



玉豆轮作体系下减肥配施有机肥对大豆干物质积累及产量品质的影响

陈子生¹, 张明聪¹, 钟行杰¹, 张玉先^{1,2*}

(1. 黑龙江八一农垦大学 农学院, 黑龙江 大庆 163319; 2. 国家杂粮工程技术中心, 黑龙江 大庆 163319)

摘要:为探究黑龙江垦区有机肥替代部分化肥对玉豆轮作体系下大豆干物质积累及产量品质的影响,为黑龙江垦区玉豆轮作高效生产提供施肥依据,本研究以当地主栽大豆品种黑河 43 为供试材料,通过 6 年定位试验,比较分析不同有机肥配施处理对作物生长、干物质积累与分配等指标的影响。结果表明:与 CK 处理相比,减施氮肥并施用有机肥处理大豆 R4 期 LAI 显著增加 18.62%。有机肥与化肥配施处理使植株的干物质积累量增加,在大豆 R6 期,减施氮肥并施用有机肥、减施钾肥并施用有机肥、减施氮磷钾肥并施用有机肥处理的茎、叶、荚皮与籽粒干重分别高于减施氮肥、减施钾肥、减施氮磷钾肥处理,其中减施氮磷钾肥并施用有机肥处理的茎干重较减施氮磷钾肥处理显著提高 31.19%,减施氮肥并施用有机肥处理籽粒干重较减施氮肥处理显著提高 36.99%。施用有机肥促进了大豆产量的提高,使大豆籽粒中的蛋白质含量提高,从而有助于大豆品质的提升。综上,不同有机肥配施化肥处理均能提高大豆的产量,其中减施钾肥并施用有机肥处理对作物产量的促进作用更强。

关键词:玉豆轮作;有机肥;大豆;干物质积累;产量;品质

Effects of Weight Loss with Organic Fertilizer on Dry Matter Accumulation and Yield Quality of Soybean under the Corn-soybean Rotation System

CHEN Zisheng¹, ZHANG Mingcong¹, ZHONG Xingjie¹, ZHANG Yuxian^{1,2*}

(1. College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural Reclamation University, Daqing 163319, China; 2. National Center for Mixed Grain Engineering Technology, Daqing 163319, China)

Abstract: In order to investigate the effect of organic fertilizer replacing some chemical fertilizers on dry matter accumulation and yield quality of soybean under corn-soybean rotation system in Heilongjiang Reclamation Area, and to provide a basis for fertilization for the efficient production of corn-soybean rotation in Heilongjiang Reclamation Area, we took the local staple soybean variety Heihe 43 as the test material, compared and analyzed the effects of different organic fertilizer allocation treatments on the indexes of crop growth, dry matter accumulation and distribution through 6-year positioning test. The results showed that compared with the CK treatment, the LAI of soybean at the R4 stage was significantly increased by 18.62% in the treatment of N fertilizer reduction and organic fertilizer application. The dry matter accumulation of plants was increased by the treatment of organic fertilizer and chemical fertilizer. In the R6 stage of soybean, the dry weights of stems, leaves, pod skins and seeds in the treatments of reduced nitrogen fertilizer and organic fertilizer, reduced potash fertilizer and organic fertilizer, reduced nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer and organic fertilizer were higher than the treatments of reduced nitrogen fertilizer, reduced potash fertilizer, reduced nitrogen, phosphorus and potash fertilizers, respectively, of which the dry weights of stems in the treatments of reduced nitrogen fertilizer, phosphorus and potash fertilizer and organic fertilizer were higher than those in the treatments of reduced nitrogen fertilizer, potassium fertilizer and organic fertilizer, respectively. Nitrogen, phosphorus, potassium fertilizer treatment treatment significantly increased by 31.19%, reduced nitrogen fertilizer and organic fertilizer treatment grain dry weight significantly increased by 36.99% compared with reduced nitrogen fertilizer treatment. The application of organic fertilizer promotes the improvement of soybean yield, so that the protein content of soybean grains increased, thus contributing to the improvement of soybean quality. In conclusion, different organic fertilizers with fertilizer treatments could increase the yield of soybean, in which the reduced potassium fertilizer and organic fertilizer treatments had a stronger effect on crop yield.

Keywords: corn-soybean rotation system; organic fertilizer; soybean; dry matter accumulation; yield; quality

黑龙江省作为我国重要的大豆主产区之一,同时也是商品粮基地和绿色食品生产区^[1]。东北黑土地保护规划纲要(2017—2030 年)明确要求推广玉米、大豆轮作,大豆、玉米轮作是改善土壤微环境的有效方式之一,与谷物轮作相比,可改善耕层结

构,促进粮食高产^[2,3]。2020 年,黑龙江粮食产量为 7 540 万 t,占全国粮食总产量的 11.3%,居全国首位,其中大豆产量超过 850 万 t。然而,长期大量使用化肥和持续增产导致表土层变薄,永久生产能力减弱,不仅严重影响土壤质量,而且影响土壤养分

收稿日期:2024-09-02

基金项目:农业生物育种重大项目(2023ZD0403106);黑龙江省“揭榜挂帅”科技攻关项目(2021ZXJ05B02)。

第一作者:陈子生,男,硕士研究生,主要从事寒地作物营养生理与生态。E-mail:1170712632@qq.com。

通讯作者:张玉先,男,博士,教授,主要从事大豆高产栽培技术研究。E-mail:zyx_lxy@126.com。

和有效成分含量,进而限制作物生长发育,危及粮食安全^[4-6],不利于中国大豆产业的健康全面发展^[7,8]。所以在传统施肥的基础上进一步优化施肥模式、提高肥料利用率、对改善土壤品质、增加作物产量,实现土壤、作物、肥料的绿色可持续发展,具有重要的意义。

施用肥料可以保证作物的稳产和高产,但肥料的过量施用不仅会造成肥料的利用效率过低,土壤肥力的降低,还会对外界自然环境造成危害。据相关报道,有机肥与化肥的相互配合施用被认为是提高作物产量和资源可持续利用的措施之一^[9,10]。玉豆轮作模式是黑龙江省大豆主要轮作方式之一。该模式能够利用大豆自身的根瘤固氮作用,为下茬作物玉米提供氮素营养;此外种植玉米所创造的土壤环境有利于促进大豆的生物固氮^[11],起到相互促进的作用。玉豆轮作还可缓解作物连作所带来的问题,可以达到提高土壤肥力和控制病虫草害的目的,从而增加作物产量^[12,13]。近年来,大豆-玉米轮作种植面积有逐渐扩增的趋势。但由于农户在实际生产中的施肥方案仍按照传统施肥模式进行,导致肥料损失、环境污染等问题。朱宝国等^[14]研究证实,有机与无机肥料的合理配比,能提高大豆对氮的吸收率,继而增加籽粒中蛋白质含量并减少脂肪含量。前人研究发现生物有机肥配施化肥能够提

高大豆苗期和盛花期大豆的地上部干物质和地下部干物质,地上部干物质提高幅度为5.31%~12.86%,地下部干物质提高幅度为10.35%~20.24%,根瘤数和根瘤重显著提高^[15]。

因此,本研究通过探究化肥减量配施有机肥对玉豆轮作模式下大豆植株干物质积累与分配、产量和品质进行研究,来明确适合黑龙江垦区玉豆轮作模式下的肥料配施方案,建立科学技术合理、环境友好型肥料配施体系。研究对于缓解黑龙江省黑土退化、提高土壤肥力、粮食增产均具有极为重要的现实与长远意义,将为黑龙江省的土壤培肥与耕地保护、实现农业可持续发展的目标提供技术支撑和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于黑龙江省北大荒集团九三分公司鹤山农场科技园区,地处48°43'N~49°03'N,124°56'E~126°21'E,属寒温带大陆性气候,年平均气温1.8℃,年有效积温为2300~2450℃,年平均日照时数达2429.3h,年平均降雨量601.1mm,年平均无霜期119d。当地2022和2023年5—9月平均气温与降雨量情况如图1所示。试验土壤类型为黑土,耕层土壤基本理化性质详见表1。

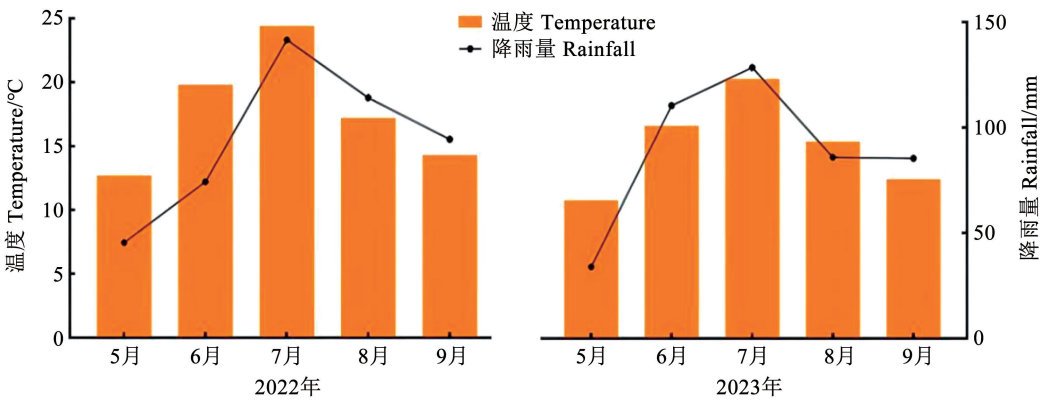


图1 2022和2023年温度与降雨量

Fig. 1 Temperature and rainfall in 2022 and 2023

表1 耕层土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of tillage soil

年份 Year	pH	碱解氮 Alkaline hydrolyzable nitrogen/(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Fast-acting potassium/ (mg·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)
2022	6.28	140.58	26.54	175.00	29.15	1.32
2023	6.31	143.62	28.96	182.00	31.26	1.28

1.2 试验材料

玉米品种:德美亚 1 号,叶片深绿,具有抗倒伏性,平均株高为 270 cm,穗位数约 100 cm,穗长 18 ~ 20 cm,穗行数为 14,行粒数为 38,籽粒颜色为橙黄色。粗蛋白质含量 9.085%,粗脂肪含量 4.67%,粗淀粉含量 73.20%。

大豆品种:黑河 43 号,为亚有限结荚习性,株高大概 75 cm,形态呈紫花,尖叶,灰色绒毛,无分枝。粗蛋白含量 41.8%,粗脂肪含量 18.98%。

试验所用化肥为尿素(N≥46%);磷酸二铵(N≥18%、P₂O₅≥46%);硫酸钾(含 K₂O≥50%)。有机肥购买于黑龙江省牧康牧业有限责任公司,有机质 36.8%、N 0.84%、P₂O₅ 1.85%、K₂O 0.96%、H₂O 30.6%。

1.3 试验设计

于 2016 年开始在黑龙江省鹤山农场有限公司

进行试验,在玉豆轮作体系下开展有机肥减施化肥长期定位试验,进行 6 年定位试验,2022 年玉米有机肥施用量为 2.25 t·hm⁻²,2023 大豆有机肥施用量为 1.5 t·hm⁻²。设置 9 种不同处理方式,分别为:CK,当地常规施肥;T1,减施氮肥;T1 + O,减施氮肥并施用有机肥;T2,减施磷肥;T2 + O,减施磷肥并施用有机肥;T3,减施钾肥;T3 + O,减施钾肥并施用有机肥;T4,氮、磷、钾肥全部减施;T4 + O,减施氮、磷、钾肥并施用有机肥。在减肥基础上保证施入的氮、磷、钾纯量相同,有机肥添加处理在减肥处理基础上加入有机肥中的氮、磷、钾含量。采用随机区组的设计,每个处理行长 10 m,行距 65 cm,8 行区,3 次重复。具体施肥量见表 2 和表 3。

表 2 玉米施肥处理
Table 2 Maize fertilization treatments

处理 Treatment	有机肥 Organic fertilizer/ (t·hm ⁻²)	N/ (kg·hm ⁻²)	P ₂ O ₅ / (kg·hm ⁻²)	K ₂ O/ (kg·hm ⁻²)	总 N Total N/ (kg·hm ⁻²)	总 P ₂ O ₅ Total P ₂ O ₅ / (kg·hm ⁻²)	总 K ₂ O Total K ₂ O/ (kg·hm ⁻²)
CK	—	138.0	105.00	45.0	138.0	105.0	45.0
T1	—	69.0	105.00	45.0	69.0	105.0	45.0
T1 + O	2.25	50.1	63.45	23.4			
T2	—	138.0	52.50	45.0	138.0	52.5	45.0
T2 + O	2.25	119.1	10.95	23.4			
T3	—	138.0	105.00	22.5	138.0	105.0	22.5
T3 + O	2.25	119.1	63.45	0.9			
T4	—	69.0	52.50	22.5	69.0	52.5	22.5
T4 + O	2.25	50.1	10.95	0.9			

表 3 大豆施肥处理
Table 3 Soybean fertilization treatments

处理 Treatment	有机肥 Organic fertilizer/ (t·hm ⁻²)	N/ (kg·hm ⁻²)	P ₂ O ₅ / (kg·hm ⁻²)	K ₂ O/ (kg·hm ⁻²)	总 N Total N/ (kg·hm ⁻²)	总 P ₂ O ₅ Total P ₂ O ₅ / (kg·hm ⁻²)	总 K ₂ O Total K ₂ O/ (kg·hm ⁻²)
CK	—	54.0	67.50	37.50	54.0	67.50	37.50
T1	—	27.0	67.50	37.50	27.0	67.50	37.50
T1 + O	1.5	14.4	39.75	23.10			
T2	—	54.0	33.75	37.50	54.0	33.75	37.50
T2 + O	1.5	41.4	6.00	23.10			
T3	—	54.0	67.50	18.75	54.0	67.50	18.75
T3 + O	1.5	41.4	39.75	4.35			
T4	—	27.0	33.75	18.75	27.0	33.75	18.75
T4 + O	1.5	14.4	6.00	4.35			

1.4 测定项目及方法

SPAD 值:分别于大豆花期(R2)、荚期(R4)和鼓粒期(R6),使用 SPAD-502 叶绿素仪(日本)测定大豆倒数第三片复叶上、中、下部叶片的 SPAD 值,每个处理三次重复取平均值。

叶面积指数:分别于 R2、R4 和 R6 期每个处理选取 6 株具有代表性的植株,用 Li-3000 叶面积仪测定单株叶面积。叶面积指数 = 叶片总面积/土地总面积叶面积指数。每个处理 6 次重复,取平均值。

干物质积累和分配:将大豆植株各器官样本按茎、叶、柄、荚和粒进行分解,然后在 105 ℃ 下杀青 30 min,80 ℃ 下烘至恒重,并测定和计算其干物质积累和分配。

产量及产量构成因素测定:待大豆成熟后进行产量测定,随机选取有代表性的 1 m²大豆植株进行考种测产,每个处理 3 次重复,对大豆进行单株粒数、

底荚高度、单株荚数、百粒重等产量构成因素测定。

籽粒品质:取收获后的籽粒采用 GB/T24870-2010 近红外法测定大豆蛋白质、脂肪含量。

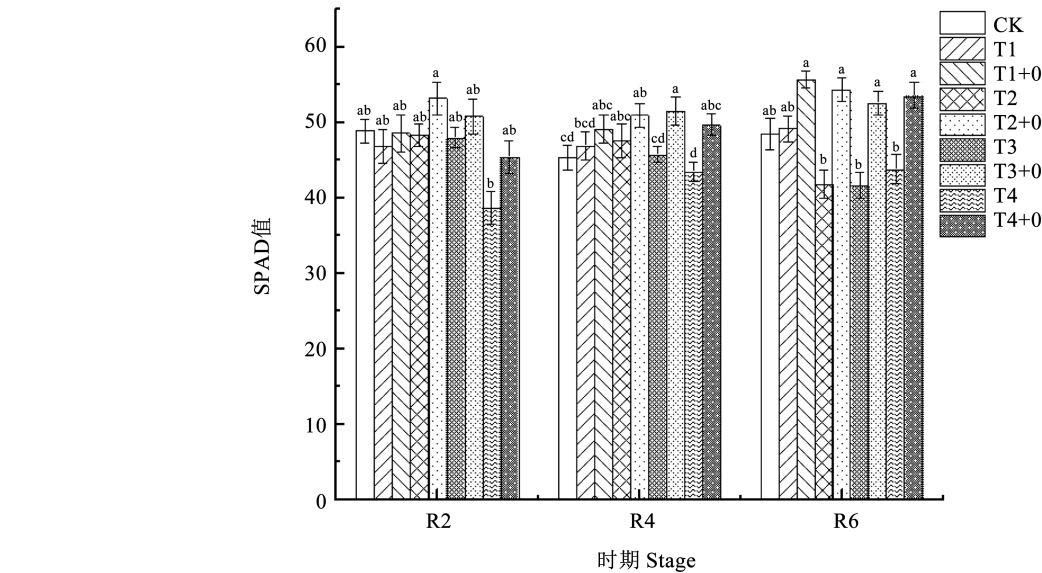
1.5 数据分析

采用 Excel 2020 进行数据处理和计算,通过 SPSS 22.0 软件进行方差分析和显著性分析,使用 Duncan's 法进行多重比较,使用 GraphPad Prism8 绘图。

2 结果与分析

2.1 减肥配施有机肥对大豆 SPAD 值的影响

由图 2 可知,在大豆 R2 期,各有机肥替代部分化肥处理的 SPAD 值均高于减肥处理,且以 T2 + O 处理的 SPAD 值最高,较 CK 处理增幅达 8.83%。在大豆 R4 期,T1 + O、T2 + O 和 T3 + O 处理分别较 CK 处理显著增加了 12.73%、14.65% 和 15.79% ($P < 0.05$)。



注:数据为平均数 ± 标准误。不同小写字母表示不同处理之间具有显著性差异 ($P < 0.05$)。下同。

Note: The data in the table represent the mean ± standard error. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). The same below.

图 2 不同施肥处理下大豆 SPAD 值

Fig.2 SPAD value of soybean under different fertilizer treatments

2.2 减肥配施有机肥对大豆叶面积指数的影响

由图 3 可知,随着大豆的生育期进行,叶面积指数表现出先上升再下降的趋势,在 R4 期达到最大值,不同时期各处理间均表现为肥料配施处理优于

CK 处理,T1 + O 处理 R4 期 LAI 显著高于其他处理,高于 CK 处理 18.62% ($P < 0.05$)。由此表明,适当施用有机肥可显著增加大豆叶面积指数,有利于大豆叶片生长。

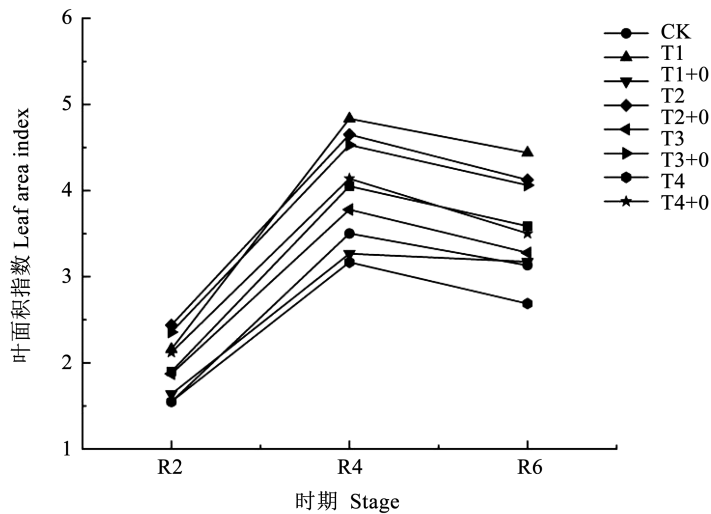


图3 不同施肥处理下大豆叶面积指数

Fig.3 Leaf area index of soybean under different fertilizer treatments

2.3 减肥配施有机肥对大豆干物质积累的影响

不同施肥措施对大豆干物质的影响如表4所示,大豆干物质积累量随生育期的进行逐渐升高,在R2至R4期积累速度较快,在R6期达到最大值。在R2期,有机肥配施处理的叶干重与茎干重显著高于减肥处理;在R4期,有机肥配施处理的茎干重与荚皮干重较减肥处理显著提高,其中T1+O处理的茎干重较CK处理显著提高25.19%,荚皮干重较CK处理显著提高36.38% ($P<0.05$);在R6期,有机

肥配施处理的茎、叶、荚皮与籽粒干重均高于减肥处理,其中T4+O处理的茎干重较T4处理显著提高31.19%,T1+O处理籽粒干重较T1处理显著提高了36.99% ($P<0.05$)。由此可知,适当的有机肥配施措施有利于大豆营养生长阶段的干物质积累,鼓粒期作为籽粒建成关键时期,有机肥配用有效提高了该时期大豆籽粒干物质积累量,其原因可能是施用有机肥可延长大豆净光合持续时长,延长干物质积累时间,对大豆籽粒建成起到了一定的促进作用。

表4 不同施肥处理下大豆地上部各器官干物质积累量

Table 4 Dry matter accumulation of soybean above-ground organs under different fertilizer treatments

生育期 Stage	处理 Treatment	茎 Stem	叶 Leaf	柄 Petiole	荚 Pod	粒 Seed
R2	CK	1.22 ± 0.07 b	1.84 ± 0.10 b	0.45 ± 0.02 b		
	T1	1.68 ± 0.21 b	2.40 ± 0.31 ab	0.56 ± 0.07 ab		
	T1 + O	1.92 ± 0.12 ab	3.10 ± 0.20 a	0.89 ± 0.08 a		
	T2	1.25 ± 0.20 b	2.34 ± 0.24 ab	0.95 ± 0.22 a		
	T2 + O	1.52 ± 0.22 b	2.49 ± 0.26 ab	0.84 ± 0.12 ab		
	T3	1.52 ± 0.13 b	2.45 ± 0.14 ab	0.67 ± 0.04 ab		
	T3 + O	2.48 ± 0.44 a	3.18 ± 0.50 a	0.97 ± 0.18 a		
	T4	1.65 ± 0.18 b	2.56 ± 0.20 ab	0.66 ± 0.07 ab		
	T4 + O	1.83 ± 0.31 ab	2.59 ± 0.43 ab	0.74 ± 0.14 ab		
R4	CK	3.89 ± 0.54 b	4.08 ± 0.50 b	2.21 ± 0.69 ab	1.19 ± 0.33 a	
	T1	3.39 ± 0.58 b	3.58 ± 0.49 b	1.29 ± 0.19 b	1.30 ± 0.43 ab	
	T1 + O	4.87 ± 0.26 a	6.72 ± 0.35 a	2.42 ± 0.14 a	1.62 ± 0.27 a	
	T2	3.62 ± 0.40 b	3.30 ± 0.27 b	1.41 ± 0.13 b	1.49 ± 0.18 ab	
	T2 + O	3.06 ± 0.48 b	3.52 ± 0.37 b	1.58 ± 0.17 ab	0.90 ± 0.18 b	
	T3	3.54 ± 0.32 b	3.39 ± 0.30 b	1.52 ± 0.06 b	1.12 ± 0.30 ab	
	T3 + O	4.41 ± 0.30 b	4.27 ± 0.48 b	2.12 ± 0.23 ab	1.15 ± 0.30 ab	
	T4	3.06 ± 0.48 b	3.73 ± 0.93 b	1.44 ± 0.24 b	0.86 ± 0.13 b	
	T4 + O	3.46 ± 0.50 b	3.62 ± 0.38 b	1.41 ± 0.16 b	0.93 ± 0.16 b	

表 4(续)

生育期	处理	茎	叶	柄	荚	粒
Stage	Treatment	Stem	Leaf	Petiole	Pod	Seed
R6	CK	3.74 ±0.45 d	3.59 ±0.49 cd	1.46 ±0.20 ab	3.63 ±0.34 bed	2.88 ±0.47 c
	T1	5.38 ±0.41 ab	4.70 ±0.25 abc	2.01 ±0.33 ab	5.60 ±0.25 a	5.64 ±0.22 b
	T1 + O	7.67 ±0.44 a	7.55 ±0.64 a	3.45 ±0.34 a	7.73 ±0.43 a	7.73 ±0.26 a
	T2	4.52 ±0.70 bed	5.14 ±0.56 ab	1.54 ±0.31 ab	4.56 ±0.91 ab	6.08 ±1.45 b
	T2 + O	5.59 ±0.60 b	4.55 ±0.32 abc	2.17 ±0.26 b	4.28 ±0.43 abc	3.78 ±0.45 bc
	T3	3.54 ±0.32 d	2.94 ±0.27 d	1.47 ±0.16 ab	2.88 ±0.19 cd	2.52 ±0.40 c
	T3 + O	7.23 ±0.81 a	5.80 ±0.81 a	3.97 ±0.34 a	5.10 ±0.4 6 a	4.59 ±0.73 bc
	T4	2.95 ±0.22 d	2.65 ±0.19 d	1.26 ±0.10 c	2.39 ±0.27 d	2.86 ±0.61 c
	T4 + O	3.87 ±0.49 c	3.85 ±0.29 bed	1.75 ±0.20 ab	3.61 ±0.45 bed	4.61 ±0.60 bc

注:数据为平均数 ± 标准误。不同小写字母表示不同处理之间具有显著性差异($P < 0.05$)。下同。
Note: The data in the table represent the mean ± standard error. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). The same below.

2.4 减肥配施有机肥对大豆干物质分配的影响

由表 5 可知,有机肥配施处理对干物质分配有一定影响。在 R2 期,干物质主要分配到茎、叶,与减肥处理相比,有机肥配施处理的茎、叶干物质分配量显著提高,其中 T3 + O 处理的茎分配量较 CK 处理提高 2.65%。在 R6 期,干物质主要分配到茎、

叶和籽粒,其中 T2 + O 处理的茎分配量较 CK 处理提高 3.00%,T4 + O 处理的籽粒分配量较 CK 处理提高 7.23%。这表明施用有机肥可促进大豆营养器官干物质积累,增强光合作用。同时,能优化生殖器官干物质分配,提高籽粒的干物质占比,为作物的高产奠定基础。

表 5 不同施肥处理下大豆地上部各器官干物质分配

Table 5 Dry matter partitioning of soybean above-ground organs under different fertilizer treatments

单位:%

生育期	处理	茎	叶	柄	荚	粒
Stage	Treatment	Stem	Leaf	Petiole	Pod	Seed
R2	CK	34.76	52.42	12.82		
	T1	36.21	51.73	12.06		
	T1 + O	32.49	52.45	15.06		
	T2	27.53	51.45	20.93		
	T2 + O	31.34	51.34	17.32		
	T3	32.76	52.80	14.44		
	T3 + O	37.41	47.96	14.63		
	T4	33.88	52.57	13.55		
	T4 + O	35.47	50.19	14.34		
R4	CK	34.21	35.88	14.44	10.47	
	T1	35.46	37.45	13.49	13.60	
	T1 + O	31.16	42.99	15.48	10.37	
	T2	36.86	33.60	14.37	15.17	
	T2 + O	33.77	38.85	17.06	9.92	
	T3	36.95	35.39	15.87	11.69	
	T3 + O	36.91	35.73	11.74	9.62	
	T4	33.66	41.04	15.84	9.46	
	T4 + O	36.73	38.43	14.97	9.87	
R6	CK	24.44	23.46	9.54	23.73	18.83
	T1	23.06	20.15	8.62	24.03	24.17
	T1 + O	22.47	22.14	10.11	22.64	22.64

表 5(续)

生育期 Stage	处理 Treatment	茎 Stem	叶 Leaf	柄 Handle	荚 Pod	粒 Seed
	T2	20.70	23.53	7.05	20.88	27.84
	T2 + O	27.44	22.34	10.65	21.01	18.56
	T3	26.52	22.02	11.01	21.57	18.88
	T3 + O	27.09	21.73	14.87	19.11	17.20
	T4	24.46	21.56	10.45	19.82	23.71
	T4 + O	21.88	21.76	9.89	20.41	26.06

2.5 减肥配施有机肥对大豆产量及产量构成因素的影响

由表 6 所示,有机肥配施处理(T1 + O、T2 + O、T3 + O 和 T4 + O)相较于减肥处理,分别使大豆的株高、节数、单株粒重及百粒重等产量构成因素提高,并且使植株的底荚高度降低。T1 + O、T2 + O 和 T3 + O 处理株高较 CK 处理分别显著提高了 14.74%、

10.61% 和 16.49%;T1 + O、T2 + O 和 T4 + O 处理百粒重较 CK 分别提高了 8.61%、5.94% 和 4.28%。有机肥配施处理(T1 + O、T2 + O、T3 + O 和 T4 + O)的产量与 CK 相比分别提高了 3.58%、10.48%、12.97% 和 8.59%。表明有机肥配施可改善土壤环境,更有利于提高大豆株高和单株粒数,降低大豆底荚高,从而获得较高产量。

表 6 不同施肥处理下大豆产量及产量构成因素

Table 6 Soybean yield and yield components under different fertilizer treatments

处理 Treatment	株高 Plant height/ cm	底荚高度 Bottom pod height/cm	节数 Nodes number	单株粒重 Seeds weight per plant/g	百粒重 100-seed weight/g	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)
CK	61.88 ± 4.25 a	18.12 ± 1.97 a	13.63 ± 0.31 a	7.23 ± 0.23 bc	18.01 ± 0.05 b	2660.90 ± 84.81 bc
T1	57.15 ± 1.81 a	15.62 ± 1.57 a	12.56 ± 0.24 b	7.07 ± 0.22 bc	18.46 ± 0.61 b	2604.94 ± 80.10 abc
T1 + O	69.29 ± 3.00 a	20.75 ± 1.11 a	13.38 ± 0.06 ab	7.48 ± 0.16 bc	19.56 ± 0.21 a	2756.26 ± 57.87 bc
T2	64.92 ± 3.96 a	20.83 ± 3.17 a	12.81 ± 0.10 ab	6.99 ± 0.33 bc	18.80 ± 0.07 ab	2572.69 ± 121.61 bc
T2 + O	65.05 ± 2.51 a	14.09 ± 4.58 a	13.47 ± 0.29 ab	8.30 ± 0.28 ab	19.08 ± 0.26 ab	3056.05 ± 103.07 ab
T3	57.36 ± 6.55 a	18.25 ± 1.38 a	13.39 ± 0.51 ab	6.96 ± 0.75 bc	18.02 ± 0.33 b	2565.06 ± 277.72 bc
T3 + O	70.58 ± 5.31 a	17.82 ± 2.55 a	13.66 ± 0.48 a	8.89 ± 0.44 a	18.67 ± 0.38 ab	3272.23 ± 161.89 a
T4	58.81 ± 1.22 a	18.36 ± 1.18 a	12.93 ± 0.03 ab	6.85 ± 0.41 c	18.25 ± 0.32 b	2522.03 ± 152.07 c
T4 + O	59.80 ± 4.07 a	16.88 ± 1.16 a	13.11 ± 0.31 ab	7.85 ± 0.46 abc	18.78 ± 0.37 ab	2889.61 ± 168.70 abc

2.6 减肥配施有机肥对大豆品质的影响

由表 7 可知,各有机肥配施处理间的大豆蛋白质含量无显著性差异,肥料配施处理(T1 + O 和 T4 + O)相较于减肥处理(T1 和 T4)分别提高了 1.24% 和 1.55%;肥料配施处理(T2 + O、T3 + O 和 T4 + O)较 CK 分别提高了 1.71%、1.71% 和 4.27%。各肥料配施处理间的大豆脂肪含量无显著性差异,T1 处理相较于 T1 + O 处理脂肪含量显著增加了 2.76%。各肥料配施处理与 CK 无显著性差异,以 T1 + O 处理的脂肪含量最高,相较于 CK 增加了 13.77%。结果表明,有机肥与化肥配合施用可以影响大豆品质,提高大豆籽粒的蛋白质含量,但对脂肪含量有一定的抑制作用。

表 7 不同施肥处理下大豆的品质

Table 7 Soybean quality under different fertilizer treatments

单位:%

处理 Treatment	蛋白质 Protein content	脂肪 Oil content
CK	39.10 ± 0.06 a	20.43 ± 0.03 bc
T1	38.22 ± 0.12 c	21.20 ± 0.06 a
T1 + O	38.70 ± 0.06 ab	20.63 ± 0.03 ab
T2	38.70 ± 0.12 ab	20.43 ± 0.06 bc
T2 + O	39.17 ± 0.15 a	20.19 ± 0.13 c
T3	38.97 ± 0.03 ab	20.40 ± 0.06 bc
T3 + O	39.17 ± 0.07 a	20.27 ± 0.03 bc
T4	38.67 ± 0.03 b	20.66 ± 0.03 ab
T4 + O	39.27 ± 0.13 a	20.31 ± 0.06 bc

2.7 产量构成因素与产量的主成分分析

根据大豆产量及产量构成因素的主成分分析(图4)可以看出,向 PC1(主成分1)轴作垂线,底荚高度、节数、株高和单株粒重等参数在 PC1 正轴加权,且单株粒重载荷系数较大,因此单株粒重对 PC1 影响相对较大,PC1 主要反映作物产量。分析可知节数、株高和单株粒重贡献率最大,关系最为密切。底荚高度、节数和株高沿 PC2(主成分2)正轴加权,载荷系数越大则影响相对越大,因此 PC2 主要反映作物形态,底荚高度在 PC2 上贡献率最大,节数和株高关系最为密切(以上所有指标均在 95% 置信区间之内)。由主成分分析可知单株粒重在作物生长过程中对产量贡献率及相关性最大。底荚高度与作物形态的相关性最大,节数、株高和单株粒重在产量及形态关系中呈正相关关系。

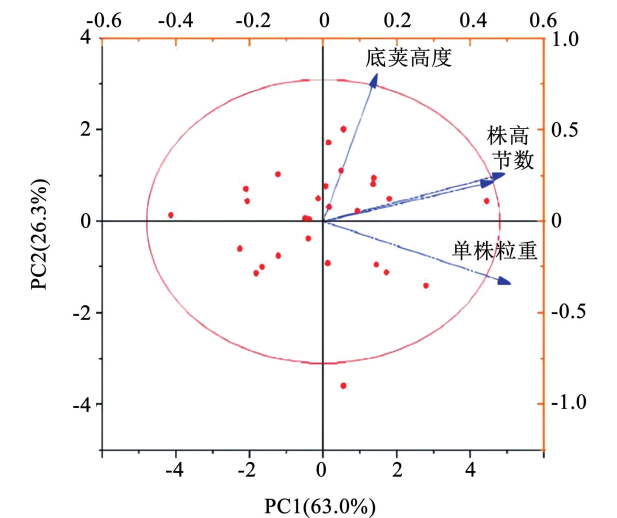


图4 产量构成因素与产量的主成分分析
Fig.4 Principal component analysis of yield components and yield

3 讨论

有机肥料富含腐殖质及植物生长所需的各种养分和大量有益微生物,能够有效促进植物生长。有机肥由于效率高、无污染等特点,对提高作物生长发育、高质高产和土地资源保护等方面具有重要意义。叶绿素含量与植株光合荧光效能及库区器官物质积累密切相关^[16],本研究发现,通过有机肥配施处理相较于减肥处理可显著提升轮作模式下大豆叶绿素含量,延缓 R6 期叶片衰老,保障了籽粒建成关键时期光合产物的供应,显著提高光合生产力能力^[17],促进作物增产。这可能是因为施加有机肥改善了大豆生育前期的根系生长环境,改善土壤紧实度和土壤 pH 值,促进了土壤矿质化作用,加速土壤速效养分的生成,提供可以保障生育后期的充

足养分,抑制遭遇干旱时活性氧的产生和特定衰老相关基因表达^[18]。

裴润根^[19]研究表明,增施有机质含量较高的肥料和减少施用化肥可以提高晚稻的株高和茎粗。刘星等^[20]对马铃薯的研究结果表明,有机无机配施促进了作物的生长,增加了植株上的叶片数量。本研究通过对植株形态参数分析表明,有机肥配施处理在不同程度上增加了植株的生长发育性状指标,说明有机肥替代化肥能提供充足的养分,促进植株的生长。

干物质积累与分布是作物适应土壤、气候等环境因素能力的重要体现。研究表明,化肥和有机肥可为作物提供满足整个生命周期所需的养分,有利于增加作物的干物质积累^[21,22]。本研究通过施用有机肥促进营养物质从营养器官向生殖器官转移,为提高产量创造了基础条件,其中,以 T3 + O 处理对植株生长发育促进效果为最佳。T3 + O 处理显著提高了作物生长后期籽粒干物质比例,地上部较生长旺盛,难以较好向块根转。可见,本研究中施用有机肥并减少化肥用量对干物质积累的影响与前人的研究结果大体相同,这是因为有机肥的施用减少了传统化学肥料用量,在调节土壤中的养分比例的同时,平衡了作物的碳氮比,进而增强了植物的抗逆性。有研究认为,有机肥促进干物质积累和转移的主要原因是有机肥能够延缓功能叶片的衰老,提高光合作用^[23],进而促进作物的生长发育^[24]。本研究发现各器官干物质积累量均随着有机肥施用呈现增加的趋势,但由于过量施用有机肥会使土壤内的有机物质积累过剩,使作物无法利用过剩的有益微生物,与此同时,土壤承载能力有限^[25],作物对养分的吸收也存在一个最佳阈值,使其生长量不会随着施肥量的增加而无限地增加,干物质积累也不可能无限地增加。因此,控制有机肥的合理施用对作物生长、干物质积累和土壤资源的可持续发展至关重要。

在本研究中,化肥与有机肥配合施用能提高作物产量,与以往结果相似,主要原因是化肥与有机肥搭配能更好地释放有机酸,增加微生物数量和微生物活性,使化肥和水分更容易被吸收利用。更能满足作物在各个季节的营养需求,从而更容易提高作物产量,与常规化肥处理下的大豆相比,施用有机肥的大豆在株高、荚数和百粒重等指标上都有一定程度的提高。梁啸天等^[26]对微生物叶面肥对大豆的影响进行了研究,发现施用微生物叶面肥使大豆的百粒重增加约 4%,每株的粒重增加约 10%。赵念力等^[27]发现,用俄罗斯高产根瘤菌肥料处理大

豆时,大豆发育后期的百粒重增加了约 13% 以上。任廷虎等^[28]研究表明,50% 的有机氮和 50% 的无机氮管理,产量和效益的提高最为明显,这与本研究的结果一致。由于栽培作物种类、添加的有机肥类型和肥量以及试验地点和气候的不同,有机肥的效果在不同的试验中也有所不同。同时,本研究通过田间试验发现,化肥配施有机肥促进产量提高主要是由单株粒数、单株荚数及单株粒重提高造成。因此,增加或保持较多的单株荚数及单株粒数是增加大豆产量的关键,李国清等^[29]的研究也得出相似结果。

本研究发现减少化肥的同时合理施用有机肥,对作物品质有明显的影响,不过也不排除可能产生反向作用。王梦亮等^[30]对黄河滩的红枣喷洒光合杀菌剂、生物高钙菌剂和光合菌剂加生物高钙菌剂,枣果的品质和枣果的 VC、可溶性糖含量都明显提高。而大豆的品质通常用蛋白质和脂肪含量来衡量,要提高大豆的品质,就必须提高大豆籽粒的蛋白质和脂肪含量。朱宝国等^[31]和辛大伟等^[32]研究显示,有机-无机配施通过提高氮的吸收率来提高大豆的蛋白质含量,同时降低大豆的脂肪含量,这与本试验研究的结果一致。一些研究也表明,大豆的蛋白质和脂肪含量之间存在负相关关系^[33]。本研究结果表明,有机肥配施处理提高了大豆的蛋白质含量,但对大豆的脂肪含量有抑制作用。

4 结论

减施化肥配合有机肥可提高大豆植株的光合性能,增加叶片 SPAD 含量,同时具有促进干物质积累和增产的作用。施用有机肥后,植株的干物质积累和产量呈上升趋势,T3 + O 处理的表现更好,在大豆 R4 阶段,其 SPAD 含量比 CK 处理增加了 15.79%。同时,有机肥配施能更好地调节作物干物质的分布和运输,使 T3 + O 处理的大豆产量比 CK 处理提高 12.97%。综上所述,在黑龙江垦区玉豆轮作制度下,采用 T3 + O 的施肥方法可实现产量和品质的双提高。

参考文献

[1] 李丹丹. 黑河市耕地地力评价与土壤改良对策研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
LI D D. Study on evaluation of cultivated land fertility and countermeasures of soil improvement in Heihe City[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018.

[2] 张崎峰. 种植结构调整后黑河地区玉米产业发展现状[J]. 黑龙江农业科学, 2019(12): 123-125.
ZHANG Q F. Development status of maize industry in Heihe after

adjustment of planting structure[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2019(12): 123-125.

[3] 张崎峰. 黑河地区玉米产业发展现状及对策[J]. 黑龙江农业科学, 2020(6): 103-106.
ZHANG Q F. Present situation and countermeasures of maize industry development in Heihe Region[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2020(6): 103-106.

[4] 鄂丽丽, 胡伟, 谷思玉, 等. 黑土农田极端侵蚀对土壤质量及作物产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 142-149, 172.
E L L, HU W, GU S Y, et al. Effects of extreme soil erosion on soil quality and crop yield in mollisols farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(2): 142-149, 172.

[5] 刘燕, 刘伟, 姜妍, 等. 黑龙江省三十年间粮食作物生产变化对大豆生产的影响[J]. 大豆科技, 2022(4): 38-46, 60.
LIU Y, LIU W, JIANG Y, et al. Impacts of changes in grain crop production on soybean production during three decades in Heilongjiang Province[J]. Soybean Science and Technology, 2022(4): 38-46, 60.

[6] 钟鑫. 开垦方式对黑土农田耕地质量的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021.
ZHONG X. Effect of reclamation methods on cultivated land quality of black soil farmland[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2021.

[7] 孙克刚, 朱洪勋, 李贵宝, 等. 长期不同施肥措施对持续农业发展的影响[J]. 干旱地区农业研究, 1996, 14(2): 31-35, 58.
SUN K G, ZHU H X, LI G B, et al. The effect of long-term and different measures of fertilizer applications upon the development of sustained agriculture[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1996, 14(2): 31-35, 58.

[8] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008-1010.

[9] 叶盛嘉, 郑晨萌, 张影, 等. 氮肥减量配施有机肥对豫中地区冬小麦-夏玉米轮作生产力和土壤性质的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(6): 900-912.
YE S J, ZHENG C M, ZHANG Y, et al. Effects of nitrogen fertilizer reduction and organic fertilizer application on productivity and soil properties of winter wheat-summer corn rotation in central Henan[J]. Chinese Journal of Ecological Agriculture, 2022, 30(6): 900-912.

[10] LI H, FENG W T, HE X H, et al. Chemical fertilizers could be completely replaced by manure to maintain high maize yield and soil organic carbon (SOC) when SOC reaches a threshold in the NorthEast China Plain[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(4): 937-946.

[11] ENNIN S A, CLEGG M D. Effect of soybean plant populations in a soybean and maize rotation[J]. Agronomy Journal, 2001, 93(2): 396-403.

[12] 李文娇, 杨殿林, 赵建宁, 等. 长期连作和轮作对农田土壤生物学特性的影响研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(3): 173-178.
LI W J, YANG D L, ZHAO J N, et al. Progress on effects of long-term continuous cropping and rotation systems on farmland soil biological characteristics[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(3): 173-178.

[13] 朱英波, 史凤玉, 张瑞敬, 等. 黑龙江大豆轮作和连作土壤细

菌群落多样性比较[J]. 植物保护学报, 2014, 41(4): 403-409.

ZHU Y B, SHI F Y, ZHANG R J, et al. Comparison of bacterial diversity in rotational and continuous soybean cropping soils in Heilongjiang[J]. Journal of Plant Protection, 2014, 41(4): 403-409.

[14] 朱宝国, 朱凤莉, 张春峰, 等. 中微肥对大豆农艺性状、产量及品质的影响[J]. 大豆科学, 2014, 33(4): 550-553.

ZHU B G, ZHU F L, ZHANG C F, et al. Effect of medium and micro fertilizers on soybean's agronomic characters, yield and quality[J]. Soybean Science, 2014, 33(4): 550-553.

[15] 朱宝国, 匡恩俊, 滕占林, 等. 不同生物有机肥配施化肥对大豆植株生长、抗病及产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2023, 60(5): 1127-1133.

ZHU B G, KUANG E J, TENG Z L, et al. Effects of different bio-organic fertilizers application combined with conventional fertilization on growth, disease resistance and yield of soybean[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2023, 60(5): 1127-1133.

[16] 张伟明, 管学超, 黄玉威, 等. 生物炭与化学肥料互作的大豆生物学效应[J]. 作物学报, 2015, 41(1): 109-122.

ZHANG W M, GUAN X C, HUANG Y W, et al. Biological effects of biochar and fertilizer interaction in soybean plant[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(1): 109-122.

[17] 吴迪, 袁鹤肿, 顾闻琦等. 生物炭介导的连作大豆光合生理代谢及产量响应[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(1): 37-45.

WU D, YUAN H C, GU W Q, et al. Biochar-mediated photosynthetic metabolism and yield response in continuous soybean[J]. Journal of Agricultural and Environmental Sciences, 2023, 42(1): 37-45.

[18] 徐锐. 提高光合作用效率可使大豆增产 20% [N]. 中国科学报, 2022-08-23(002).

XU R. Improving photosynthetic efficiency can increase soybean yield by 20% [N]. China Science Daily, 2022-08-23(002).

[19] 裴润根. 增施有机肥和化肥减量施用效果[J]. 江西农业, 2017(3): 24, 27.

PEI R G. Effect of increasing organic fertilizer and decreasing chemical fertilizer application[J]. Jiangxi Agriculture, 2017(3): 24, 27.

[20] 刘星, 张书乐, 刘国锋, 等. 土壤熏蒸-微生物有机肥联用对连作马铃薯生长和土壤生化性质的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(3): 122-133.

LIU X, ZHANG S L, LIU G F, et al. Soil fumigation and bio-organic fertilizer application promotes potato growth and affects soil bio-chemical properties in a continuous cropping system[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(3): 122-133.

[21] 谷思玉, 刘爽, 孙佳珩, 等. 施用不同种类尿素对大豆氮素积累及氮素利用率的研究[J]. 大豆科学, 2013, 32(5): 655-658.

GU S Y, LIU S, SUN J Y, et al. Studies on nitrogen accumulation and nitrogen utilization of soybean by applying different types of urea[J]. Soybean Science, 2013, 32(5): 655-658.

[22] FANG H, HAN Y L, YIN Y M, et al. Microbial response to repeated treatments of manure containing sulfadiazine and chlortetracycline in soil[J]. Journal of Environmental Science and Health Part B, Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes, 2014, 49(8): 609-615.

[23] DE VRIES W, BREEUWSMA A. The relation between soil acidification and element cycling [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1987, 35(3): 293-310.

[24] 王飞. 盐分对土壤微生物多样性及土壤有机物转化的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2011.

WANG F. Study on soil microbial molecular diversity and organic matter transformation under soil salinization condition [D]. Shihezi: Shihezi University, 2011.

[25] 闫逊. 铀尾矿土壤环境放射性核素的浓度分布及其对土壤微生物多样性的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.

YAN X. Migration and distribution of radionuclide in uranium tailing soil and the effects of radionuclide on soil microbial diversity [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015.

[26] 梁啸天, 蒋高明. 不同叶面肥对夏大豆主要农艺性状的影响[J]. 山东农业科学, 2016, 48(8): 85-88.

LIANG X T, JIANG G M. Effects of different foliar fertilizers on main agronomic characters of summer soybean [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2016, 48(8): 85-88.

[27] 赵念力, 谷维, 张俐俐, 等. 俄罗斯高效大豆根瘤菌肥对大豆主要性状及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(1): 72-73.

ZHAO N L, GU W, ZHANG L L, et al. Effects of high-efficiency rhizobia fertilizer on soybean main traits and yield in Russia[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2014, 42(1): 72-73.

[28] 任廷虎, 李宗尧, 杜斌, 等. 有机肥施用及合理密植提高黄淮海地区夏大豆光系统性能与籽粒产量[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(8): 1361-1375.

REN T H, LI Z Y, DU B, et al. Improving photosynthetic performance and yield of summer soybean by organic fertilizer application and increasing plant density [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(8): 1361-1375.

[29] 李国清, 丛新军, 李国瑜, 等. 鲁中地区肥料与根瘤菌合理配施对大豆生长的影响[J]. 大豆科学, 2021, 40(5): 682-687.

LI G Q, CONG X J, LI G Y, et al. Effects of rational combined application of fertilizer and Rhizobium on soybean in central Shandong Province [J]. Soybean Science, 2021, 40(5): 682-687.

[30] 王梦亮, 苏俊萍, 王俊宏, 等. 叶面喷施微生物菌剂对黄河滩红枣生理和品质的影响[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2012, 35(3): 568-571.

WANG Mengliang, SU Junping, WANG Junhong, et al. Effects of foliar spraying of microbial fungi on the physiology and quality of red jujube in the Yellow River Bank [J]. Journal of Shanxi University (Natural Science Edition), 2012, 35(3): 568-571.

[31] 朱宝国, 朱凤莉, 张春峰, 等. 中微肥对大豆农艺性状、产量及品质的影响[J]. 大豆科学, 2014, 33(4): 550-553.

ZHU B G, ZHU F L, ZHANG C F, et al. Effect of medium and micro fertilizers on soybean's agronomic characters, yield and quality[J]. Soybean Science, 2014, 33(4): 550-553.

[32] 辛大伟, 陈庆山, 单继勋, 等. 不同大豆品种品质性状的动态积累[J]. 东北农业大学学报, 2006, 37(5): 592-595.

XIN D W, CHEN Q S, SHAN J X, et al. Research on quality dynamic accumulation of different soybean varieties[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2006, 37(5): 592-595.

[33] 魏丹, 蔡姗姗, 王伟, 等. 黑土肥力与大豆产量及品质的通径分析[J]. 大豆科学, 2021, 40(1): 89-97.

WEI D, CAI S S, WANG W, et al. Path analysis on black soil fertility via soybean yield and quality[J]. Soybean Science, 2021, 40(1): 89-97.