doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.12.031

# 生物炭与沼液配施对黑土土壤养分和大豆生长的影响

杨爱峥[1]　陈佳旺[1]　王秋菊[2]　王小芳[1]　沙　炎[1]　李　茉[1]

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

**摘要**：提升土壤养分利用效率和生产力是推动黑土地保护和农业绿色发展的重要途径。本研究通过盆栽试验探究不同生物炭施加深度配施沼液对黑土土壤养分分布及大豆生长的影响，共设置 3 个生物炭施加深度：未施加（H0）、浅施于 0～20 cm（H1）、深施于 0～40 cm（H2），以及常规施肥（N0）和施加沼液（N3）2 种施肥方式，共 6 个处理。试验结果表明：深施生物炭能显著提高土壤养分含量，促进大豆生长，同时随着生物炭施加深度增加，施加沼液能进一步促进土壤养分积累和大豆生长。与 H0N0 相比，整个生育期内，0～20 cm 土层中，H1N3 处理铵态氮和硝态氮含量分别提高 26.14% 和 30.73%，土壤微生物量氮和全氮含量分别提高 18.82% 和 13.21%；20～40 cm 土层中，H2N3 处理铵态氮和硝态氮含量分别提高 25.85% 和 33.38%，土壤微生物量氮和全氮含量分别提高 20.58% 和 12.21%。同时，H2N3 处理显著改善大豆叶片生理特性，叶绿素含量、净光合速率、气孔导度和瞬时水分利用效率分别提高 39.89%、32.45%、27.01% 和 19.88%，大豆产量提高 28.67%。基于熵权 TOPSIS 模型的综合评价结果表明，H2N3 处理综合效益最佳，既能有效活化深层土壤资源、扩容土壤养分库，又能显著提升沼液养分利用效率，实现土壤肥力与作物产量的协同提升，为黑土区生物炭与沼液深施还田模式优化提供了科学依据。

**关键词**：生物炭；沼液；土壤养分；大豆产量；熵权 TOPSIS 模型

**中图分类号**：S565.1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)12-0332-11　　**OSID**：

# Impact of Combined Application of Biochar and Digestate on Black Soil Nutrients and Soybean Growth

YANG Aizheng[1]　CHEN Jiawang[1]　WANG Qiuju[2]　WANG Xiaofang[1]　SHA Yan[1]　LI Mo[1]

(1. *College of Hydraulic Science and Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*
2. *Heilongjiang Province Black Soil Protection and Utilization Research Institute*, *Harbin* 150030, *China*)

**Abstract**: Enhancing soil nutrient utilization efficiency and productivity is a crucial approach for promoting black soil conservation and sustainable agricultural development. The effects of digestate combined with biochar incorporated at different depths on black soil nutrients and soybean growth were investigated through a pot experiment. The experiment included three biochar incorporation depths: no application (H0), applied shallowly in the 0～20 cm soil layer (H1), and applied deeply in the 0～40 cm soil layer (H2), combined with two fertilization methods: conventional fertilization (N0) and digestate application (N3), resulting in a total of six treatments. The results demonstrated that deep biochar application significantly increased soil nutrient content and promoted soybean growth. Furthermore, the advantages of digestate application over conventional fertilization in enhancing soil nutrient accumulation and soybean growth became more pronounced with increasing biochar incorporation depth. Throughout the growth period, compared with the H0N0 treatment, in the 0～20 cm soil layer, the H1N3 treatment increased ammonium nitrogen and nitrate nitrogen content by 26.14% and 30.73%, respectively, soil microbial biomass nitrogen by 18.82%, and total soil nitrogen by 13.21%. In the 20～40 cm soil layer, the H2N3 treatment increased ammonium nitrogen and nitrate nitrogen content by 25.85% and 33.38%, respectively, soil microbial biomass nitrogen by 20.58%, and total soil nitrogen

收稿日期：2025－11－19　修回日期：2026－01－24

**基金项目**：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（YQ2024E001）、中国博士后科学基金面上项目（2024M760399）和自然资源要素耦合过程与效应重点实验室开放课题（ZH－2024－012）

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

**通信作者**：李茉（1988—），女，教授，博士生导师，主要从事变化环境下农业水土资源高效利用与管理研究，E-mail：limo0828@neau.edu.cn

by 12.21%. Additionally, the H2N3 treatment significantly enhanced soybean physiological parameters: leaf chlorophyll content was increased by 39.89%, net photosynthetic rate was increased by 32.45%, stomatal conductance was increased by 27.01%, and instantaneous leaf water use efficiency was increased by 19.88%. Correspondingly, soybean yield was increased by 28.67%. A comprehensive evaluation based on the entropy-weighted TOPSIS model identified the H2N3 treatment as the most effective. This treatment not only effectively activated deep soil resources and expanded the soil nutrient pool but also significantly improved the nutrient use efficiency of digestate, resulting in a notable synergistic enhancement effect on both soil fertility and crop yield. These findings can provide a scientific basis for optimizing the deep application of biochar and digestate in black soil regions.

**Key words**: biochar; digestate; soil nutrients; soybean yield; entropy weight TOPSIS model

## 0　引言

松嫩平原是世界三大黑土区之一，土壤肥沃、光照充足、气候适宜，是我国重要的粮食主产区。据政府间气候变化委员会（IPCC）以及联合国粮食及农业组织（FAO）等相关组织统计，由于长期高强度利用、化肥过度使用以及气候变化等因素，黑土区土壤面临结构变差、养分储量持续下降等问题，严重威胁土壤质量和粮食安全[1]。因此，如何在化肥减量的前提下，实现作物稳产高产与土壤健康保育，已成为当前黑土区农业可持续发展的核心挑战。

我国作物秸秆资源丰富，总量从 2011 年 $7.52\times10^9$ t 增加到 2022 年 $8.65\times10^8$ t[1]。然而，秸秆不合理处置对黑土区农业系统产生显著负面影响[2-3]。一方面，秸秆离田直接造成土壤有机质流失，影响耕地可持续生产力；另一方面，东北地区低温条件限制秸秆分解转化速率，秸秆还田后易造成出苗率降低、土壤跑墒以及养分释放滞后等问题[4-5]。生物炭是在厌氧或无氧条件下对农业废弃物进行高温裂解（300～1 000℃）形成的一种多孔富碳材料，其碳骨架芳香化程度较高、环境稳定性较强，具有环境友好与碳汇潜力，可用于土壤改良与养分调控[6-7]。生物炭通常具有发达的孔隙结构和较大的比表面积，并携带羧基、羟基等多种表面含氧官能团，在改善土壤理化性质、提升养分保持能力以及调控氮素转化过程中发挥重要作用[8-9]。一方面，生物炭可通过孔隙截留以及表面官能团介导的吸附与离子交换作用，增强土壤对铵态氮等养分的保持与缓冲能力，从而降低养分随水分迁移而发生淋失的风险；同时，生物炭常具有一定碱性，有助于调节酸性土壤反应、改善养分有效性并促进养分形态的相对稳定[10]。另一方面，生物炭可为微生物提供栖息空间并改变土壤水分与通气等微环境条件，进而影响微生物活性与群落结构，间接调控有机氮矿化、硝化等关键氮循环过程[11-12]。在相同生物炭施加量下，施加深度将影响土壤剖面中生物炭分布浓度，并导致改良效应在垂直方向表现出显著的异质性。现有研究普遍关注生物炭施用量对土壤性质的影响，却忽视了施加深度这一关键因素。

不合理施肥，尤其是氮肥过量施加，不仅降低养分利用率和增产效益，还可能加剧土壤酸化与板结，削弱土壤保肥保水功能，严重威胁土壤健康[13]。沼液是畜禽养殖废弃物厌氧发酵产生的液态副产物，含有以铵态氮为主的速效氮，可作为重要的有机氮源[14-15]。同时，沼液中可溶性有机碳与养分可增强土壤微生物活性，促进微生物量氮形成与周转，扩大土壤活性氮库并提升氮素供应能力。已有研究表明，合理施用沼液有助于提高土壤有机质含量，改善团聚体结构与孔隙状况，并对土壤酸碱环境具有一定调节作用，从而增强土壤持水保肥能力[16-18]。然而，沼液田间应用仍面临养分损失与空间供给受限等问题。沼液中速效氮比例较高，采用浅层施用时易发生氨挥发，并易通过径流与淋溶流失，导致养分利用效率下降并增加水体富营养化风险。与此同时，沼液中部分有机组分需矿化后才能被作物利用，释放过程相对滞后，造成养分供给与作物生育期需求在时间尺度上不匹配。此外，沼液浅层施用易造成养分在表层富集而深层供给不足，难以满足深根层对养分的持续需求，进而限制深层土壤资源的利用与作物稳产增产。因此，提高沼液养分利用效率不仅需要抑制挥发与淋溶等速效氮损失，还需通过施用方式优化养分在土壤剖面内分布。生物炭可通过吸附与离子交换等作用增强对氮素的保持与缓释能力，从而减少淋溶损失并改善氮素转化过程。在此基础上，将沼液与生物炭混施并结合耕作措施实现定深施入，可进一步促进养分向深层迁移与储存，提高深层土壤供肥的持续性与稳定性，从而改善养分供给与作物需求时空匹配。

现有研究主要关注生物炭或沼液单施对土壤环境与作物生长的影响，且由于常规施用多局限于表层土壤，改良效应易受作用层位偏浅的限制。

然而,关于二者配施条件下不同施用深度差异及其交互作用研究仍较少。基于此,本研究以施用深度调控为切入点,探究不同生物炭施用深度下配施沼液对黑土养分动态变化及大豆生长的影响,以期明确深层协同施用的效应,为黑土区沼液与生物炭协同还田施用深度优化与配施模式构建提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验用土来源于东北农业大学向阳试验基地 0 ~ 80 cm 土层,所用生物炭来源于辽宁锦州生物炭制备厂,沼液取自黑龙江瑞苗肥料制造有限责任公司,具体理化性质如表 1 和表 2 所示。

**表 1 生物炭理化性质**

**Tab. 1 Physicochemical properties of biochar**

| 参数 | 粒径/mm | 碳含量/% | 总氮含量/% | 硫含量/% | 氢含量/% | 灰分含量/% | 比表面积/($m^2 \cdot g^{-1}$) | pH 值 | 孔隙度 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 数值 | 1.5 ~ 2.0 | 70.38 | 1.53 | 0.78 | 1.68 | 31.8 | 222 | 9.7 | 0.52 |

**表 2 沼液理化性质**

**Tab. 2 Physicochemical properties of digestate**

| 参数 | pH 值 | 有机质含量/($mg \cdot mL^{-1}$) | 有效磷含量/($mg \cdot mL^{-1}$) | 速效钾含量/($mg \cdot mL^{-1}$) | 铵态氮含量/($mg \cdot mL^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| 数值 | 7.46 | 16.87 | 21.77 | 22.33 | 90.26 |

### 1.2 试验设计

试验在东北农业大学水利科学与工程学院水利综合试验场进行。采用盆栽试验方法,试验容器为口径 16 cm、高 55 cm PVC 管,供试作物为大豆(东生 1 号)。试验采用双因素完全方案设计,分别为生物炭施加深度(设 3 个水平:未施加(H0)、浅施 0 ~ 20 cm 土层(H1)、深施 0 ~ 40 cm 土层(H2))与施肥方式(设 2 个水平:传统施肥(N0)、施加沼液(N3))。所有施加生物炭处理均保持相同生物炭施加量;同时,各施肥处理均控制总氮施加量一致。试验共设 6 个处理,每个处理设置 4 次重复(表 3)。以未施加生物炭与常规施肥处理(H0N0)为对照。填装土壤前,对需施加沼液处理进行物料预处理:将生物炭与对应处理的沼液混合,并将混合物置于恒温振荡器中,在 25℃、150 r/min 条件下连续振荡 24 h。随后,依据各处理设计的深度要求,将预处理后混合物与土壤充分混匀后填装入 PVC 管中(图 1)。常规施肥处理均在播种前将化肥施入 0 ~ 20 cm 土层作为基肥。播种时,每盆设置 4 个呈正方形排列的播种点,点间距为 6 cm。每点播种 2 ~ 3 粒种子,待出苗后实施间苗,确保每点最终保留 2 株健壮植株。

**表 3 盆栽各处理氮肥、沼液及生物炭量**

**Tab. 3 Dosage of nitrogen fertilizer, biogas slurry and biochar in different pot treatments**

| 处理 | 处理方式 | 肥料用量 | | | | 干土量/kg | 生物炭量/kg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 氮肥/g | 磷肥/g | 钾肥/g | 沼液/mL | | |
| H0N0 | 不施加生物炭 H0,常规施肥 N0 | 0.6 | 1.61 | 0.54 | 0 | 11.70 | 0 |
| H0N3 | 不施加生物炭 H0,施加沼液 N3 | 0 | 1.61 | 0.54 | 240 | 11.70 | 0 |
| H1N0 | 浅施生物炭 H1(0 ~ 20 cm),常规施肥 N0 | 0.6 | 1.61 | 0.54 | 0 | 11.34 | 0.36 |
| H1N3 | 浅施生物炭 H1(0 ~ 20 cm),施加沼液 N3 | 0 | 1.61 | 0.54 | 240 | 11.34 | 0.36 |
| H2N0 | 深施生物炭 H2(0 ~ 40 cm),常规施肥 N0 | 0.6 | 1.61 | 0.54 | 0 | 11.34 | 0.36 |
| H2N3 | 深施生物炭 H2(0 ~ 40 cm),施加沼液 N3 | 0 | 1.61 | 0.54 | 240 | 11.34 | 0.36 |

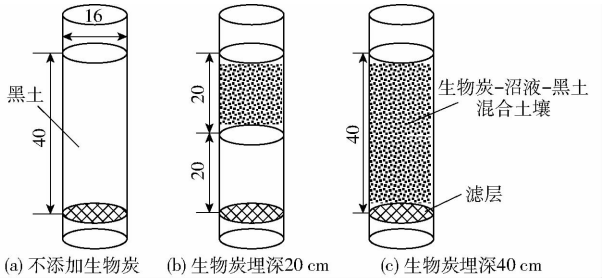


图 1 盆栽处理示意图

Fig. 1 Schematics of pot experiment setup

### 1.3 试验测定方法

#### 1.3.1 土壤养分含量测定

于大豆花期、荚期、鼓粒期和成熟期,分 4 次采集 0 ~ 20 cm 与 20 ~ 40 cm 土层土壤样品。一部分新鲜土壤用 1 mol/L KCl 溶液浸提,用 Smartchem 200 型全自动间断化学分析仪测定土壤铵态氮($NH_4^+$-N)、硝态氮($NO_3^-$-N)含量[19];土壤微生物生物量氮(MBN)采用氯仿熏 - 0.5 mol/L $K_2SO_4$ 浸提(液土质量比 5∶1)[20];其余土样风干过筛,用凯式

定氮仪(SINO KT8400 型)测定全氮(TN)含量[21]，用 TOC 分析仪测定土壤有机碳(SOC)含量[22]。

**1.3.2　大豆光合特性测定**

于大豆苗期、花期、荚期和鼓粒期，选择各处理长势一致的植株，在晴天 09:00—11:30 进行测定。使用 SPAD－502 型叶绿素仪测定完全展开功能叶片的相对叶绿素含量(SPAD 值)，测定部位为叶片中上部并避开中脉，每片叶连续测定 3 次后取平均值。采用 Li－6400XT 型便携式光合仪(LI－COR 公司，美国)同步测定叶片光合特性参数，包括净光合速率、气孔导度和蒸腾速率，每片叶重复测定 3 次并取平均值。植物叶片瞬时水分利用效率(WUE)计算式为[23]

$$WUE = \frac{P_n}{T_r}$$

式中　$P_n$——植物叶片净光合速率

　　$T_r$——植物叶片蒸腾速率

**1.3.3　大豆产量及产量构成要素测定**

于大豆成熟期进行测产。测定指标包括单株有效荚数、单株粒数、百粒质量及单株产量。

**1.3.4　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养分及作物生长的影响。不同处理综合评价指标类型见表 4，效应评价等级见表 5[24]。

**表 4　不同处理综合评价指标类型**

**Tab. 4　Types of indicators for comprehensive evaluation of different treatments**

| 指标类别 | 评价指标 | 指标类型 |
|---|---|---|
| 养分指标 | 铵态氮含量 | 极大型 |
| | 硝态氮含量 | 极大型 |
| | 有机碳含量 | 极大型 |
| | 土壤微生物量氮含量 | 极大型 |
| 植物生长指标 | 叶绿素含量 | 极大型 |
| | 净光合速率 | 极大型 |
| | 气孔导度 | 极大型 |
| | 叶片水分利用效率 | 极大型 |
| 产量指标 | 单株荚数 | 极大型 |
| | 单株粒数 | 极大型 |
| | 百粒质量 | 极大型 |
| | 产量 | 极大型 |

**表 5　效应评价标准**

**Tab. 5　Effectiveness evaluation criteria**

| 相对贴进度 | 评价效应等级 |
|---|---|
| 0.8～1.0 | 优 |
| 0.6～0.8 | 良 |
| 0.3～0.6 | 中 |
| 0～0.3 | 差 |

**1.4　数据统计与分析**

试验数据采用 Microsoft Excel 2021 整理，并运用 Origin 2024 进行图形绘制。采用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析(ANOVA)，以检验各处理间差异的显著性，若存在显著差异，则进一步使用 Dunnett 检验在 0.05 水平上进行多重比较。

## 2　结果与分析

**2.1　沼液配施生物炭对土壤铵态氮、硝态氮的影响**

大豆生育期各处理土壤铵态氮、硝态氮含量变化如图 2(图中不同小写字母表示处理间差异显著($p<0.05$)，下同)所示，随着生育期推进，各处理不同深度土壤铵态氮、硝态氮含量均呈下降趋势。分析表明，施加生物炭对土壤铵态氮、硝态氮含量具有显著提升作用，且该作用因生物炭施加深度的不同呈现规律性差异。整个生育期内，在 0～20 cm 土层，H1 处理显著提高铵态氮含量，并优于 H2 和 H0 处理；而在 20～40 cm 土层，H2 处理铵态氮含量均高于 H1 和 H0 处理。其中，在 0～20 cm 土层，H1 和 H2 处理铵态氮含量分别较 H0 处理提高 21.21%、11.81%；在 20～40 cm 土层，H1 和 H2 处理铵态氮含量分别较 H0 处理提高 12.32%、14.15%。同时，在 0～40 cm 土层，硝态氮含量变化规律与铵态氮含量基本一致，生物炭对 2 种形态无机氮的运移呈现相似的调控作用。此外，通过施加沼液替代常规施肥在此基础上产生叠加效应，进一步提升土壤中无机氮的储存。其中，N3 处理相较于 N0 处理，铵态氮、硝态氮含量均显著增加 12.32%～20.83%。

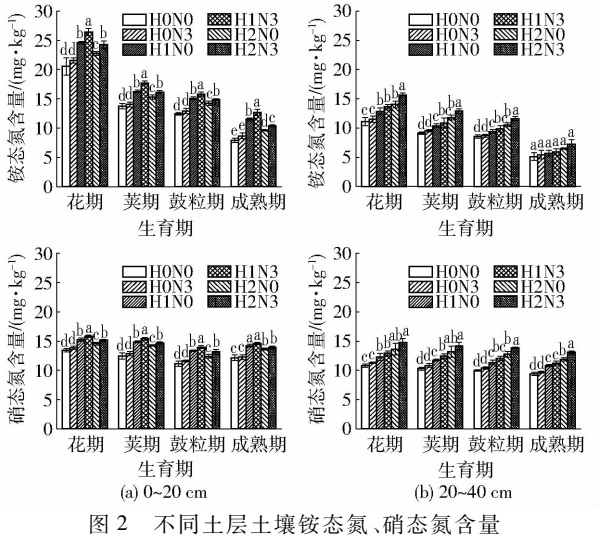


图 2　不同土层土壤铵态氮、硝态氮含量

Fig. 2　Ammonium and nitrate nitrogen content in different soil layers

**2.2　沼液配施生物炭对土壤微生物量氮的影响**

大豆生育期内土壤微生物量氮动态变化特征如

图 3 所示,整体表现为先上升并于鼓粒期达到峰值后下降。生物炭施加深度对土壤微生物量氮的影响呈现显著空间特征。整个生育期内,0 ~ 20 cm 土层中,H1 处理提升效果最优,较 H0 处理平均提高 27.72%;而 20 ~ 40 cm 土层中,H2 处理作用更显著,较 H0 处理平均提高 24.67%。沼液配施进一步放大了这一趋势,各处理 0 ~ 20 cm 土层土壤微生物量氮含量增幅显著高于 20 ~ 40 cm 土层。其中,相较于 H0N0 处理,H2N3 处理 0 ~ 40 cm 土层土壤微生物量氮含量平均提升 18.12%。

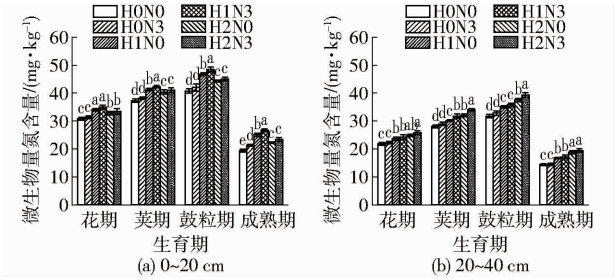


图 3 不同土层土壤微生物量氮含量

Fig. 3 Nitrogen content of soil microbial biomass in different soil layers

## 2.3 沼液配施生物炭对土壤全氮的影响

如图 4 所示,在大豆生育期内,土壤全氮含量受到生物炭施加深度与沼液施用的显著影响,并呈清晰的垂直分异特征。浅施生物炭主要促进耕层氮储量,而深施生物炭则扩大整个土壤剖面的氮库容量。整个生育期内,在 0 ~ 20 cm 土层,H1 和 H2 处理全氮含量分别较 H0 处理显著增加 14.49%、7.63%,而在 20 ~ 40 cm 土层,H1 和 H2 处理较 H0 处理分别高 10.61%、20.17%。此外,沼液配施均提升各土层全氮含量,且其对浅层与深层土壤全氮含量提升幅度相近。N3 处理较 N0 处理在 0 ~ 20 cm 与 20 ~ 40 cm 土层分别增加 3.45% 与 4.74%。

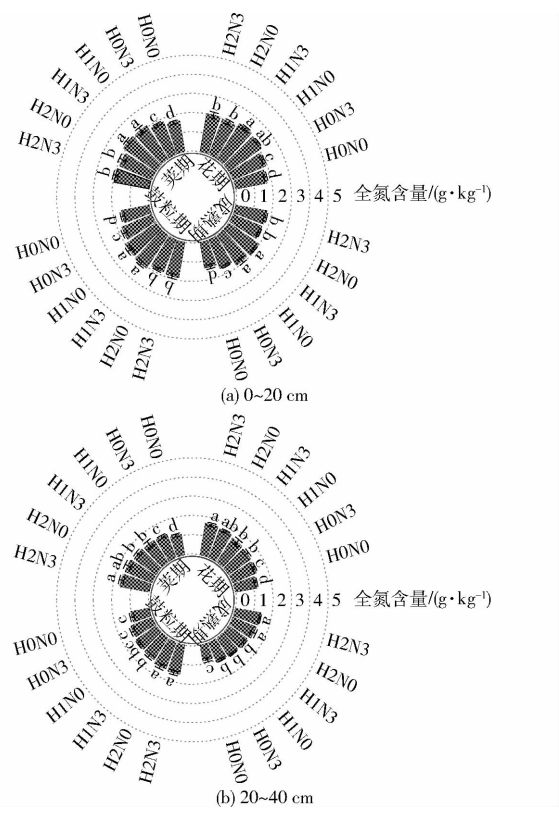


图 4 不同土层土壤全氮含量

Fig. 4 Total nitrogen content of soils in different soil layers

## 2.4 沼液配施生物炭对土壤有机碳的影响

如图 5 所示,大豆生育期内各处理土壤有机碳含量呈先升后降、成熟期后小幅回升趋势,并于花期达到峰值。生物炭施加深度显著影响土壤有机碳的垂直分布,浅施生物炭显著提高浅层土壤碳储量,深施生物炭不仅增加深层土壤碳储量,还显著提升0 ~ 40 cm 剖面总体碳储量。在 0 ~ 20 cm 土层,H1 和 H2 处理有机碳含量显著高于 H0 处理,分别提高 26.69% 和 19.42%;而在 20 ~ 40 cm 土层,H2 处理有机碳含量提升效果最为显著,H1 与 H2 处理较 H0 分别提高 18.87% 和 24.50%。此外,在相同生物炭施加深度下,施加沼液处理土壤有机碳含量普遍高于传统施肥处理。在 0 ~ 40 cm 土层,N3 处理

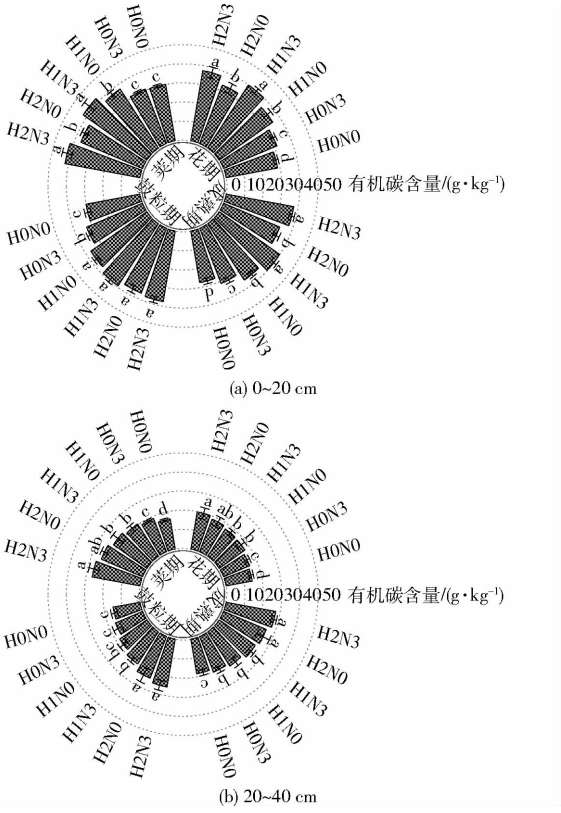


图 5 不同土层土壤有机碳含量

Fig. 5 Organic carbon content of soils in different soil layers

相较于 N0 处理有机碳含量平均增加 10.04%。其中,H2N3 处理表现最优,全土层有机碳含量较 H0N0 处理显著提升 30.42%。

### 2.5　沼液配施生物炭对植物 SPAD 值的影响

如图 6 所示，在大豆生育期内，各处理叶片 SPAD 值总体呈逐渐上升趋势。分析表明，深施生物炭与施加沼液均对 SPAD 值具有提升作用。整个生育期内，在相同施肥方式下，随着生物炭施加深度增加，SPAD 值增幅显著提升，H1 和 H2 处理 SPAD 值较 H0 处理分别增加 15.87%、29.71%。在相同生物炭施加深度下，施加沼液能进一步提高 SPAD 值，H1N3 处理较 H1N0 处理平均提高 12.25%，而 H2N3 处理较 H2N0 处理平均提高达 28.42%。H2N3 处理 SPAD 值较 H0N0 处理平均提高 39.89%。

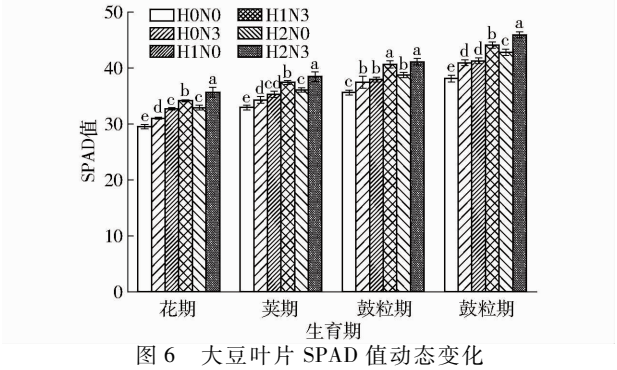


图 6　大豆叶片 SPAD 值动态变化

Fig. 6　Dynamic changes in SPAD values of soybean leaves

### 2.6　沼液配施生物炭对大豆光合特性的影响

如图 7 所示，在大豆生育期内，施加生物炭和沼液对叶片净光合速率、气孔导度及叶片瞬时水分利用效率均具有显著提升作用。整个生育期内，相同施肥方式下，H2 处理净光合速率和气孔导度显著高于 H0 和 H1 处理，分别提高 31.04%、21.22% 和 15.94%、11.47%。此外，N3 处理净光合速率与气孔导度较 N0 处理分别提升 9.26% 与 11.47%。其中，单独施加沼液对叶片水分瞬时利用效率无显著影响，但随着生物炭施加深度增加水分利用效率显著提升，H2N3 处理叶片水分瞬时利用效率较 H0N3 和 H1N3 分别提高 9.04% 与 19.88%。

### 2.7　沼液配施生物炭对大豆产量及构成要素的影响

由表 6 可知，各处理大豆单株荚数、单株粒数、百粒质量及产量均呈相似趋势。结果表明，生物炭施加深度和施加沼液能显著提高大豆产量构成要素。在相同施肥方式下，随着生物炭施加深度增加，大豆产量及各构成要素呈递增趋势。与 H0 处理相比，H1 和 H2 处理大豆产量提高 9.44%、16.77%，H2 处理增产幅度约为 H1 的 1.8 倍。同时，在相同生物炭施加深度下，沼液较常规施肥大豆产量提升幅度进一步增大。N3 处理比 N0 处理产量提高 7.28%。与 H0N0 处理相比，H2N3 处理产量及构成要素增幅最大，产量增加28.67%，单株荚数增加 33.3%，单株粒数增加 8.62%，百粒质量提高 8.45%。

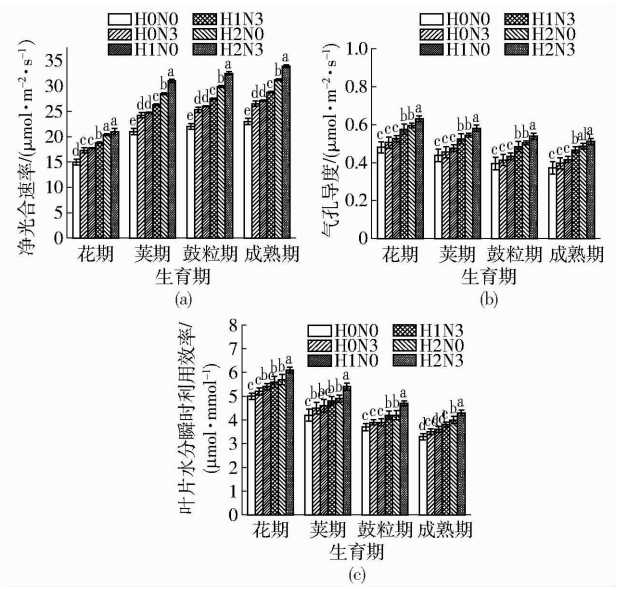


图 7　不同处理下净光合速率、气孔导度和叶片瞬时水分利用效率

Fig. 7　Net photosynthetic rate, stomatal conductance, and leaf instantaneous water use efficiency under different treatments

**表 6　不同处理对大豆产量及构成要素的影响**

**Tab. 6　Effect of different treatments on soybean yield and its components**

| 处理 | 单株荚数 | 单株粒数 | 百粒质量/g | 产量/(kg·hm⁻²) |
|---|---|---|---|---|
| H0N0 | 30$^{d}$ | 58$^{c}$ | 19.34$^{c}$ | 2 243.44$^{d}$ |
| H0N3 | 32$^{c}$ | 62$^{b}$ | 20.33$^{b}$ | 2 520.92$^{c}$ |
| H1N0 | 33$^{bc}$ | 61$^{b}$ | 20.67$^{b}$ | 2 521.74$^{c}$ |
| H1N3 | 36$^{b}$ | 63$^{a}$ | 21.31$^{a}$ | 2 685.06$^{b}$ |
| H2N0 | 37$^{b}$ | 61$^{b}$ | 21.89$^{a}$ | 2 670.58$^{b}$ |
| H2N3 | 40$^{a}$ | 63$^{a}$ | 22.91$^{a}$ | 2 886.66$^{a}$ |

注：同列数字后不同小写字母表示处理间差异显著（$p<0.05$）。

### 2.8　相关性分析

在大豆生育期内，土壤养分和大豆生理指标相关性如图 8（图中 * 表示处理间差异显著（$p<0.05$），** 表示差异极显著（$p<0.01$））所示。各土壤养分指标整体呈正相关。除 0～40 cm 铵态氮与 0～40 cm 有机碳相关性不显著外，铵态氮与其余养分均呈显著正相关；0～40 cm 硝态氮与其他土壤养分指标亦均呈显著正相关。有机碳与全氮相关系数为 0.69，表现为极显著正相关。同时，大豆生理指标与土壤养分同样表现出较强的正相关关系。气孔导度与各土壤养分指标呈显著正相关，特别是与 0～40 cm 硝态氮（0.93）相关性最高。此外，WUE 和 SPAD 值呈现与气孔导度相似的规律；同时，气孔导度和 WUE（0.91）以及净光合速率（0.84）均呈极

显著正相关;SPAD 值与 WUE(0.55)也呈现极显著正相关。

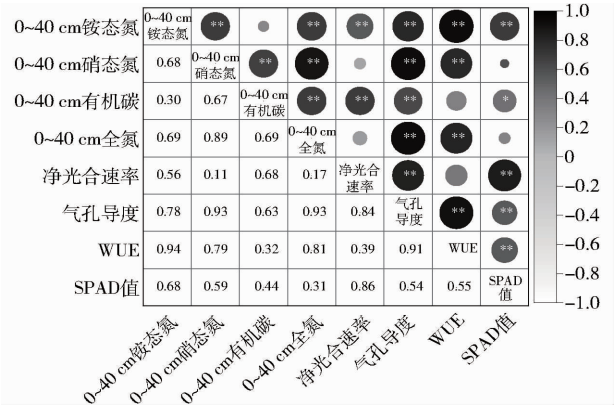


图 8 土壤养分和大豆生理指标的相关性分析

Fig. 8 Correlation analysis between soil nutrients and soybean physiological parameters

### 2.9 综合评价

表 7 为基于熵权 TOPSIS 模型计算的各处理综合评分。生物炭施加深度、沼液施用及其交互作用均对土壤养分、植物生理及产量指标产生显著影响。在相同施肥方式下,H2 处理相对贴近度高于 H1 和 H0 处理,分别平均高 0.147 和 0.434。在相同生物炭施加深度下,施加沼液能增加处理的相对贴进度,N3 处理贴进度较 N0 处理增加 0.339。H2N3 处理相对贴近度为 0.822,效应等级评定为“优”。

**表 7 不同处理贴合度和效应等级**

**Tab. 7 Fit and effect sizes of different treatment**

| 处理 | 正理想解距离 | 负理想解距离 | 相对贴近度 | 排序 | 效应等级 |
|---|---|---|---|---|---|
| H0N0 | 0.284 | 0.061 | 0.178 | 6 | 差 |
| H0N3 | 0.576 | 0.313 | 0.352 | 5 | 中 |
| H1N0 | 0.220 | 0.161 | 0.423 | 4 | 中 |
| H1N3 | 0.187 | 0.418 | 0.691 | 2 | 良 |
| H2N0 | 0.271 | 0.385 | 0.586 | 3 | 中 |
| H2N3 | 0.119 | 0.551 | 0.822 | 1 | 优 |

## 3 讨论

### 3.1 沼液配施生物炭对土壤养分的影响

土壤碳氮含量是衡量土壤肥力和养分供应能力的核心指标,二者通过耦合驱动土壤养分转化与循环过程。无机氮(铵态氮和硝态氮)是作物可直接吸收的主要氮源,微生物量氮作为活性氮库的重要组成,其形成与周转依赖有机碳提供的碳源和能量。本研究中,在相同施肥方式下,浅施生物炭显著提高耕层土壤铵态氮、硝态氮、微生物量氮和有机碳含量,说明其主要通过在耕层形成更强的养分保持与碳源累积效应,提升表层养分供给能力。该现象归因于生物炭在耕层集中分布后,其发达孔隙结构与表面官能团增强了对铵态氮等养分的吸附与离子交换缓冲能力,从而提高养分在耕层的滞留程度并降低随水分迁移造成的流失风险;同时,耕层有机碳含量的提升为活性氮库的形成与补给提供了底物与能量来源,进而表现为土壤微生物量氮的同步增加[25-28]。相比之下,深施生物炭在提升耕层养分水平的同时,对深层土壤的促进作用更为突出,表现为深层土壤全氮与有机碳增幅更大,且铵态氮、硝态氮及微生物量氮含量显著提高[29]。这说明增加施用深度可将吸附保持与碳库扩增的作用层位由耕层向深层延伸,从而在剖面尺度上扩大碳氮库容量并增强其稳定性。相关研究同样发现,生物炭深施更有利于提高剖面养分储量并改善土壤养分环境[30]。

与常规施肥相比,施用沼液显著提高了土壤无机氮、全氮及有机碳含量,表明沼液既可通过补充以铵态氮为主的速效氮直接增强氮素供给,又可通过输入可溶性有机物促进土壤碳库积累并支撑氮素持续转化,从而提升供肥能力与稳定性[31-33]。相关研究同样指出,沼液替代部分或全部化学氮肥可提高土壤养分水平,关键在于速效氮的即时补给与可降解有机物的持续输入共同作用,有利于维持供氮过程连续性[34]。本研究进一步表明,相较于单施生物炭沼液,深施生物炭配施沼液的交互作用对土壤养分提升更为显著。这主要是由于沼液提供的铵态氮与可溶性有机在生物炭孔隙与表面官能团位点发生富集与吸附,并由此形成具有缓冲释放特征的养分载体,从而降低速效氮的挥发与淋溶损失、延长有效滞留时间并提高剖面养分库容[35]。在深施条件下,该耦合效应的作用层位由表层向深层扩展,使深层土壤由相对低活性状态转变为可参与养分存储与供给的功能层,进而实现深层土壤资源的活化与剖面碳氮库的同步扩容。由此,沼液输入的养分被生物炭吸附并转化为更平缓的持续释放过程,使生育期内养分供给由短时高峰转向相对稳定的连续供给,从而在时间尺度上提高养分有效性。

### 3.2 沼液配施生物炭对作物生长生理的影响

作物生理生长是产量形成的基础,其中叶绿素水平与气体交换能力直接决定光合产物积累。氮素是叶绿素与光合酶系统的重要组成,其供应状态直接影响 SPAD 值,并通过调节光合能力与气孔行为反映在净光合速率和气孔导度等指标上。本研究发现,在相同施肥模式下,随生物炭施用深度增加,大豆净光合速率、气孔导度与水分利用效率显著提高,说明深施较浅施更有利于形成支撑光合作用的根区环境。其机理主要体现在 2 方面:①深施生物炭将

孔隙结构与表面作用形成的缓冲界面下移至 20 ~ 40 cm 土层，使根区水分与养分波动减小，叶片水势更易维持，从而在高蒸散阶段仍能保持较大的气孔开度并提升 $CO_2$ 扩散能力。②根区氮素供应更稳定，有利于叶绿素合成与维持，减弱氮素短期不足对光合系统的限制，最终表现为 SPAD 值与净光合速率同步提高[36]。相比之下，浅施生物炭对深层水分缓冲与养分供给稳定性的改善有限，植株更易出现气孔限制，从而抑制光合效率[37]。

施用沼液总体提高了 SPAD 值与光合参数，表明其提供的速效氮能够快速改善叶片氮营养并促进叶绿素形成，从而提升光合潜力[38]。在此基础上，深施生物炭配施沼液呈现显著的协同增效，主要是由于二者在根区形成了互补调控。生物炭为沼液中速效氮提供吸附缓冲与缓释平台，使氮素供给由短时集中转向更平缓连续，从而更稳定地支撑叶绿素水平与光合酶系统；同时，深施生物炭增强根区水分缓冲能力，使作物在午后高温等高蒸散条件下仍能维持较高气孔导度，保障 $CO_2$ 持续供应并减弱光合午休现象[39]。因此，深施生物炭配施沼液处理能够在生育期内同时维持叶片氮营养与气孔开放状态，实现净光合速率与水分利用效率的协同提升，为干物质积累与产量形成提供生理机制支撑。

### 3.3　沼液配施生物炭对作物产量及其构成要素的影响

作物产量形成是各生育阶段生长发育累积效应的最终体现，其形成根本上取决于土壤养分的持续、有效供应与光合产物积累。本试验结果表明，与常规处理相比，深施生物炭配施沼液显著提高了大豆产量，且产量构成要素整体呈协同优化趋势，表现为单株荚数、单株粒数及百粒质量同步增加。其根本原因在于，深层水肥耦合对生殖生长全过程起到分阶段调控作用：在生育前期，根区形成较为稳定的水肥环境，有利于花芽分化和胚珠形成，增加有效花荚数；在生育中后期，深层水肥供应相对平稳，可减少因水肥波动导致的花荚脱落，延缓叶片衰老，促进籽粒充分灌浆，从而使粒数与粒质量同步提升。陈泽林等[40]关于生物炭深层配施有机肥处理显著降低花荚脱落率的结果，也证实了深施生物炭配施沼液通过改善深层水肥条件优化籽粒发育环境的作用机理。

在养分利用层面，深施生物炭与沼液交互作用使养分供给更符合大豆不同生育阶段的需求变化。生物炭表面丰富的官能团及孔隙结构使其对沼液养分具有持续储存与缓慢供给的协同调控能力：施用初期，部分被吸附的铵态氮和有机碳可较快释放，满足营养生长期对速效养分的高需求，提升土壤瞬时供肥水平；随着生育进程推进，进入微孔或与表面电荷结合的养分以缓释方式逐步释放，从而维持作物中后期光合作用和籽粒灌浆所需的氮素供应。深施处理提高氮素利用率、并促进氮素在后期更多向籽粒分配，从氮素利用和分配角度支撑了深施生物炭配施沼液前期快供、后期缓释的时间匹配机制。

本研究从机理层面探讨了深施生物炭配施沼液对黑土土壤养分分布及大豆生长生理的调控效应，揭示其短期增效特征。但主要反映一个生育期内响应，生物炭在土壤中老化过程及其对养分保持与释放的长期影响尚未得到验证；同时，深施配施模式在干旱或多雨等不同气候年份下效应稳定性与适宜性仍不明确。后续需结合多年田间定位试验开展验证，以评价其长期效益、年际波动特征及推广适用范围。

## 4　结论

（1）生物炭施用显著提升黑土土壤碳氮库水平，且改良效应受施用深度影响显著。浅施主要改善耕层（0 ~ 20 cm）养分环境，深施可将养分提升效应向下扩展并增强 0 ~ 40 cm 土壤养分储存能力。生物炭与沼液配施产生协同增效，通过吸附缓冲与持续补给提高无机氮、微生物量氮与有机碳含量等。

（2）深施生物配施沼液显著提高大豆 SPAD 值、净光合速率、气孔导度与水分利用效率，并促进单株荚数、粒数与百粒质量的协同提升，最终实现显著增产。其增产效应主要源于根区水肥条件改善与养分供给持续性增强，从而在生育关键期稳定维持叶片光合功能，保障籽粒形成与灌浆过程顺利进行并提高产量形成效率。

（3）熵权 TOPSIS 综合评价结果表明，在同时考虑土壤养分状况、光合生理指标和产量及其构成要素等多维指标条件下，深施生物炭配施沼液处理综合得分最高，是本试验各处理方案中改善土壤养分环境、促进大豆生长发育并实现稳产增产的最优配置模式。

## 参　考　文　献

[1]　郭孟洁，李建业，李健宇，等. 实施 16 年保护性耕作下黑土土壤结构功能变化特征[J]. 农业工程学报，2021，37（22）：108 - 118.
GUO Mengjie，LI Jianye，LI Jianyu，et al. Changes of soil structure and function after 16-year conservation tillage in black soil

[J]. Transactions of the CSAE, 2021,37(22):108 – 118. (in Chinese)
[2] 苏浩, 吴次芳. 东北黑土区耕地系统变化机理[J]. 农业工程学报,2021,37(6):243 – 251.
SU Hao, WU Cifang. Mechanism of cultivated land system change in black soil areas of Northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2021,37(6):243 – 251. (in Chinese)
[3] 刘俊杰, 严晓斌, 张美怡, 等. 中国农作物秸秆资源产量分布及利用分析[J]. 农业资源与环境学报, 2025, 42(3): 751 – 760.
LIU Junjie, YAN Xiaobin, ZHANG Meiyi, et al. Analysis of yield distribution and utilization of crop straw resources in China [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2025,42(3):751 – 760. (in Chinese)
[4] 魏永霞, 肖敬萍, 王鹤,等. 施加生物炭对黑土区坡耕地改土培肥效应的持续影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 305 – 314.
WEI Yongxia, XIAO Jingping, WANG He, et al. Continual influences of applying biochar on soil improvements in sloping farmland of black soil region in Northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3):305 – 314. (in Chinese)
[5] AHLAWAT O P, KHIPPAL A, VENKATESH K, et al. Impact of different tillage and residue retention practices on soil nutrients, microbial community composition and grain yield of malt barley[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2024, 24(4): 7651 – 7668.
[6] 刘慧, 苏航, 温小艳, 等. 黑土区坡耕地生物炭应用模式综合效益研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 325 – 336.
LIU Hui, SU Hang, WEN Xiaoyan, et al. Comprehensive benefit of biochar application modes on slope farmland in black soil region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(7):325 – 336. (in Chinese)
[7] 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)
[8] 闫双堆, 郭探文, 韩莹, 等. 生物炭辅配硫酸铵对土壤氮素淋溶的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(16): 94 – 102.
YAN Shuangdui, GUO Tanwen, HAN Ying, et al. Effect of biochar combined with ammonium sulfate on nitrogen release performance in soil[J]. Transactions of the CSAE, 2024,40(16): 94 – 102. (in Chinese)
[9] LIU L Y, ZHENG X Q, PENG C F, et al. Driving forces and future trends on total nitrogen loss of planting in China[J]. Environmental Pollution, 2020, 267: 115660.
[10] SHAN A, PAN J, KANG K J, et al. Effects of straw return with N fertilizer reduction on crop yield, plant diseases and pests and potential heavy metal risk in a Chinese rice paddy: a field study of 2 consecutive wheat-rice cycles[J]. Environmental Pollution, 2021, 288: 117741.
[11] 李彩斌,张久权,何轶. 不同类型土壤上施用生物炭对烤烟氮钾养分积累的影响[J]. 农学学报,2023,13(9):54 – 62.
LI Caibin, ZHANG Jiuquan, HE Yi. Effects of biochar application to three types of soils on the uptake of nitrogen and potassium in flue-cured tobacco[J]. Journal of Agriculture, 2023,13(9):54 – 62. (in Chinese)
[12] 郭树芳, 翟丽梅, 王洪媛, 等. 有机物料添加对菜地土壤氮素转化和温室气体排放的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024 (10): 26 – 34.
GUO Shufang, ZHAI Limei, WANG Hongyuan, et al. The effect of organic material addition on vegetable soil nitrogen transformation and greenhouse gases emissions[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2024(10):26 – 34. (in Chinese)
[13] 李瑞, 张巡, 杨阳, 等. 沼液替代化学氮肥对滨海稻田土壤有机氮和细菌群落的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(8): 1364 – 1375.
LI Rui, ZHANG Xun, YANG Yang, et al. Effects of substituting biogas slurry for chemical nitrogen fertilizer on soilorganic nitrogen and bacterial communities in coastal paddy fields[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022,28(8):1364 – 1375. (in Chinese)
[14] 袁晶晶, 齐学斌, 赵京, 等. 生物炭配施沼液对土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(1): 80 – 86.
YUAN Jingjing, QI Xuebin, ZHAO Jing, et al. The effect of biochar amendment and slurry application on soil aggregation and organic carbon distribution[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022,41(1):80 – 86. (in Chinese)
[15] NZILA A. Biodegradation of high-molecular-weight polycyclic aromatic hydrocarbons under anaerobic conditions: overview of studies, proposed pathways and future perspectives[J]. Environmental Pollution, 2018, 239: 788 – 802.
[16] 王志刚, 韩雪, 刘运平, 等. 沼液和秸秆还田对土壤氮磷淋溶的影响[J]. 中国农学通报, 2024, 40(6): 107 – 114.
WANG Zhigang, HAN Xue, LIU Yunping, et al. Effects of biogas slurry and straw returning on soil nitrogen and phosphorus leaching[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024,40(6):107 – 114. (in Chinese)
[17] ZIRKLER D, PETERS A, KAUPENIOHANN M. Elemental composition of biogas residues: variability and alteration during anaerobic digestion[J]. Biomass and Bioenergy, 2014, 67: 89 – 98.
[18] 郑学博, 樊剑波, 周静,等. 沼液化肥配施对红壤旱地土壤养分和花生产量的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 675 – 684.

ZHENG Xuebo, FAN Jianbo, ZHOU Jing, et al. Effects of combined application of biogas slurry and chemical fertilizer on soil nutrients and peanut yield in upland red soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016,53(3):675 – 684. (in Chinese)

[19] 朱彩丽, 黄宝灵, 黄娟萍, 等. 广西 3 种珍贵树种人工林土壤养分状况及酶活性比较[J]. 南方农业学报, 2015, 46 (11): 1953 – 1957
ZHU Caili, HUANG Baoling, HUANG Juanping, et al. Comparison on soil nutrient status and enzyme activity in 3species of rare trees in Guangxi[J]. Journal of Southern Agriculture, 2015,46(11):1953 – 1957. (in Chinese)

[20] 潘占东, 蔡雪梅, 蔡立群, 等. 田间老化生物质炭对黄土高原旱作农田土壤有机氮组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 43(12): 2219 – 2231.
PAN Zhandong, CAI Xuemei, CAI Liqun, et al. Effects of field-aged biochar on soil organic nitrogen fractionsin dry farmland of Loess Plateau[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023,43(12):2219 – 2231. (in Chinese)

[21] 高飞, 陈素贤, 杜晓玉, 等. FOSS Kjeltec 8400 全自动凯式定氮仪测定土壤全氮方法探讨[J]. 天津农业科学, 2022, 28(9): 76 – 80.
GAO Fei, CHEN Suxian, DU Xiaoyu, et al. FOSS Kjeltec 8400 automatic Kjeldahl nitrogen determinator for determination of total nitrogen in soil[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2022,28(9):76 – 80. (in Chinese)

[22] 郑云珠,孙树臣. 秸秆生物炭和秸秆对麦玉轮作系统土壤养分及作物产量的影响[J]. 中国农业科技导报,2023,25(2): 152 – 162.
ZHENG Yunzhu, SUN Shuchen. Effects of straw biochar and straw on soil nutrients and crop yield in wheat-maize rotation system[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023,25(2):152 – 162. (in Chinese)

[23] 姜浩, 陈鹏, Shehakk, 等. 碳同位素表征干旱条件下大豆水氮利用效率[J]. 大豆科学, 2018, 37(6): 906 – 914..
JIANG Hao, CHEN Peng, Shehakk, et al. Use efficiency of water and nitrogen of soybean with water stress by stable carbon isotope discrimination[J]. Soybean Science, 2018,37(6):906 – 914. (in Chinese)

[24] 姜芸, 王军, 滕浩, 等. 基于 TOPSIS 模型的典型黑土区耕地质量评价及土壤侵蚀耦合协调分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39 (12): 82 – 94.
JIANG Yun,WANG Jun,TENG Hao,et al. Coupling coordination analysis of the quality evaluation of cultivated land and soil erosion in typical black soil areas using TOPSIS method[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(12): 82 – 94. (in Chinese)

[25] 殷大伟, 金梁, 郭晓红,等. 生物炭基肥替代化肥对砂壤土养分含量及青贮玉米产量的影响[J]. 吉林农业科学, 2019, 44(4): 19 – 24,88.
YIN Dawei,JIN Liang,GUO Xiaohong,et al. Effects of biochar based fertilizer on nutrient content of sandy loam soil and yield of silage maize[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2019, 44(4): 19 – 24,88. (in Chinese)

[26] 李开钰, 宋理洪, 张龚, 等. 生物质炭施用量与频率对黄壤养分和关键酶活性的影响[J]. 环境科学, 2025, 46(2): 1065 – 1075.
LI Kaiyu, SONG Lihong, ZHANG Gong,et al. Effects of biochar application amount and frequency on yellow soil nutrients and keyenzyme activities[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2025,46(2):1065 – 1075. (in Chinese)

[27] 陈明明, 刘伟伟, 梅春歌, 等. 钙镁型秸秆生物炭肥缓释性能及其对玉米生长的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(16): 62 – 70.
CHEN Mingming, LIU Weiwei, MEI Chunge, et al. Effects of Ca/Mg-enriched biochar fertilizer on slow-release performance and maize growth[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(16): 62 – 70. (in Chinese)

[28] 魏永霞, 石国新, 冯超,等. 黑土区施加生物炭对土壤综合肥力与大豆生长的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 285 – 294.
WEI Yongxia, SHI Guoxin, FENG Chao, et al. Effects of applying biochar on soil comprehensive fertility and soybean growth in black soil area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 285 – 294. (in Chinese)

[29] 袁天佑, 王超, 吴孟孟,等. 两种耕作方式下生物炭用量对潮土肥力及小麦产量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2025 (12):1 – 9.
YUAN Tianyou,WANG Chao,WU Mengmeng, et al. Effects of biochar on the fertility of fluvo-aquic soil and wheat yield under two tillage modes[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2025(12): 1 – 9. (in Chinese)

[30] 陈海情, 张凯, 黄超, 等. 耕作方式和生物炭用量对冬小麦产量、土壤氮碳的影响[J]. 麦类作物学报, 2025, 45(2): 224 – 233.
CHEN Haiqing, ZHANG Kai,HUANG Chao, et al. Effects of tillage methods and biochar application rates on yield of winter wheat and nitrogen and carbon status in soil[J]. Journal of Triticeae Crops, 2025,45(2):224 – 233. (in Chinese)

[31] 勾芒芒, 屈忠义, 王凡, 等 生物炭施用对农业生产与环境效应影响研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 1 – 12.
GOU Mangmang, QU Zhongyi, WANG Fan, et al. Progress in research on biochar affecting soil-water environment and carbon sequestration-mitigating emissions in agricultural fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(7):1 – 12. (in Chinese)

[32] 况欣宇, 刘文军,廖娜, 等. 基于生物炭施用的土壤改良研究进展[J]. 新疆环境保护, 2020(2): 12 – 23.
KUANG Xinyu, LIU Wenjun, LIAO Na, et al. Research advances in biochar application on soil improvement[J].

Environmental Protection of Xinjiang, 2020(2):12 – 23. (in Chinese)
[33] 何振嘉.生物炭对土壤理化特性及作物产量的影响[J].粮食科技与经济,2020,45(5):73 – 75.
HE Zhenjia. Effects of microorganisms on soil physical and chemical characteristics and crop yield[J]. Grain Technology and Economy,2020,45(5):73 – 75. (in Chinese)
[34] 杨丽, 王劲松, 董二伟, 等. 长期施用秸秆生物炭对土壤养分及作物生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(2): 62 – 70.
YANG Li, WANG Jinsong, DONG Erwei, et al. Effects of long-term application of straw biochar on soil nutrient and crop growth[J]. Agricultural Research in the Arid Areas 2024,42(2):62 – 70. (in Chinese)
[35] 钟行杰.生物炭与化肥配施对大豆田土壤理化特征及产质量的影响[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2023.
ZHONG Xingjie. Effects of biochar and chemical fertilizer application on soil physicochemical characteristics and yield quality in soybean[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University,2023. (in Chinese)
[36] 王春雪, 岳学文, 史亮涛, 等. 元谋干热河谷青枣光合及产量对不同比例有机肥与生物炭配施的响应[J]. 热带作物学报, 2022, 43(1): 128 – 136.
WANG Chunxue, YUE Xuewen, SHI Liangtao, et al. Response of photosynthesis and yield of *Zizyphus mauritiana* lam. to different proportion of organic fertilizer with biochar application in Yuanmou dry-hot valley[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022,43(1):128 – 136. (in Chinese)
[37] 杨爱峥, 李宏宇, 王秋菊, 等. 减氮配施生物炭对苏打盐碱土壤环境与大豆生长特性的影响[J]. 农业机械学报, 2025, 56(8): 602 – 613.
YANG Aizheng, LI Hongyu, WANG Qiuju, et al. Effect of nitrogen reduction with biochar application on soda saline soil environment and growth characteristics of soybean[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(8):602 – 613. (in Chinese)
[38] 王磊,任树梅,毕勇刚,等. 土壤水分及有机肥料对番茄叶片光合特性及叶绿素含量影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(2): 66 – 69.
WANG Lei,REN Shumei,BI Yonggang, et al. Effects of soil water and organic manure to the photosynthesis and chlorophyll of tomato in the greenhouse[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(2): 66 – 69 (in Chinese)
[39] 闫春娟, 王昌陵, 孙旭刚, 等. 不同时期水分胁迫对大豆根系特性及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2024(8): 43 – 52.
YAN Chunjuan, WANG Changling, SUN Xugang, et al. Effect of water stress in different phases on root characteristics and yield of soybean[J]. Water Saving Irrigation, 2024(8):43 – 52. (in Chinese)
[40] 陈泽林, 林逸帆, 陈国豪,等. 饲用玉米氮素分配与根系特征对不同生物炭施加深度的响应[J]. 草业科学, 2024, 41(1): 143 – 150.
CHEN Zelin, LIN Yifan, CHEN Guohao, et al. Response of nitrogen distribution and roots of forage maize to biochar application at different depths[J]. Pratacultural Science, 2024,41(1):143 – 150. (in Chinese)

(上接第 319 页)

[29] TUNINETTI M, TAMEA S, D'ODORICO P, et al. Global sensitivity of high-resolution estimates of crop water footprint[J]. Water Resources Research, 2015, 51(10): 8257 – 8272.
[30] ROSA L, RULLI M C, DAVIS K F, et al. Closing the yield gap while ensuring water sustainability[J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(10): 104002.
[31] 刘钰, 汪林, 倪广恒, 等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 6 – 12.
LIU Yu, WANG Lin, NI Guangheng, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 6 – 12. (in Chinese)
[32] LUO J, ZHANG H, QI Y, et al. Balancing water and food by optimizing the planting structure in the Beijing – Tianjin – Hebei region, China[J]. Agricultural Water Management, 2022, 262: 107326.
[33] ZHAO J, ZHANG X, YANG Y, et al. Alternative cropping systems for groundwater irrigation sustainability in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2021, 250: 106867.
[34] TI J, YANG Y, PU L, et al. Ecological compensation for winter wheat fallow and impact assessment of winter fallow on water sustainability and food security on the North China Plain[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 328: 129431.
[35] ZHANG F, CUI N, GUO S, et al. Irrigation strategy optimization in irrigation districts with seasonal agricultural drought in southwest China: a copula-based stochastic multiobjective approach[J]. Agricultural Water Management, 2023, 282: 108293.
[36] GONG X, ZHANG H, REN C, et al. Optimization allocation of irrigation water resources based on crop water requirement under considering effective precipitation and uncertainty[J]. Agricultural Water Management, 2020, 239: 10624.