指标和产量及其构成之间的相关关系。土壤容重与其余指标均呈现程度不等的负相关。孔隙度、MWD、GMD 与 $WR_{0.25}$ 之间呈极显著正相关 ($P \leq 0.01$)，各处理通过降低土壤容重使得土壤团聚体稳定性提高。MWD、GMD、 $WR_{0.25}$ 均与土壤温度间呈现显著正相关 ($P \leq 0.01$)，表明土壤团聚体稳定性与土壤水热状况密切相关。此外，全氮、全钾均与产量间呈现极显著正相关 ($P \leq 0.01$)，各处理通过改善土壤结构，提升土壤养分有效性，从而增加作物产量。



注：SWC：土壤含水量；ST：土壤温度；TN：土壤全氮；TP：土壤全磷；TK：土壤全钾；HKW：百粒重；KRN：穗行数；KNPR：行粒数；Y：产量。* 表示 $P \leq 0.05$ ，相关性显著；** 表示 $P \leq 0.01$ ，相关性极显著。Note: SWC: soil water content; ST: soil temperature; TN: soil total nitrogen; TP: soil total phosphorus; TK: soil total potassium; HKW: hundred kernel weight; KRN: kernel row number; KNPR: kernel number per row; Y: yield. * represents significant correlation at $P \leq 0.05$, and ** represents extremely significant correlation at $P \leq 0.01$.

图 6 不同处理下土壤理化性质和产量的相关性

Fig. 6 Correlation analysis of soil physicochemical properties and yield for different treatments

2.5 不同处理的综合评价结果

基于熵权 TOPSIS 模型对各处理的土壤物理指标、养分指标及作物产量指标进行综合评分结果见表 6，在 N2 施肥方式下，MSN2 相对贴适度显著高于 FSN2 和 CK 处理，分别平均高 0.252 和 0.295。在相同有机物料施加下，N1 较 N2 施肥方式相对贴适度显著增加，其中 MSN1 处理的相对贴适度最高，为 0.805，被评为“优”等级。

表 6 不同处理贴适度 and 效应等级

Table 6 Fit and effect grade of different treatments

处理 Treatment	D ⁺	D ⁻	C _i	排序 Ranking	效应等级 Effect grade
CK	0.467	0.124	0.210	7	差
FSN1	0.264	0.154	0.368	5	中
FSN2	0.450	0.153	0.253	6	差
MSN1	0.096	0.399	0.805	1	优
MSN2	0.305	0.311	0.505	4	中
MBN1	0.117	0.341	0.744	2	良
MBN2	0.174	0.260	0.599	3	中

注：D⁺：正理想解距；D⁻：负理想解距；C_i：相对贴适度。表中各处理数据为两年平均值。Note: D⁺: Distance to positive ideal solution; D⁻: Distance to negative ideal solution; C_i: Relative closeness degree. Data in the table are the average values of two years.

3 讨论

3.1 生物质炭和秸秆颗粒混施联合沼液施用对黑土物理性质的影响

土壤物理性质是反映土壤结构质量和作物生长状况的重要指标^[22]。本研究发现，相较于传统秸秆还田，生物质炭替代一定比例秸秆混施显著降低了土壤容重、提高了土壤孔隙度（图 2）与土壤团聚体稳定性（表 4），对土壤结构改善效果优于秸秆颗粒单施处理。这可能源于以下几个原因：秸秆压缩颗粒施入土壤后可吸水膨胀并逐渐松散腐解，促进有机质积累和团聚体形成，并在腐解过程中改善土壤孔隙结构，而生物质炭则因其低容重和多孔结构，可进一步提升土壤孔隙度，二者协同作用有助于降低土壤容重，改善土壤结构^[9, 23]；秸秆颗粒腐解释放有机胶结物质，快速粘结微团聚体，形成大团聚体，而生物质炭高比表面积和强吸附性可吸附腐殖质和胶结物质，增强胶结剂的持久性与抗分解能力，两者协同促进微团聚体向大团聚体的转化^[10, 24]，然而，生物质炭还田初期可能具有一定疏水性，若其替代秸秆比例过高，易导致土壤水分分布不均，并削弱干湿循环对团聚体形成的促进作用^[25]，秸秆颗粒提供易利用碳源，生物质炭提供栖息微环境，二者协同可促进微生物活动，进一步提高土壤团聚体稳定性^[26]。因此，适宜比例的秸秆颗粒与生物质炭配施更有利于发挥协同效应，从而共同提升土壤团聚体稳定性。此外，本研究发现沼液替代化肥后土壤结构改善效果进一步提升（表 4）。一方面，沼液通过降低容重、提高孔隙度、促进颗粒团聚，间接缓解土壤压实^[13]；另一方面，沼液与生物质炭和秸秆颗粒协同作用，促进有机质转化与积累，进一步优化土壤结构并增强其稳定性^[25]。

土壤水热是影响作物生长的重要因素^[27]。本研究发现，生物质炭和秸秆颗粒混施显著提高了土壤含水率并调节了土壤温度，效果优于秸秆颗粒单施（图 3）。这是由于秸秆颗粒还田能提高土壤团聚体稳定性，减少土壤水分蒸发，施加生物质炭后，因生物质炭疏松多孔的

结构、高比表面积以及较强的吸附能力,可降低土壤容重和水分蒸发损失,提高总孔隙度,从而进一步提高土壤含水量及持水能力^[25-28]。与此同时,秸秆配施生物质炭还田后,可增加土壤总孔隙度,提高土壤透气性,进而降低了土壤比热,最终引起土壤温度的上升^[29]。此外,生物质炭呈深黑色,施入土壤后可显著降低地表反射率,提高太阳辐射吸收效率,进而提高土壤温度^[30]。而沼液替代化肥后,沼液作为液态有机肥施用后可直接补充土壤水分,提高土壤孔隙度,使得空气隔热层增强,进而减少热量散失,最终提高土壤温度^[13-31]。

3.2 生物质炭和秸秆颗粒混施联合沼液施用对土壤养分及产量的影响

土壤养分含量是衡量土壤肥力水平及其供肥能力的重要指标^[32]。本研究发现生物质炭与秸秆颗粒混施显著提高了土壤全氮、全磷和全钾含量(图5)。首先,生物质炭和秸秆颗粒混施改善了土壤结构、提高土壤团聚体稳定性,间接减少养分淋失,最终促进土壤肥力水平提高^[33]。其次,生物质炭和秸秆颗粒本身含氮、钾有机组分,腐解过程中逐步释放有机氮与无机氮,直接补充土壤氮库和钾库^[10-34]。最后,生物质炭具有较强的吸附与固定能力,可通过物理吸附和化学结合固定铵态氮、磷酸根及钾离子,减少淋失和挥发,从而提高土壤养分累积水平^[35]。然而,与高比例秸秆颗粒混施处理相比,高比例生物质炭混施处理对土壤养分并未表现出显著改善效果。这是因为生物质炭结构稳定,短期内难以降解,限制养分的释放与积累,导致土壤全量养分提升效果下降^[36]。沼液富含速效无机氮、可溶性磷、钾及活性有机质,可快速补充土壤速效养分库。与秸秆颗粒和生物质炭混施后,沼液中的活性有机质促进土壤微生物活动,加速秸秆颗粒分解及养分转化过程^[14-30]。同时,沼液中的养分可被生物质炭吸附与固定,通过缓释过程持续供给,间接推动了土壤全量养分的累积与平衡。因此,生物质炭、秸秆颗粒和沼液三者协同作用可优化土壤养分环境。

生物质炭与秸秆颗粒混施对土壤结构、水热环境和养分供应过程的协同改善,进一步显著提高了穗行数、行粒数、百粒重及产量^[37]。土壤全氮、全磷和全钾含量的提升增强了土壤养分供应能力,满足作物各生育阶段的养分需求^[38]。沼液替代化肥处理对玉米产量及其构成要素具有更明显的促进作用(表5),这是由于沼液兼具速效养分供给和有机物料输入功能,可改善土壤养分供应的连续性和有效性,与秸秆颗粒和生物质炭配施后,沼液可调节秸秆碳氮比,促进秸秆腐解与养分释放;生物质炭则可固持沼液中的氮、磷、钾等养分,减少损失并延长供肥时间,三者协同提高了土壤供肥能力,进而促进籽粒发育和产量形成^[13-30]。结合熵权 TOPSIS 综合评价结果(表6),生物质炭与秸秆颗粒 1:2 混施配施沼液处理综合得分最高,进一步印证该配施模式在提升土壤肥力与玉米产量方面的显著效果。

本研究为期两年的田间试验,生物质炭、秸秆颗粒与沼液联合施用对黑土碳氮转化、微生物群落结构及碳汇功能的长期影响尚不明确,其作用机制仍需通过长期定位试验验证。此外,本试验仅设定单一秸秆投入量及配比梯度,未充分考虑不同地力和气候条件下的适配性,其区域推广的普适性仍有待完善。未来研究应依托长期观测,系统阐明三者耦合对黑土肥力可持续性的调控机制,并开展多条件适配性研究,为黑土区有机资源高效利用和绿色农业发展提供坚实的理论与技术支撑。

4 结 论

本研究通过东北黑土区连续两年田间定位试验,系统探究了生物质炭、秸秆颗粒与沼液不同配施模式对土壤理化性质及玉米产量的调控效应。结果表明,生物质炭与秸秆颗粒混施可显著降低土壤容重,提高总孔隙度,促进大团聚体形成并增强团聚体稳定性,同时有效改善土壤水热状况,整体改良效果显著优于全量秸秆还田;沼液替代化肥施用能够进一步优化土壤物理结构,增强有机物料配施的改良效果。生物质炭与秸秆颗粒混施结合沼液替代化肥,

可显著提升土壤全氮、全磷、全钾含量,优化土壤养分供应状况,进而显著提高玉米穗行数、行粒数与百粒重等产量构成指标,实现玉米增产。基于熵权 TOPSIS 模型综合评价,生物质炭和秸秆颗粒 1:2 混施联合沼液施用处理在土壤结构改善、肥力提升及玉米增产方面表现最优,是适宜东北黑土区玉米种植的绿色高效农田管理模式。研究结果可为黑土耕地质量提升及秸秆资源化高效利用提供理论依据与实践参考。

参考文献 (References)

- [1] Yan L, Dong T H, La Y P, et al. Effects of no-tillage and straw returning on soil aggregates composition and organic carbon content in black soil areas of Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(22): 181-188. [闫雷, 董天浩, 喇乐鹏, 等. 免耕和秸秆还田对东北黑土区土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 181-188.]
- [2] Zhang S, Liu T, Hao Z Y, et al. Research progress on characteristics of nitrogen-fixing microorganisms in farmland soil of black soil region in Northeast China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6): 13-26. [张爽, 刘涛, 郝紫玉, 等. 东北黑土区农田土壤固氮微生物特征研究进展[J]. 水土保持学报, 2025, 39(6): 13-26.]
- [3] Zhang C, Zhao X, Liang A J, et al. Insight into the soil aggregate-mediated restoration mechanism of degraded black soil via biochar addition: Emphasizing the driving role of core microbial communities and nutrient cycling[J]. Environmental Research, 2023, 228: 115895.
- [4] Zhang X M, Guo J H, Vogt R D, et al. Soil acidification as an additional driver to organic carbon accumulation in major Chinese croplands[J]. Geoderma, 2020, 366: 114234.
- [5] Jia R F, Cong R H, Xu Z Y, et al. Meta analysis of straw returning technology to improve soil physicochemical properties and increase the yield of main cereal and oil crop[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(4): 80-89. [贾瑞峰, 丛日环, 徐志宇, 等. 秸秆还田技术改善土壤理化性质提高作物产量的 Meta 分析[J]. 农业工程学报, 2025, 41(4): 80-89.]
- [6] Feng X B. The influence of straw returning to the field on soil fertility and maize yield[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2026(1): 30-32. [冯晓兵. 秸秆还田对土壤肥力及玉米产量的影响[J]. 农业技术与装备, 2026(1): 30-32.]
- [7] Ninkuu V, Liu Z X, Qin A Z, et al. Impact of straw returning on soil ecology and crop yield: A review[J]. Heliyon, 2025, 11(2): e41651.
- [8] Cong P, Li Y Y, Gao Z J, et al. High dosage of pelletized straw returning rapidly improving soil organic carbon content and wheat-maize yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(1): 148-156. [丛萍, 李玉义, 高志娟, 等. 秸秆颗粒化高量还田快速提高土壤有机碳含量及小麦玉米产量[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 148-156.]
- [9] Dong J X, Song W J, Cong P, et al. Improving farmland soil physical properties by rotary tillage combined with high amount of granulated straw[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(13): 2789-2803. [董建新, 宋文静, 丛萍, 等. 旋耕配合秸秆颗粒还田对土壤物理特性的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(13): 2789-2803.]
- [10] Liao Y W, Liao P, Liu J X, et al. Short-term effects of straw biochar on the composition of soil aggregates and their carbon and nitrogen distribution in red soil vegetable fields[J]. Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition), 2023, 44(5): 41-48. [廖雅汶, 廖萍, 刘建秀, 等. 秸秆生物炭对红壤菜地土壤团聚体组成及其碳氮分布的短期效应[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2023, 44(5): 41-48.]
- [11] Jiang S C, Zhang H W, Yang D, et al. Effects of combined application of chemical and organic fertilizer on soil bulk density, pH, and carbon and nitrogen metabolism in ratooning rice fields[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(7): 1053-1066. [姜硕琛, 张海维, 杨迪, 等. 化肥与有机肥配施对再生稻田土壤容重、pH 和碳氮代谢的影响[J]. 中国生态农业学报, 2023, 31(7): 1053-1066.]
- [12] Bai J L, Ji Q Y, Wang X L, et al. Effect of biochar addition on soil water and nutrient contents and yield formation of millet in loess arid region[J]. Soils and Crops, 2024, 13(2): 225-234. [白计玲, 纪荣云, 王小林, 等. 生物炭添加对黄土旱区土壤水肥环境及谷子产量形成的影响[J]. 土壤与作物, 2024, 13(2): 225-234.]

- [13] Chen Z D, Guo Q, Wu F L, et al. Effects of pig manure biogas slurry on corn yield and soil physical and chemical properties[J]. China Biogas, 2023, 41(6): 55-61.[陈钟佃, 郭庆, 吴飞龙, 等. 猪粪沼液对玉米产量及土壤理化性状的影响研究[J]. 中国沼气, 2023, 41(6):55-61.]
- [14] Wang Z G, Han X, Xu S Q, et al. Study on the crop yield and soil fertility under the biogas slurry application: A meta-analysis[J]. China Biogas, 2023, 41(4): 3-10.[王志刚, 韩雪, 徐少奇, 等. 基于 Meta 分析的沼液施用对作物-土壤系统效应的影响[J]. 中国沼气, 2023, 41(4): 3-10.]
- [15] Hu C, Chen Y F, Qiao Y, et al. Effect of returning straw added with straw-decomposing inoculants on soil melioration in low-yielding yellow clayey soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2016, 22(1): 59-66.[胡诚, 陈云峰, 乔艳, 等. 秸秆还田配施腐熟剂对低产黄泥田的改良作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 59-66.]
- [16] Li L, Wang J, Zhu Z M, et al. Effects of nitrogen fertilizer reduction combined with organic fertilizer/straw on soil fertility index and maize yield in saline-alkali land [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(4): 928-935.[李磊, 王晶, 朱志明, 等. 氮肥减施与有机肥 / 秸秆配施对盐碱地土壤肥力指标及玉米产量的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(4): 928-935.]
- [17] Niu W J, Xu W X, Chen X B, et al. Effects of combined application of straw, biochar and biogas slurry on soil characteristics and crop yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(24): 122-132.[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.]
- [18] Hou J X, Zhang S M, Yuan J C, et al. Effects of maize straw-derived organic materials on improving soil nutrient availability and enzyme activities in a Mollisol[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(4): 610-618.[侯建勋, 张水梅, 袁静超, 等. 玉米秸秆源有机物料对黑土养分有效性及酶活性的提升效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(4): 610-618.]
- [19] Liu H Y, Lou C R, Han Y Z, et al. Impact of biochar addition combined with reduced nitrogen fertilizer on nitrogen use efficiency and soil structure in brown earth[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(5): 1180-1188.[刘慧屿, 娄春荣, 韩英祚, 等. 秸秆生物炭与减量氮肥配施对玉米氮素利用率及土壤结构的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(5): 1180-1188.]
- [20] Zhang X, Wu Q F, Zhou Y, et al. Effects of organic amendments and their combination with biochar on the stability of aggregates in red soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(4): 1093-1102.[张新, 邬奇峰, 周燕, 等. 有机物料单施及与生物炭配施对红壤团聚体稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2025, 62(4):1093-1102.]
- [21] Wang Y H, Pang J W, Wei T, et al. Coupled effects of film mulching and straw-derived carbon inputs on soil aggregate characteristics and crop yields in semiarid areas[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(1): 272-284.[王钰皓, 庞津雯, 卫婷, 等. 旱作农田覆膜和秸秆碳投入对土壤团聚特性及作物产量的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(1): 272-284.]
- [22] Sainju U M, Liptzin D, Jabro J D. Relating soil physical properties to other soil properties and crop yields[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 22025.
- [23] Xie Y R, Hao W F. Research progress on application of biochar in agricultural soil remediation[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2025(23): 82-87.[谢煜柔, 郝文芳. 生物炭在农业土壤修复中的应用研究进展[J]. 现代农业科技, 2025(23): 82-87.]
- [24] Wang Q, Zhu Y X, Xu L Z, et al. Effects of biochars application on humus composition and water-stable aggregates distribution of black soil[J]. Soils, 2023, 55(3): 605-611.[王琪, 朱莹雪, 许连周, 等. 施用生物炭对黑土腐殖质组成及水稳性团聚体分布的影响[J]. 土壤, 2023, 55(3): 605-611.]
- [25] Wang X F, Li Y, Wang H R, et al. Targeted biochar application alters physical, chemical, hydrological and thermal properties of salt-affected soils under cotton-sugarbeet intercropping[J]. Catena, 2022, 216: 106414.
- [26] Xia H, Wang J Y, Riaz M, et al. Co-application of biochar and potassium fertilizer improves soil potassium availability and microbial utilization of organic carbon: A four-year study[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 469: 143211.
- [27] Xu Q, Liu H G, Li M S, et al. Effects of different application methods of biochar on water and salt regulation and wheat seedling growth[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 363-369.[徐强, 刘洪光, 李明思, 等. 生物炭

- 不同施用方式对水盐调控及小麦苗期生长的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(5): 363-369.]
- [28] Yang K, Zhao B W, Nie J, et al. Effect of wheat straw biochar on thermophysical properties of sierozem soil farmland[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2024, 43(1): 108-113. [杨珂, 赵保卫, 聂瑾, 等. 小麦秸秆生物炭对灰钙土农田土壤热物理性质的影响[J]. 兰州交通大学学报, 2024, 43(1): 108-113.]
- [29] Lund M, Stiegler C, Abermann J, et al. Spatiotemporal variability in surface energy balance across tundra, snow and ice in Greenland[J]. Ambio, 2017, 46(1): 81-93.
- [30] Moridi A, Zarei M, Moosavi A A, et al. Effect of liquid organic fertilizers and soil moisture status on some biological and physical properties of soil[J]. Polish Journal of Soil Science, 2021, 54(1): 41-58.
- [31] Chen C, Zhao X S, Gao C J, et al. The effects of amendments with different proportions on soil physicochemical properties and organic carbon components[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2025, 53(21): 71-76.[陈超, 赵雪淞, 高传俊, 等. 不同配比改良剂对土壤理化性质及有机碳组分的影响[J]. 安徽农业科学, 2025, 53(21): 71-76.]
- [32] Shen F L, Zhu J S, Zhou L, et al. Long-term effects of straw and biochar application on soil quality in black soil region of Northeast China[J/OL]. Journal of Jilin Agricultural University, 1-8[2026-03-27]. [申芳林, 祝江松, 周力, 等. 秸秆与生物炭长期施用对东北黑土土壤质量的提升效应[J/OL]. 吉林农业大学学报, 1-8[2026-03-27].]
- [33] Xie N H, Fan Y C, Duan N, et al. Interactive effects of straw and biochar amendments on soil organic carbon stabilization and bacterial community dynamics[J]. Biology and Fertility of Soils, 2025, 61(8): 1423-1437.
- [34] Xiao H Y, Zhu W, Zheng S M, et al. Effects of continuous application of different biochars on tobacco-planting soil nutrients[J]. Soils, 2024, 56(2): 326-332. [肖和友, 朱伟, 郑生猛, 等. 连续施用不同种类生物质炭对植烟土壤养分的影响[J]. 土壤, 2024, 56(2): 326-332.]
- [35] Nguyen T T N, Xu C Y, Tahmasbian I, et al. Effects of biochar on soil available inorganic nitrogen: A review and meta-analysis[J]. Geoderma, 2017, 288: 79-96.
- [36] Zhang L Y, Li L, Zhang H D, et al. Effects of maize straw and its biochar composite substrates on the architecture of maize roots[J]. Journal of South China Agricultural University, 2024, 45(2): 207-217. [张立芸, 黎力, 张海东, 等. 玉米秸秆及其生物炭复配基质对玉米根系构型的影响[J]. 华南农业大学学报, 2024, 45(2): 207-217.]
- [37] Omokaro G O, Kornev K P, Nafula Z S, et al. Biochar for sustainable soil management: Enhancing soil fertility, plant growth and climate resilience[J]. Farming System, 2025, 3(4): 100167.
- [38] Zhang J J, Fan T L, Zhao G, et al. Effect of long-term fixed application of different material replacing partly chemical nitrogenous fertilizer on soil nutrition in dry land of eastern Gansu Province[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2018(3): 85-91. [张建军, 樊廷录, 赵刚, 等. 不同有机物料与部分化肥长期定位配合施用对土壤养分的调控效应[J]. 中国土壤与肥料, 2018(3): 85-91.]

(责任编辑: 陈荣府)