

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.05.050

东北黑土区秸秆和生物炭混施对土壤氮素与大豆氮素利用的影响

杨爱峥¹ 迟浩诚¹ 王秋菊² 王小芳¹ 沙 炎¹ 李 茉¹

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

摘要: 为探究秸秆和生物炭混施还田对土壤氮素含量、大豆氮素利用率和产量的影响,采用裂区试验设计,设置对照(CK,无还田)、秸秆全量还田(SF)、生物炭和秸秆混施还田(BS)3种还田方式,并设置75 kg/hm²(N1)、60 kg/hm²(N2)和45 kg/hm²(N3)3种施氮量处理,于2022—2023年开展2年大豆田间试验。结果表明,秸秆和生物炭混施能缓解施氮量减少对土壤氮素含量和大豆植株生长的不利影响,且对N2处理影响更显著。与CK和SF处理相比,BS处理促进土壤铵态氮和硝态氮含量分别增加7.58%~78.08%和19.02%~95.56%,显著提升大豆净光合速率和氮素利用效率,提高大豆产量38.62%~60.97%。此外,基于熵权TOPSIS模型的综合评价结果表明,BSN2处理综合表现最优,在施氮量60 kg/hm²条件下,其两年平均产量为3 058.48 kg/hm²,氮肥吸收利用效率为0.99,农学利用效率、氮素表观回收率和氮素响应指数分别为9.34 kg/kg、0.98和2.18。研究可为东北黑土区氮肥管理和秸秆资源化利用提供科学依据。

关键词: 秸秆; 生物炭; 土壤氮素含量; 氮素利用率; 大豆产量

中图分类号: S565.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)05-0523-11

OSID:



Impact of Combined Straw and Biochar Application on Soil Nitrogen and Soybean Nitrogen Use Efficiency Dynamics in Northeast China's Black Soil Region

YANG Aizheng¹ CHI Haocheng¹ WANG Qiuju² WANG Xiaofang¹ SHA Yan¹ LI Mo¹

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
2. Heilongjiang Province Black Soil Protection and Utilization Research Institute, Harbin 150030, China)

Abstract: Aiming to investigate the effects of combined straw and biochar application on soil nitrogen pools, crop yield, and nitrogen utilization in the black soil region of Northeast China, a split-plot experimental design was employed, incorporating three field return methods—control (CK, no return), full straw return (SF), and combined biochar and straw return (BS)—along with three nitrogen application rates: 75 kg/hm² (N1), 60 kg/hm² (N2), and 45 kg/hm² (N3). The results showed that the mixed application of straw and biochar alleviated the unfavorable impression of reduced nitrogen application on soil nitrogen content and soybean plant growth, and the effects were more pronounced at N2 nitrogen application. Compared with CK and SF treatments, BS treatment promoted the increase of soil ammonium nitrogen and nitrate nitrogen contents by 7.58% ~ 78.08% and 19.02% ~ 95.56%, respectively, which significantly enhanced the net photosynthetic rate and nitrogen utilization efficiency of soybean, and led to the increase of soybean yield by 38.62% ~ 60.97%. Comprehensive evaluation using the entropy-weighted TOPSIS model identified the BSN2 treatment as the most effective, achieving an average two-year yield of 3 058.48 kg/hm² with a nitrogen application rate of 60 kg/hm². This treatment also recorded high nitrogen use efficiency (0.99), agronomic efficiency (9.34 kg/kg), nitrogen recovery rate (0.98), and nitrogen response index (2.18). These findings can provide a scientific basis for optimizing nitrogen fertilizer management and enhancing straw utilization in Northeast China's black soil region.

Key words: straw; biochar; soil nitrogen content; nitrogen utilization; soybean yield

收稿日期: 2024-12-11 修回日期: 2025-01-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1500600)、国家自然科学基金项目(52222902、52379036)、黑龙江省自然科学基金项目(YQ2024E001、LH2022E010)、黑土地保护与利用全国重点实验室(筹)开放基金项目(2023HTDGZ-KF-06)和东北农业大学“学术骨干”基金项目(21XG47)

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

0 引言

东北黑土区是我国重要的商品粮生产基地,其土壤质量对保障我国粮食安全至关重要^[1]。然而,由于长期高强度利用,导致土壤严重退化^[2]。此外,为了追求持续高产,过量施用氮肥,不仅增加农业生产成本,更导致土壤氮素失衡、土壤酸化和盐碱化等问题^[3]。因此,探索有效的土壤改良方法,提高氮肥利用效率、减少氮肥投入,已成为黑土地提质增产亟待解决的问题。

我国农作物秸秆资源丰富,主要作物秸秆产量从2003年的 3.82×10^8 t增加到2022年的 6.57×10^8 t^[4]。然而,秸秆的不合理处置不仅造成农业面源污染,而且秸秆离田导致土壤有机质大量流失,严重影响土壤生产力及粮食安全^[5]。秸秆还田不仅可以有效减少焚烧带来的污染,还能将秸秆转化为土壤肥料,提升养分含量,改善土壤结构,增加作物产量,促进农业可持续发展。WU等^[6]研究发现,秸秆还田可以提升土壤疏松度和通气性,加速氮素分解、转化与循环,可减少氮肥用量10%~20%,提高氮肥利用效率。张天尧等^[7]研究发现,在秸秆还田条件下,我国主要粮食作物氮肥利用率和氮肥偏生产力的效应值分别增加10.0%和6.14%,极大降低农业生产成本和环境污染风险。鲁悦等^[8]研究发现,秸秆还田显著提高作物净光合速率和气孔导度,促进作物干物质质量积累和产量提升。然而,在秸秆分解的早期阶段会消耗土壤中的氮,易出现与作物幼苗争夺土壤中速效氮素的问题,存在降低粮食产量的风险^[9]。同时,秸秆本身携带大量的细菌和虫卵,可能引发病虫害^[10]。因此,如何高效利用秸秆资源,改善土壤氮素供应能力,提升氮肥利用效率,从而显著提高作物产量,已成为亟需深入研究和解决的关键问题。

生物炭是通过高温热解有机物得到的一种高稳定性富碳物质,具有良好的吸附能力和较大的比表面积,能有效改善土壤的理化性质。王舒等^[11]研究

发现,生物炭还田有助于提高土壤有机碳含量,增加大团聚体比例,提升土壤氮素含量,促进作物增产。张晓敏等^[12]研究表明,施加生物炭能显著提高作物叶片净光合速率,增幅达5.71%~20.64%,促进作物干物质积累和产量提升。然而,制备生物炭成本高,需要消耗大量人力和能源,极大限制了推广应用。此外,过量施加生物炭可能会对土壤产生负效应。BORCHARD等^[13]研究发现,当生物炭施用量超过土壤质量的20%时,土壤透水性降低,从而对植物生长产生负面影响。同时,DING等^[14]研究发现,采用有机肥、秸秆和生物炭混施能显著提高作物叶片氮素利用效率,促进作物生长和产量。因此,合理控制生物炭施用量,采用生物炭和秸秆混施模式,为提高土壤肥力、氮肥利用效率和作物产量提供了一种可行途径。

综上,目前秸秆或生物炭单独应用对氮肥利用效率和作物产量影响的研究较多。然而,关于秸秆与生物炭混合施用对黑土区土壤氮素利用及作物产量影响的研究仍较少。因此,本文以松嫩平原黑土为研究对象,在不同施氮量下,开展秸秆和生物炭混施还田的氮肥优化试验,旨在系统分析其对大豆光合特性、产量性状、氮肥利用效率及土壤氮素含量的影响,为黑土区农业秸秆和生物炭资源高效利用、氮肥优化管理及农业可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况与试验材料

本试验于2022—2023年在黑龙江省哈尔滨市东北农业大学向阳试验基地(45°01'N,126°02'E)进行。该试验基地位于松嫩平原中部,平均海拔162 m。该地区属于温带大陆性季风气候,季节性变化明显,冬春季寒冷干燥,夏季温暖多雨,年平均气温3.4℃,无霜期142 d,多年平均降雨量563.2 mm,蒸发量796 mm,降雨主要集中在5—9月。试验周期内日降雨量和气温动态变化见图1。供试土壤为

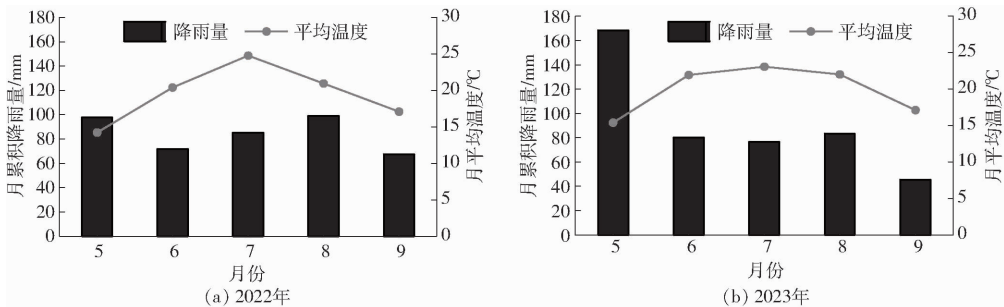


图1 2022—2023年降雨量和气温

Fig.1 Rainfall and temperature during 2022—2023

黑壤土,供试作物为大豆,品种为“黑农 48 号”,试验所用秸秆为玉米秸秆,生物炭由玉米秸秆在厌氧条件下 500℃ 高温分解而成,各试验材料基本理化性质见表 1。

表 1 试验材料基本理化性质

Tab.1 Basic physical and chemical properties of test materials

土壤参数	容重/ (g·cm ⁻³)	总氮质量比/ (g·kg ⁻¹)	硝态氮质量比/ (mg·kg ⁻¹)	铵态氮质量比/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷质量比/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾质量比/ (mg·kg ⁻¹)
数值	1.4	0.7	22.7	12.3	18.6	117.6
秸秆参数	密度/(g·cm ⁻³)	pH 值	碳氮比	氮质量分数/%	磷质量分数/%	钾质量分数/%
数值	0.1	5.8	78/1	0.9	0.2	1.3
生物炭参数	粒径/mm	碳质量分数/%	总氮质量分数/%	硫质量分数/%	氢质量分数/%	灰分质量分数/%
数值	1.5~2.0	70.38	1.53	0.78	1.68	31.8

1.2 试验设计

采用裂区试验设计,设置施氮量(参考当地水平设置梯度)和还田方式两个因素。主区为不同还田方式,设置 3 个水平:对照处理(CK,无还田处理)、秸秆还田(SF,秸秆施用量设置为 40 t/hm²^[15])和生物炭与秸秆等碳量混施^[16](BS,秸秆施用量设置为 20 t/hm²,秸秆/生物炭产率约 35%,20 t/hm²秸秆经热解后生成的生物炭产量为 6 t/hm²^[17])。由于生物炭生产成本高,过量施加生物炭对土壤环境和大豆产量将产生负面作用,本试验不设计将所有秸秆转换为生物炭还田处理。副区为施氮量,设置 3 个水平:常规施肥 75 kg/hm²(N1)、60 kg/hm²(N2)和 45 kg/hm²(N3)。试验共计 9 个处理,每个处理 3 次重复,具体试验设计方案见表 2。试验小区规格为 40 m²(5 m×8 m),每个小区之间有 1~2 m 的缓冲区,以避免产生边际效应。大豆行距为 50 cm,株距为 10 cm,播种深度为 5 cm,每穴播 2 粒。作物田间管理措施与当地农业生产一致。分别于 2022 年 5 月 7 日和 2023 年 5 月 9 日播种大豆,2022 年 9 月 25 日和 2023 年 9 月 28 日收获大豆。本试验选取 4 个大豆生育期开展监测,分别为苗期、开花结荚期、鼓粒期和成熟期。

表 2 秸秆、生物炭及氮肥施用量

Tab.2 Straw, biochar and nitrogen fertilizer application rate

处理	秸秆用量/ (t·hm ⁻²)	生物炭用量/ (t·hm ⁻²)	氮肥用量/ (kg·hm ⁻²)
CKN1	0	0	75
CKN2	0	0	60
CKN3	0	0	45
SFN1	40	0	75
SFN2	40	0	60
SFN3	40	0	45
BSN1	20	6	75
BSN2	20	6	60
BSN3	20	6	45

1.3 测定指标

1.3.1 土壤氮素含量

在大豆苗期、开花结荚期、鼓粒期和成熟期,利用五点取样法采集各试验小区 0~20 cm 土壤样本,研磨过 0.15 mm 筛待用。土壤铵、硝态氮含量采用 KCl 浸提-靛酚蓝比色法和紫外分光光度法测定,采用凯氏定氮法测定土壤总氮含量^[18]。

1.3.2 大豆光合特性

在大豆开花结荚期,采用 LI-6400XT 型便携式光合仪(LI-COR 公司,美国)测定植株光合速率和气孔导度。选择晴朗无云的天气测定大豆叶片光合特性,测定时每个处理选择生长及受光方向一致的主茎倒三叶,取 3 片叶子的平均值作为最终结果。

1.3.3 大豆产量及产量构成要素

大豆成熟时,随机选择小区中 5 个植株计算产量构成因素(单株荚数、百粒质量和单株粒数)。每小区按对角线法 3 点取样,每点 1 m²。秸秆和籽粒放入干燥箱在 85℃ 下干燥,测量大豆干物质质量^[19]。

1.3.4 大豆氮素相关指标及计算

在大豆成熟期取其地上部分,干燥粉碎后采用 H₂SO₄-H₂O₂消煮法和 AA3 型流动分析仪测定秸秆和籽粒中的全氮含量,并计算植株氮素累积量。

大豆氮素吸收量(NU)计算式为^[20]

$$N_U = G_Y G_N + S_Y S_N \tag{1}$$

式中 N_U ——氮素吸收量,kg/hm²
 G_Y ——大豆籽粒产量,kg/hm²
 G_N ——大豆籽粒氮含量,%
 S_Y ——大豆秸秆产量,kg/hm²
 S_N ——大豆秸秆氮含量,%

氮肥利用率(NUE)为大豆利用土壤中氮进行生长的能力,计算式为

$$NUE = \frac{G_Y G_N}{N} \tag{2}$$

式中 N ——施氮量,kg/hm²

氮素农学利用率 (NAE, kg/kg) 为产量与氮供应量的比率, 计算式为

$$NAE = \frac{G_Y - G_{Y0}}{N}$$

(3)

式中 G_{Y0} ——未施肥地块大豆籽粒产量, kg/hm²

氮响应指数 (NRI) 为作物对所施用氮肥响应的可能性, 计算式为

$$NRI = \frac{G_Y}{G_{Y0}}$$

(4)

氮素表观回收率 (NAR) 为作物吸收可用土壤氮的潜力, 计算式为

$$NAR = \frac{N_{U1} - N_{U2}}{N}$$

(5)

式中 N_{U1} ——试验区氮素吸收量, kg/hm²

N_{U2} ——对照区氮素吸收量, kg/hm²

1.3.5 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氮素含量和大豆氮素利用率的影响^[21]。不同处理综合评价指标类型如表 3 所示。效应评价等级如表 4 所示。

表 3 不同处理综合评价指标类型

Tab.3 Types of indicators for comprehensive evaluation of different treatments

指标类别	评价指标	指标类型
土壤氮素指标	铵态氮含量	极大型
	硝态氮含量	极大型
	土壤全氮含量	极大型
	土壤硝态氮迁移率	极小型
植株氮素指标	籽粒氮含量	极大型
	秸秆氮含量	极大型
	植株氮素吸收总量	极大型
植株生长指标	光合速率	极大型
	气孔导度	极大型
	籽粒产量	极大型
	单株荚数	极大型
	单株粒数	极大型
	百粒质量	极大型
产量指标	籽粒干物质量	极大型
	秸秆干物质量	极大型
	NAR	极大型
	NUE	极大型
	NAE	极大型
	NRI	极大型

1.4 数据统计与分析

采用 Microsoft Excel 2020 进行数据整理, SPSS 19 进行显著性分析和相关性分析, 显著水平为 0.05。利用 Origin 2021 进行绘图。

表 4 效应评价标准

Tab.4 Effectiveness evaluation criteria

相对贴进度	效应评价等级
0.8 ~ 1.0	优
0.6 ~ 0.8	良
0.3 ~ 0.6	中
0 ~ 0.3	差

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤氮素的影响

由图 2(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同)可知,各处理土壤铵态氮、硝态氮、全氮含量呈现随大豆生育期变化的规律性特征。大豆苗期土壤铵态氮含量最高,随大豆生育期的推进逐渐降低,而土壤硝态氮与全氮含量则在苗期最低,至鼓粒期达到峰值后迅速下降。硝态氮与全氮含量在年际间无显著差异,但 SF 和 BS 处理在第 2 年显著提高土壤铵态氮含量,增幅分别为 12.85% 和 14.88%。与 SF 处理相比,BS 处理显著提升了土壤铵态氮、硝态氮和全氮含量,增幅分别为 25.46%、30.46% 和 20.77%。此外,3 种土壤氮素含量随施氮量减少而降低,但氮肥与生物炭和秸秆的交互作用显著缓解了氮素波动,3 种氮素指标平均波动幅度为 19.32%,明显低于 CK(43.41%) 和 SF(62.96%)。在 N3 处理下,BS 处理土壤氮素含量增幅最大,相较 CK 和 SF 分别提高 51.91% 和 49.71%,显著优于 N1(26.41% 和 18.74%) 和 N2(36.94% 和 34.48%)。

2.2 不同处理对大豆光合特性的影响

如图 3 所示,各处理间大豆开花结荚期净光合速率和气孔导度的年际变化趋势基本一致。在相同施氮量条件下,BS 处理大豆净光合速率和气孔导度显著高于 CK 和 SF 处理,分别提高 29.97%、10.21% 和 17.98%、4.39%。此外,在相同还田方式条件下,随着施氮量的降低,各处理大豆净光合速率均呈现显著下降趋势。其中,CK 和 SF 处理下净光合速率降幅分别为 28.52% 和 29.64%,而 BS 处理降幅为 15.87%,显著减少。在 N2 和 N3 施氮水平下,BS 处理大豆净光合速率较 CK 和 SF 处理分别提高 37.18%、23.00% 和 34.09%、23.13%,增加幅度相近且显著高于 N1 施氮水平下的提升幅度(20.00% 和 10.54%)。

2.3 不同处理对大豆干物质质量的影响

如图 4(图中不同大写字母表示年际差异显著性,不同小写字母表示同一年内各处理差异显著性,下同)所示,在相同还田方式下,随着施氮量的降

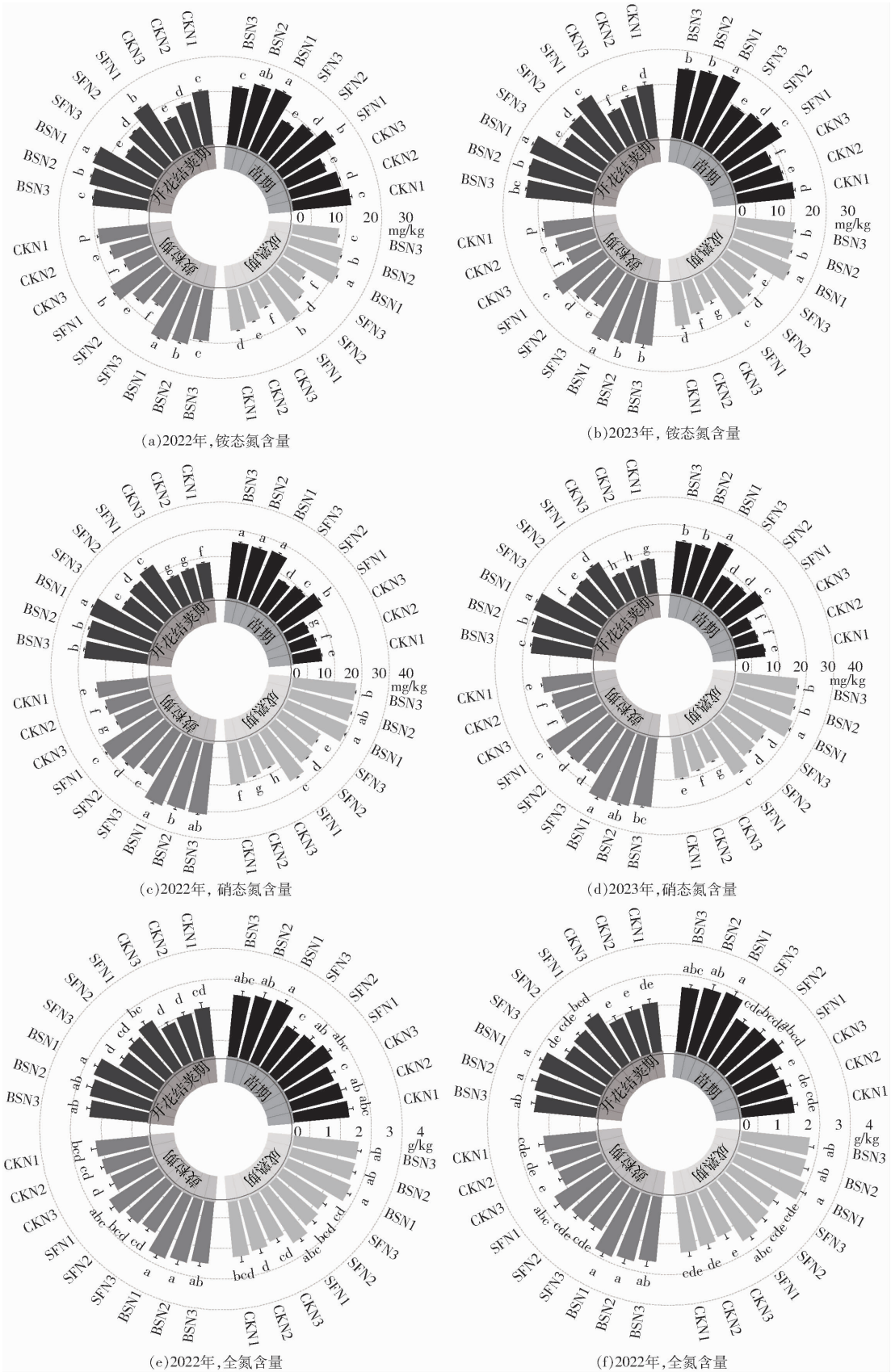


图 2 2022—2023 年不同处理土壤铵态氮、硝态氮、全氮含量

Fig. 2 Ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, and total nitrogen content of different treatment soils in 2022—2023

低,CK 和 SF 处理大豆干物质质量下降幅度分别为 23.21% 和 36.19%,显著高于 BS 处理下降幅度 (16.73%)。在相同施氮水平下,与 CK 和 SF 处理

相比,BS 处理大豆干物质质量分别提高 18.71% ~ 24.03%和 5.28% ~ 18.49%。此外,与第 1 年相比,BSN1、BSN2、SFN1 和 SFN2 处理第 2 年大豆干物质质量

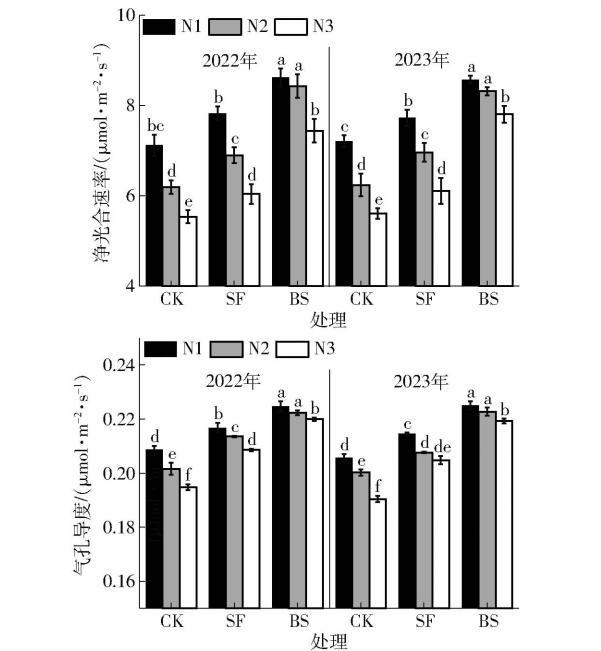


图3 2022—2023年不同处理大豆开花结荚期净光合速率和气孔导度

Fig.3 Net photosynthetic rate and stomatal conductance at flowering and podding stages of soybean in different treatments in 2022—2023

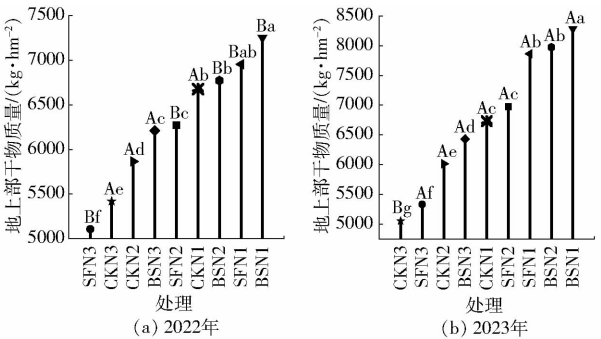


图4 2022—2023年不同处理大豆干物质质量

Fig.4 Dry matter mass of soybean in different treatments in 2022—2023

分别显著增加14.22%、17.76%、13.08%和7.27%，而CKN3处理第2年干物质质量显著下降7.23%，其他处理干物质质量未表现出显著的年际变化。

2.4 不同处理对大豆产量及其构成因素的影响

由表5可知，各处理大豆单株荚数、单株粒数、百粒质量和产量的变化趋势基本一致。在相同还田方式条件下，随着施氮量的减少，这4项指标均呈现下降趋势。在相同施氮水平下，BS处理大豆产量显著高于CK和SF处理，增幅分别为31.27%~54.22%和14.01%~34.00%。特别是在N2施氮水平下，BS处理增产效果最为显著，两年平均产量较CK和SF处理分别提高60.97%和38.62%。此外，BSN1和BSN2处理大豆产量在第2年显著增加，而其他处理未表现出显著年际变化。

表5 不同还田处理对大豆产量及其构成因素的影响

Tab.5 Effect of different field return treatments on soybean yield and its components

年份	处理	单株荚数	单株粒数	百粒质量/	产量/
				g	(kg·hm ⁻²)
2022	CKN1	33.67 ^d	61.33 ^d	22.30 ^{bc}	2 310.52 ^c
	CKN2	26.21 ^e	51.45 ^e	21.70 ^c	2 017.37 ^d
	CKN3	21.67 ^f	41.67 ^f	19.80 ^d	1 716.46 ^e
	SFN1	44.19 ^c	75.33 ^c	23.20 ^b	2 744.57 ^b
	SFN2	34.33 ^d	62.00 ^d	21.80 ^c	2 321.81 ^c
	SFN3	26.17 ^e	48.00 ^e	20.70 ^{cd}	1 901.44 ^d
	BSN1	51.33 ^a	91.67 ^a	25.60 ^a	3 129.14 ^a
	BSN2	48.33 ^b	85.24 ^b	25.40 ^a	3 005.71 ^a
	BSN3	33.67 ^d	59.17 ^d	21.20 ^c	2 253.14 ^c
2023	CKN1	34.33 ^d	57.33 ^d	21.90 ^c	2 479.39 ^c
	CKN2	24.67 ^f	49.22 ^e	21.20 ^c	1 972.54 ^d
	CKN3	19.00 ^g	36.67 ^f	18.70 ^d	1 672.21 ^f
	SFN1	46.24 ^c	73.00 ^c	23.10 ^b	2 814.45 ^b
	SFN2	33.33 ^d	58.67 ^d	21.70 ^c	2 311.47 ^c
	SFN3	25.00 ^f	45.67 ^e	19.90 ^d	1 841.40 ^d
	BSN1	58.33 ^a	110.33 ^a	25.70 ^a	3 245.45 ^a
	BSN2	49.33 ^b	85.17 ^b	25.11 ^a	3 111.25 ^a
	BSN3	30.67 ^e	59.62 ^d	21.55 ^c	2 147.14 ^d

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。

2.5 不同处理对大豆氮素含量、氮素总吸收量和氮素表观回收率的影响

如表6所示，大豆氮素含量、氮素吸收量和氮素表观回收率在年际间未表现出显著变化。在相同还

表6 不同处理下大豆籽粒和秸秆中氮素浓度、氮素吸收量、总氮素吸收量和氮素表观回收率

Tab.6 Nitrogen concentration, nitrogen uptake, total nitrogen uptake and apparent nitrogen recovery in soybean seeds and straw under different treatments

年份	处理	氮素含量/%		氮素吸收量/(kg·hm ⁻²)		总吸收量	NAR
		秸秆	籽粒	秸秆	籽粒		
2022	CKN1	5.17 ^d	1.21 ^d	119.38 ^c	44.61 ^c	163.99 ^c	0.37 ^e
	CKN2	4.91 ^{de}	1.00 ^e	98.99 ^d	32.39 ^d	131.38 ^d	0.29 ^{ef}
	CKN3	4.68 ^e	0.80 ^f	80.33 ^e	21.88 ^e	102.21 ^e	0.16 ^f
	SFN1	5.55 ^b	1.36 ^b	152.42 ^b	59.72 ^b	212.14 ^b	0.59 ^c
	SFN2	5.57 ^b	1.22 ^c	129.32 ^{bc}	45.20 ^c	174.52 ^c	0.53 ^d
	SFN3	5.05 ^d	0.99 ^e	95.96 ^d	30.02 ^d	125.98 ^d	0.34 ^e
	BSN1	5.85 ^a	1.52 ^a	183.05 ^a	76.27 ^a	259.32 ^a	0.80 ^b
	BSN2	5.79 ^a	1.53 ^a	180.25 ^a	76.33 ^a	256.58 ^a	0.98 ^a
	BSN3	5.31 ^c	1.26 ^c	119.64 ^c	45.30 ^c	164.94 ^c	0.63 ^c
2023	CKN1	5.15 ^d	1.17 ^d	127.61 ^c	46.28 ^c	173.89 ^c	0.42 ^e
	CKN2	4.79 ^f	0.98 ^d	94.42 ^e	30.82 ^c	125.24 ^c	0.25 ^f
	CKN3	4.57 ^f	0.72 ^e	76.42 ^f	19.17 ^g	95.59 ^f	0.12 ^g
	SFN1	5.49 ^b	1.29 ^b	154.51 ^b	58.09 ^b	212.60 ^b	0.59 ^c
	SFN2	5.30 ^c	1.12 ^c	122.51 ^c	41.54 ^d	164.05 ^d	0.47 ^d
	SFN3	4.97 ^e	0.85 ^d	91.46 ^e	25.14 ^f	116.60 ^e	0.27 ^f
	BSN1	6.06 ^a	1.54 ^a	196.57 ^a	80.14 ^a	276.71 ^a	0.87 ^b
	BSN2	5.91 ^a	1.55 ^a	195.69 ^a	81.94 ^a	267.63 ^a	0.99 ^a
	BSN3	5.23 ^c	1.23 ^b	112.22 ^d	42.14 ^d	154.36 ^d	0.55 ^c

田方式条件下,各处理籽粒氮素含量和大豆氮素总吸收量均随施氮量的减少逐渐降低。在相同施氮量条件下,与 SF 处理相比,BS 处理大豆氮素表观回收率显著提高 35.13% ~ 67.92%。BSN1 处理的大豆氮素总吸收量最高(259.32 kg/hm²),而 BSN2 处理在氮素吸收量的提升幅度上表现最为突出,较 CKN2 和 SFN2 处理分别提高 95.30% 和 47.01%。

2.6 不同处理对大豆氮素农学利用效率的影响

如图 5 所示,不同还田方式、施氮量及其交互作用对大豆氮素农学利用效率 (NAE) 均具有显著影响。在相同施氮量条件下,BS 处理 NAE 显著优于 CK 和 SF 处理,分别提高 43.04% ~ 83.78% 和 9.43% ~ 36.23%,其中,BSN2 处理 NAE 最高,为 9.34 kg/kg。在相同还田方式下,N3 处理 NAE 在第 2 年均出现下降趋势,下降幅度为 7.48% ~ 13.64%;相反,N1 处理 NAE 在第 2 年呈上升趋势,上升幅度为 4.12% ~ 13.39%。此外,N2 处理 NAE 未表现出显著的年际变化趋势。在高施氮水平 (N1) 下,BS 处理显著促进了 NAE 的年际提升,而 SF 和 CK 处理提升幅度相对较小,在低施氮水平 (N3) 下,BS 处理仍表现出最高 NAE,其年际下降幅度显著小于 SF 和 CK 处理。

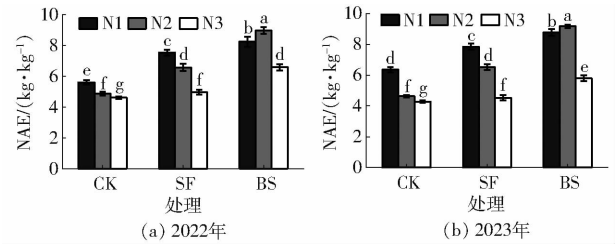


图 5 2022—2023 年不同处理大豆氮素农学效率
Fig.5 Soybean nitrogen agronomic efficiency for different treatments in 2022—2023

2.7 不同处理对大豆氮素利用效率和氮素响应指数的影响

如图 6 所示,不同处理大豆氮素利用效率 (NUE) 和氮素响应指数 (NRI) 表现出显著差异。在 CK 和 SF 处理下,NUE 随施氮量的减少变化不显著。然而,在 BS 处理下,NUE 呈现显著的先上升后下降趋势,其中 BSN2 处理 NUE 最高,达到 0.99,较 CKN2 和 SFN2 处理分别提高 82.09% 和 28.25%。在相同施氮量条件下,BS 处理 NUE 显著高于 CK 和 SF 处理,分别平均高 61.21% 和 28.22%。

此外,在 NRI 方面,BS 处理 NRI 始终高于 CK 和 SF 处理,增幅分别为 31.27% ~ 54.22% 和 14.01% ~ 34.00%,其中 BSN2 处理 NRI 最高,为 2.18。CK 和 SF 处理 NRI 随着施氮量降低显著下

降,降幅分别为 34.61% 和 44.34%。然而,BSN1 和 BSN2 处理 NRI 无显著变化,而 BSN3 处理 NRI 虽显著下降 38.88%,但仍高于 CKN3 和 SFN3 处理,分别高 31.27% 和 18.49%。

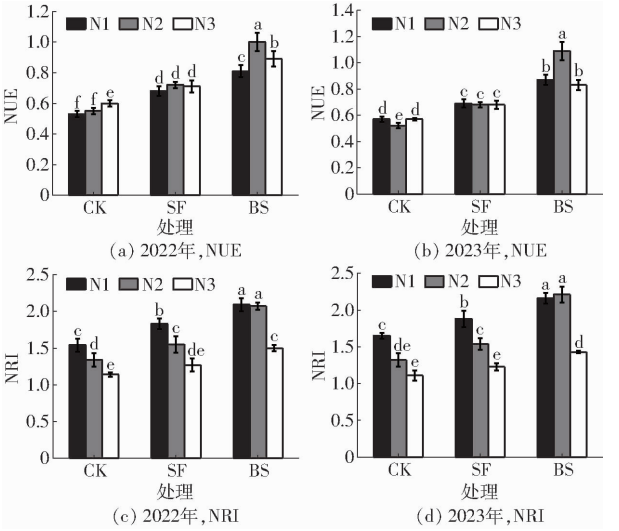


图 6 2022—2023 年不同处理大豆氮素利用效率和氮素响应指数

Fig.6 Nitrogen utilization efficiency and nitrogen response index of soybean in different treatments in 2022—2023

2.8 综合评价

基于熵权 TOPSIS 模型对各处理的土壤氮素指标、植株氮素指标、植株生长指标及产量指标进行综合评分(表 7)。由表 7 可知,不同还田方式、施氮量及其交互作用对土壤氮素和大豆生长指标的影响显著。在相同施氮量条件下,BS 处理相对贴适度显著高于 SF 和 CK 处理,分别平均高 0.29 和 0.49。在相同还田方式下,CK 和 SF 处理相对贴适度随着施氮量的减少显著下降,下降幅度分别为 0.35 和 0.37。而 BS 处理仅在 BSN3 处理时出现显著下降(降幅 0.38)。BSN2 处理的相对贴适度最高,为 0.837,并被评为“优”等级。

表 7 不同处理贴合度和效应等级

Tab.7 Fit and effect sizes of different treatments					
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
CKN1	0.094	0.061	0.393	6	中
CKN2	0.116	0.030	0.207	8	差
CKN3	0.138	0.005	0.038	9	差
SFN1	0.059	0.088	0.598	3	中
SFN2	0.082	0.062	0.428	5	中
SFN3	0.113	0.032	0.220	7	差
BSN1	0.026	0.129	0.834	2	优
BSN2	0.025	0.127	0.837	1	优
BSN3	0.082	0.067	0.451	4	中

注:表中各处理数据为两年平均值。

3 讨论

3.1 秸秆和生物炭还田对土壤氮素含量的影响

合理的土壤氮素管理对作物生长和农业可持续发展具有重要意义^[22]。本研究发现,在相同施氮条件下,BS 处理显著提高了土壤氮素含量,主要得益于生物炭与秸秆混施的协同作用。首先,生物炭具有较大的比表面积和丰富的孔隙结构,能够吸附铵态氮和硝态氮,显著减少氮素的挥发和淋失,延长氮素的有效性^[23]。其次,秸秆还田为土壤微生物提供了丰富的碳源,显著增强了微生物活性,尤其是促进了生物炭表面微生物的繁殖^[24]。此外,混施处理优化了土壤水热环境,提高了微生物活性,加速了秸秆分解,进一步提升土壤氮素含量^[25]。这与林少颖等^[26]研究结果一致,秸秆与生物炭混施能够显著提高土壤有机碳和全氮含量,从而有效改善土壤氮素环境,为作物生长提供更加稳定的养分供应基础。

与 SF 处理相比,BS 处理在大豆生育初期显著提高了土壤有效氮含量。这可能是由于生物炭的调控作用有效缓解了秸秆分解过程中微生物对氮素的竞争,减少了初期氮素供应不足的状况。在这一阶段,生物炭通过吸附和缓释作用维持了土壤中氮素的有效性,为大豆生育初期生长提供了稳定的养分来源^[27]。在大豆生育后期,随着微生物分解活动趋于稳定,早期被固定的氮素逐渐释放^[24]。同时,秸秆中的氮素以缓慢释放的形式补充到土壤中,有效提高了土壤中后期的有效氮含量^[28]。这种双重机制确保了对大豆全生育周期内氮素需求的持续供应,有助于促进作物的健康生长和最终产量提升。

此外,随着施氮量的降低,BS 处理在土壤氮素的保留方面显著优于 CK 和 SF 处理。生物炭的吸附缓释作用在低施氮条件下表现尤为突出,不仅减少了氮素淋失,还通过改善土壤结构和微生物群落的稳定性,增强了氮素的长期供应能力。同时,在相同施氮量条件下,第 2 年 BS 处理土壤氮素含量较 CK 和 SF 处理提升幅度更大,这可能是由于生物炭的长期作用,生物炭通过优化土壤物理结构,改善土壤通气性和保水性,同时促进与氮循环相关的功能微生物群落的稳定性,从而进一步提高土壤氮素积累和利用效率^[29]。

3.2 秸秆和生物炭还田对大豆光合特性、干物质积累量和产量的影响

干物质积累和产量是评估作物生长的重要指标,两者均与光合作用效率和土壤养分供应密切相关^[30-31]。本研究发现,不同还田方式和施氮水平对大豆光合作用、干物质积累和产量均产生显著影响,

而土壤氮素管理是其中的关键因素。在高施氮水平(N1)条件下,3 种还田方式均表现出大豆净光合速率、干物质积累量和产量最大。随着施氮量的减少,这些指标均显著下降,但 BS 处理下降幅度显著低于 CK 和 SF 处理,反映出 BS 处理通过独特的养分供给机制和土壤环境调控能力,有效促进了作物生长和发育。

首先,秸秆分解过程中释放的速效养分(如氮、磷、钾)能够满足作物生长对矿质元素的需求,从而促进叶绿素的合成和光合作用效率的提高^[8]。其次,生物炭凭借其较大的比表面积和优异的吸附缓释特性,可以长期稳定地释放氮素,弥补秸秆分解初期因微生物竞争造成的氮素供应不足^[32]。此外,生物炭表面官能团(如羟基(—OH)、羧基(—COOH)和羰基(C=O)能够增强土壤持水能力,提高土壤含水率,缓解水分胁迫对光合作用和干物质积累的不利影响^[33]。这种土壤改良作用进一步促进了作物根系对养分的高效吸收,并支持光合产物向籽粒的优先分配,从而有效提升籽粒氮素含量并显著提高最终产量^[34]。

3.3 秸秆和生物炭还田对大豆氮素利用的影响

本研究发现,BS 处理较 CK 和 SF 处理显著提高了大豆氮素利用效率。这种差异主要与土壤氮素释放动态、土壤环境优化程度密切相关。首先,CK 和 SF 处理氮素利用效率较低,主要源于氮素供应与作物吸收需求不匹配。CK 处理缺乏有机物料的调控作用,施用氮素在大豆生育初期释放过快,超出了作物吸收能力,导致大量氮素通过挥发或淋溶流失,从而降低了有效氮素利用率^[35]。相比之下,SF 处理虽然加入了秸秆,但秸秆分解过程中微生物对氮素的竞争效应显著。大量氮素被微生物吸收用于秸秆分解,使得土壤氮素供应在大豆生育前期不足,从而限制了大豆对氮素的有效吸收,进一步降低了氮素利用效率^[36]。

相比之下,BS 处理通过有效调控土壤中氮素的释放与转化,在大豆生长过程中吸附并缓慢释放秸秆分解产生的氮素,实现了大豆生育期内养分供需的动态平衡,从而显著提升了氮素利用效率。首先,BS 处理通过提高土壤孔隙度,优化水气比及氧化还原环境,有效调节硝化和反硝化过程^[37]。一方面,BS 处理创造的适宜土壤条件显著抑制了过度硝化作用,避免了硝态氮过量积累及其导致的淋溶损失,另一方面,生物炭通过改善微生物生境,减少反硝化过程中气态氮(如 N₂O 和 N₂)排放,从而提高了土壤中氮素的保留效率^[38]。此外,秸秆还田为土壤微生物群落,尤其是固氮菌和解氮微生物,提供了丰富的有机碳源,增强了微生物活性和代谢功能。这种

微生物活性的增强不仅促进了氮素的矿化过程,也加速了秸秆有机质的分解转化,使其以可被作物直接利用的形式回归土壤,从而进一步促进了大豆的氮素吸收和利用。

整体而言,秸秆与生物炭在土壤中的协同作用显著优化了氮素循环机制,不仅有效减少了氮素通过挥发、淋溶等途径的流失,还显著提高了土壤氮素含量,进而提升了大豆对氮肥的吸收和利用效率。然而,本研究试验周期仅为2年,未能全面涵盖生物炭和秸秆混施还田对土壤生态系统的长期影响及潜在风险。因此,未来研究应侧重于长期监测和综合评价生物炭与秸秆混施对土壤理化性质、微生物群落动态及作物生产力的持续影响,为其在农业可持续发展中的广泛应用提供更为全面和可靠的科学依据。

4 结论

(1) 秸秆和生物炭混施显著增加0~20 cm 土壤

氮素含量,其中土壤铵态氮含量较对照和秸秆单施处理分别增加26.41%~78.08%和7.58%~46.91%,土壤硝态氮含量分别提升70.18%~95.56%和19.02%~44.53%,表明秸秆和生物炭混施能够有效维持土壤氮素稳定性,为作物健康生长提供更为有利条件。

(2) 秸秆与生物炭混施显著提高大豆净光合速率,分别较对照和秸秆单施处理提高18.91%~38.09%和10.16%~23.74%,同时,混施处理显著促进大豆氮素利用效率,有助于大豆干物质质量积累,使大豆产量分别提升28.40%~67.87%和14.01%~43.25%。

(3) 通过TOPSIS模型分析发现,生物炭与秸秆混施结合施用氮肥60 kg/hm²处理,在降低氮肥投入的同时,表现出最优效应等级,是所有试验处理中最适合改善黑土区土壤氮素环境、提升大豆氮素利用率和大豆产量方案。

参 考 文 献

[1] 刘慧,焦岩,窦婉毓,等.减氮配施生物炭对土壤肥力和水稻产量的补偿效应与机制[J].农业机械学报,2024,55(9):391-401,469.
LIU Hui, JIAO Yan, DOU Wanyu, et al. Compensation effect and mechanism of nitrogen reduction combined with biochar application on soil fertility and rice yield[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(9):391-401,469. (in Chinese)

[2] 向友珍,张威,唐子竣,等.减施氮肥和接种根瘤菌对大豆生理生长与氮素利用效率及产量的影响[J].农业机械学报,2024,55(3):340-351.
XIANG Youzhen, ZHANG Wei, TANG Zijun, et al. Effects of nitrogen fertilizer reduction and rhizobia inoculation on physiological growth, nitrogen use efficiency and yield of soybean[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(3):340-351. (in Chinese)

[3] 徐影,于镇华,李彦生,等.土壤酸化成因及其对农田土壤-微生物-作物系统影响的研究进展[J].土壤通报,2024,55(2):562-572.
XU Ying, YU Zhenhua, LI Yansheng, et al. Research progresses on soil acidification and its effects on soil-microorganism-crop systems in agricultural soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(2): 562-572. (in Chinese)

[4] LIU W, LIU Y, LIU G, et al. Estimation of maize straw production and appropriate straw return rate in China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2022, 328: 107865.

[5] 王治统,凌俊,刘子熙,等.秸秆还田方式对土壤理化性质和玉米产量的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2024,32(4):663-674.
WANG Zhitong, LING Jun, LIU Zixi, et al. Effect of straw return practices on soil physico-chemical properties and maize yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(4): 663-674. (in Chinese)

[6] WU G, LING J, ZHAO D Q, et al. Deep-injected straw incorporation improves subsoil fertility and crop productivity in a wheat-maize rotation system in the North China Plain[J]. Field Crops Research, 2022, 286: 108612.

[7] 张天尧,吴泽璐,卫正宇,等.整合分析秸秆还田对中国主要粮食作物氮肥利用率的影响[J].土壤与作物,2023,12(4):429-438.
ZHANG Tianyao, WU Zelu, WEI Zhengyu, et al. Effects of straw returning on nitrogen use efficiency of major grain crops in China: a Meta-analysis[J]. Soils and Crops,2023,12(4):429-438. (in Chinese)

[8] 鲁悦,鲍雪莲,霍海南,等.免耕条件下不同量秸秆覆盖还田提高东北黑土区玉米光合性能和产量的效应[J].植物营养与肥料学报,2023,29(5):840-847.
LU Yue, BAO Xuelian, HUO Hainan, et al. Effects of different amounts of stover mulching on improving photosynthetic characteristics and yield of maize in Mollisol of Northeast China under long-term no-tillage[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(5): 840-847. (in Chinese)

[9] FU X, SONG Q, LI S, et al. Dynamic changes in bacterial community structure are associated with distinct priming effect patterns[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2022, 169: 108671.

[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] 王舒, 王子芳, 龙翼, 等. 生物炭施用对紫色土旱坡地土壤氮流失形态及通量的影响[J]. *环境科学*, 2020, 41(5): 2406–2415.
WANG Shu, WANG Zifang, LONG Yi, et al. Effect of fertilizer reduction and biochar application on soil nitrogen loss in purple upland[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(5): 2406–2415. (in Chinese)

[12] 张晓敏, 杨威, 屈忠义, 等. 生物炭添加对亏缺灌溉玉米光合荧光生理参数的补偿效应[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(24): 89–97.
ZHANG Xiaomin, YANG Wei, QU Zhongyi, et al. Compensation effect of biochar addition on the photosynthetic fluorescence physiological parameters of corn under deficit irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2024, 40(24): 89–97. (in Chinese)

[13] BORCHARD N, SCHIRRMANN M, LUZ CAYUELA M, et al. Biochar, soil and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N₂O emissions: a Meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 2354–2364.

[14] DING S, LI C, HUO Z, et al. Combined applications of biochar and straw alter nitrogen (N) allocation in a manure amended soil-tobacco continuum system: a field N tracing experiment[J/OL]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-02164-3>.

[15] LI H, LIU Y, JIAO X, et al. Response of soil nutrients retention and rice growth to biochar in straw returning paddy fields[J]. *Chemosphere*, 2023, 312: 137244.

[16] 赵亚鹏, 贾辉, 符云鹏, 等. 施用等碳量生物炭和腐熟秸秆对土壤养分及有机碳库的影响[J]. *烟草科技*, 2020, 53(1): 12–20.
ZHAO Yapeng, JIA Hui, FU Yunpeng, et al. Effects of biochar and decomposed straw at equal carbon content on soil fertility and organic carbon pool[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2020, 53(1): 12–20. (in Chinese)

[17] 刘朝霞, 牛文娟, 楚合营, 等. 秸秆热解工艺优化与生物炭理化特性分析[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(5): 196–203.
LIU Zhaoxia, NIU Wenjuan, CHU Heying, et al. Process optimization for straws pyrolysis and analysis of biochar physiochemical properties[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(5): 196–203. (in Chinese)

[18] 丁世杰, 黄绍敏, 张水清, 等. 长期施肥下土壤氮素指标与小麦/玉米产量关系研究[J]. *核农学报*, 2025, 39(1): 157–169.
DING Shijie, HUANG Shaomin, ZHANG Shuiqing, et al. Study on the relationship between soil nitrogen indexes and wheat/maize yield under long-term fertilization[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2025, 39(1): 157–169. (in Chinese)

[19] 高敬文, 郭子燕, 王峰. 盐碱胁迫下作物氮素吸收利用的响应机理及调控措施研究进展[J]. *中国农学通报*, 2024, 40(24): 44–50.
GAO Jingwen, GUO Ziyang, WANG Feng. The response mechanism of crop nitrogen absorption and utilization to salt and alkali stress and related regulating managements: a review[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(24): 44–50. (in Chinese)

[20] VAZIRITABAR Y, FREI M, YAN F, et al. Enhancing nitrogen use efficiency and plant productivity in long-term precrop/crop rotation and fertilization management[J]. *Field Crops Research*, 2024, 306: 109210.

[21] 马艳. 基于熵权 TOPSIS 法的湖北省土地生态安全评价[J]. *湖北农业科学*, 2019, 58(8): 28–34.
MA Yan. Evaluation of land ecological security in Hubei Province based on entropy-weight TOPSIS modeling[J]. *Hubei Agricultural Science*, 2019, 58(8): 28–34. (in Chinese)

[22] SHAH F, WU W. Soil and crop management strategies to ensure higher crop productivity within sustainable environments[J]. *Sustainability*, 2019, 11(5): 1485.

[23] 姜志翔, 崔爽, 张鑫, 等. 基于 Meta-analysis 的生物炭对土壤硝态氮淋失和磷酸盐固持影响[J]. *环境科学*, 2022, 43(10): 4658–4668.
JIANG Zhixiang, CUI Shuang, ZHANG Xin, et al. Influence of biochar application on soil nitrate leaching and phosphate retention: a synthetic Meta-analysis[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(10): 4658–4668. (in Chinese)

[24] 张海晶, 王少杰, 罗莎莎, 等. 不同秸秆还田方式对土壤微生物影响的研究进展[J]. *土壤与作物*, 2020, 9(2): 150–158.
ZHANG Haijing, WANG Shaojie, LUO Shasha, et al. Research advances in the impact of different straw returning ways on soil microorganisms[J]. *Soils and Crops*, 2020, 9(2): 150–158. (in Chinese)

[25] 何甜甜, 王静, 符云鹏, 等. 等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物生物量碳氮的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42(1): 450–458.
HE Tiantian, WANG Jing, FU Yunpeng, et al. Effects of adding straw and biochar with equal carbon content on soil respiration and microbial biomass carbon and nitrogen[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(1): 450–458. (in Chinese)

[26] 林少颖, 赖清志, 刘旭阳, 等. 秸秆及配施生物炭对福州菜莉园土壤碳、氮、磷、铁含量及其生态化学计量学特征影响[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(9): 3777–3791.
LIN Shaoying, LAI Qingzhi, LIU Xuyang, et al. Effects of straw and biochar on soil carbon, nitrogen, phosphorus and iron

contents and ecological stoichiometric characteristics of jasmine garden in Fuzhou[J]. *Aeta Scientiae Circumstantiate*, 2021, 41(9):3777–3791. (in Chinese)

[27] 赵泽州, 王晓玲, 李鸿博, 等. 生物质炭基肥缓释性能及对土壤改良的研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(5): 886–897.

ZHAO Zezhou, WANG Xiaoling, LI Hongbo, et al. Slow-release property and soil remediation mechanism of biochar-based fertilizers[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(5): 886–897. (in Chinese)

[28] 夏颖, 冯婷婷, 吴茂前, 等. 秸秆还田技术的演变及其发展趋势[J]. *湖北农业科学*, 2021, 60(21): 16–20.

XIA Ying, FENG Tingting, WU Maoqian, et al. The evolution and development trend of straw return to field technology[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2021, 60(21): 16–20. (in Chinese)

[29] 张星, 张晴雯, 刘杏认, 等. 施用生物炭对农田土壤氮素转化关键过程的影响[J]. *中国农业气象*, 2015, 36(6): 709–716.

ZHANG Xing, ZHANG Qingwen, LIU Xingren, et al. Effects of biochar on the key soil nitrogen transformation processes in agricultural soil[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015, 36(6): 709–716. (in Chinese)

[30] 朱莉, 李贵勇, 周伟, 等. 不同生态条件下氮高效水稻品种干物质积累和产量特性[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(6): 1015–1028.

ZHU Li, LI Guiyong, ZHOU Wei, et al. Dry matter accumulation and yield characteristics of high-nitrogen efficient rice cultivars under different ecological conditions[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(6): 1015–1028. (in Chinese)

[31] 常硕其, 粟琳, 欧阳翔. 水稻产量提高与光合作用之间的关系[J]. *生命科学*, 2024, 36(10): 1305–1310.

CHANG Shuoqi, SU Lin, OUYANG Xiang. The relationship between the enhancement of rice grain yield and photosynthesis [J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2024, 36(10): 1305–1310. (in Chinese)

[32] 冯帆. 不同氮肥水平对旱作大豆农艺性状、产量及经济效益的影响[J]. *南方农业*, 2022, 16(22): 23–25,29.

FENG Fan. Effects of different nitrogen fertilizer levels on agronomic characters, yield and economic benefits of dryland soybean [J]. *Southern Agriculture*, 2022, 16(22): 23–25,29. (in Chinese)

[33] OBIA A, CORNELISSEN G, MARTINSEN V, et al. Conservation tillage and biochar improve soil water content and moderate soil temperature in a tropical Acrisol[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 197: 104521.

[34] DONG W, XING J, CHEN Q, et al. Hydrogen bonds between the oxygen-containing functional groups of biochar and organic contaminants significantly enhance sorption affinity[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 499: 156654.

[35] 邹狮, 严君, 韩晓增, 等. 氮肥对大豆结瘤固氮、籽粒产量和蛋白质含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(8): 1457–1465.

ZOU Shi, YAN Jun, HAN Xiaozeng, et al. Effects of nitrogen application on nodulation, nitrogen fixation, yield and protein content of soybean[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(8): 1457–1465. (in Chinese)

[36] 刘四义, 贾淑霞, 张晓平, 等. 玉米和大豆秸秆还田对黑土微生物量及呼吸的影响[J]. *土壤与作物*, 2014, 3(3): 105–111.

LIU Siyi, JIA Shuxia, ZHANG Xiaoping, et al. Effects of corn and soybean residues return on microbial biomass and respiration in a black soil[J]. *Soil and Crop*, 2014, 3(3): 105–111. (in Chinese)

[37] 何莉莉. 秸秆生物炭对农田土壤硝化和反硝化作用的影响[D]. 北京:中国科学院大学, 2017.

HE Lili. Effects of straw biochar on nitrification and denitrification in agricultural soils[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)

[38] 王洪媛, 盖霞普, 翟丽梅, 等. 生物炭对土壤氮循环的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2016, 36(19): 5998–6011.

WANG Hongyuan, GAI Xiapu, ZHAI Limei, et al. Effect of biochar on soil nitrogen cycling: a review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(19): 5998–6011. (in Chinese)