



化肥配施复合微生物肥对大豆养分积累及产量和品质的影响

傅晨野¹, 李多¹, 滕思远¹, 金喜军¹, 张玉先^{1,2}, 曹亮¹, 王孟雪¹

(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:为了明确东北北部地区复合微生物肥对大豆生长及产量和品质的影响,于2021和2022两年选用金源55(P1)及克山1号(P2)作为供试大豆品种,设置常规施肥CK(T1)、50%氮肥+复合微生物肥(T2)、无氮肥+复合微生物肥(T3)共3个处理。对比研究不同施肥处理对大豆不同时期干物质质量、养分积累量及产量的影响。结果表明:与T1处理相比,T2处理提高了大豆对氮、磷、钾的养分吸收量,两个品种中都以T2处理养分利用效率最高。复合微生物肥替代化肥处理(T2、T3)使大豆的蛋白质品质有显著提升,但对大豆脂肪含量有明显抑制效果,其中T1处理脂肪含量显著高于T2和T3处理。2021年,在金源55(P1)中,T2处理大豆产量较T1提高了13.02%,T3处理大豆产量较T1降低了9.34%。在克山1号(P2)中,T2处理大豆产量较T1提高了5.34%,T3处理大豆产量较T1降低了9.26%。2022年,金源55(P1)T2处理大豆产量较T1提高了12.60%,T3处理大豆产量较T1降低了17.23%。克山1号(P2)T2处理大豆产量较T1提高了20.43%,T3处理大豆产量较T1降低了11.41%。综上所述,两年试验表明,大豆产量与品种选用相关性较低,与施肥梯度相关性较高,大豆产量大小取决于复合微生物肥的施用量,在低量复合微生物肥施用条件下,化肥作用比较显著,反之化肥作用下降。本研究为大豆种植中复合微生物肥合理使用提供理论依据。

关键词:大豆;复合微生物肥;养分积累量;产量;品质

Effects of Chemical Fertilizer Combined with Compound Microbial Fertilizer on Nutrient Accumulation, Yield, and Quality of Soybean

FU Chenye¹, LI Duo¹, TENG Siyuan¹, JIN Xijun¹, ZHANG Yuxian^{1,2}, CAO Liang¹, WANG Mengxue¹

(1. Agricultural College, Heilongjiang Bayi Agricultural Reclamation University, Daqing 163319, China; 2. National Cereals Engineering Technology Center, Daqing 163319, China)

Abstract: In order to elucidate the effects of compound microbial fertilizer on soybean growth and yield in the northern region of Northeast China, two soybean varieties, Jinyuan 55 (P1) and Keshan 1 (P2), were selected for the experiments conducted in 2021 and 2022. Three treatment groups were established: T1 (conventional fertilization CK), T2 (50% nitrogen fertilizer + complex microbial fertilizer), and T3 (without nitrogen fertilizer + complex microbial fertilizer). The objective was to compare the effects of different fertilization treatments on dry matter quality, nutrient accumulation, and soybean yield at various stages, in order to provide a theoretical basis for the rational use of compound microbial fertilizer in soybean cultivation. The results indicated that, compared to the T1 treatment, the T2 treatment led to increased nutrient uptake by the soybean, particularly nitrogen, phosphorus, and potassium. Furthermore, the T2 treatment exhibited the highest nutrient utilization efficiency across both soybean varieties. In contrast to the chemical fertilizer treatments (T2 and T3), the compound microbial fertilizer significantly improved the protein quality of soybeans. However, it also significantly inhibited the fat content of soybeans, with the fat content being notably higher in the T1 treatment compared to the T2 and T3 treatments. In 2021, for the Jinyuan 55 (P1) variety, the soybean yield under the T2 treatment increased by 13.02% compared to the T1 treatment, while it decreased by 9.34% under the T3 treatment. Similarly, for the Keshan 1 (P2) variety, the soybean yield under the T2 treatment increased by 5.34% compared to the T1 treatment, while it decreased by 9.26% under the T3 treatment. In 2022, the soybean yield of the Jinyuan 55 (P1) variety under the T2 treatment was 12.60% higher than that under the T1 treatment, whereas it was 17.23% lower under the T3 treatment. For the Keshan 1 (P2) variety, the soybean yield under the T2 treatment increased by 20.43% compared to the T1 treatment, while it decreased by 11.41% under the T3 treatment. To summarize, the two-year experiment revealed that soybean yield exhibited a weak correlation with variety selection but a strong correlation with the fertilization gradient. Moreover, soybean yield was dependent on the application rate of compound microbial fertilizer. Under conditions of low application rates of compound microbial fertilizer, the effect of chemical fertilizer was more pronounced; however, its efficacy diminished as the application rate of compound microbial fertilizer increased. This study provides a theoretical basis for the rational use of compound microbial fertilizer in soybean cultivation.

Keywords: soybean; compound microbial fertilizer; nutrient accumulation; yield; quality

收稿日期: 2023-05-18

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFD1500105); 基于肥炭配施的大豆综合高产栽培技术与示范(2022103); 黑龙江八一农垦大学研究生科研创新资助项目(YJSCX2021-NXY10)。

第一作者: 傅晨野(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤肥料及植物营养研究。E-mail: 781995089@qq.com。

通讯作者: 王孟雪(1978—), 女, 博士, 副教授, 主要从事农业生态节水研究。E-mail: Wangmengxue1978@163.com。

大豆生产过程中不可或缺的一环是施肥^[1],这一环节能够直接作用于大豆产量及品质的提升。复合微生物肥是一种利用多种有益微生物的共生关系促进植物生长和提高农作物产量的肥料^[2],复合微生物肥中有机酸、腐殖质等营养物质含量十分丰富,不但能够更好利用肥料及优化品质^[3],还能使土壤结构进一步改善,增进地力,促进农业生态环境保护^[4]。首先,复合微生物肥能够提高大豆的养分吸收和积累能力。其中包括一些固氮菌,它们能够与大豆根系共生,将空气中的氮转化为植物可利用的形式^[5]。一些产生溶磷酸酯酶的菌株也能促进土壤中磷的溶解,并使其更易被大豆吸收^[6]。这些有益微生物通过与大豆根系形成共生关系,为大豆提供额外的养分来源,从而增加养分积累和植物生长速度。其次,复合微生物肥还能提高大豆的产量,通过与大豆根系形成共生关系,促进植物生长和发育。它们分泌的生长调节物质能够刺激大豆植株的生长,增加根系吸收养分的能力,并提高植物的抗病抗虫能力^[3]。最后,复合微生物肥还能改善大豆的品质。朱宝国等^[7]和辛大伟等^[8]研究表明,利用有机肥处理的大豆在蛋白质含量、氨基酸组成、油脂含量和矿物质含量等方面表现出更好的品质特性。这是因为这些有益微生物可以促进植物的代谢活性,增加养分吸收和利用效率,并提高植物的抗氧化能力^[9]。同时,复合微生物肥还可以降低大豆生长过程中的重金属污染和农药残留,减少对环境的负面影响,从而提高大豆的品质^[10]。

但李鸣雷等^[11]的研究则指出,有机质较高的肥料可以同时提高大豆籽粒的蛋白质和脂肪含量,不过需要更长的试验时间来验证这一结果。综上所述,复合微生物肥对大豆的养分积累、产量和品质具有显著影响。通过与大豆根系形成共生关系,这些有益微生物刺激植物的生长和代谢过程,提高养分吸收和利用效率,增加大豆的产量和品质。然而,复合微生物肥的应用还需要进一步的研究和实践验证,以优化配方、确定最佳施用时机和剂量,使其在大豆生产中发挥更大的潜力。

为明确东北北部地区复合微生物肥对大豆生长及产量和品质的影响,本研究选用金源 55(P1)及克山 1 号(P2)作为试验材料,设置不同肥料处理,对比研究不同施肥处理对大豆不同时期干物质质量、养分积累量及产量的影响,为大豆种植中复合微生物肥的合理使用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于 2021 和 2022 年于黑龙江省黑河市九三地区鹤山农场试验田进行,地处 48°43′~49°03′N, 124°56′~126°21′E,属寒温带大陆性气候,年平均气温 1.8℃,年有效积温 2 000~2 450℃,年平均降雨量 550 mm,年平均无霜期 121 d,试验地 2021 和 2022 年 5—10 月平均气温与降雨量情况如图 1 所示。土壤类型为黑土,呈弱酸性,试验地 0~20 cm 土层基本理化性质如表 1 所示。

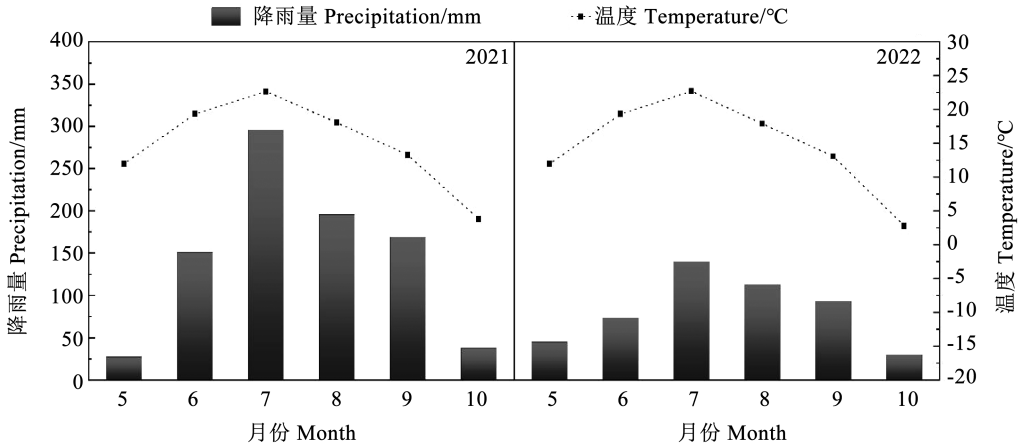


图 1 2021—2022 年温度与降雨量

Fig. 1 The temperature and rainfall in 2021 and 2022

表 1 0~20 cm 土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the 0-20 cm soil layer

年份 Year	pH	碱解氮 Alkali-hydrolyzed nitrogen/(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/ (mg·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)
2021	6.30	141.80	30.60	180.00	17.94	1.26
2022	6.14	137.92	21.79	177.35	15.30	1.18

1.2 材料

1.2.1 供试品种 供试大豆品种为金源 55(P1) 和克山 1 号(P2)。金源 55(P1), 北方春播生育期平均 115 d, 白花、株型收敛、有限结荚习性, 高蛋白品种, 脂肪含量较低, 在黑河地区有一定种植基础。克山 1 号(P2), 生育期 112 d, 长叶、紫花、亚有限结荚习性, 高脂肪品种, 蛋白质含量较低, 为当地主要栽培品种。

1.2.2 供试肥料 施用的复合微生物肥由兆丰和美公司提供, 有机质含量≥20%, 有效活菌数≥0.2 亿·g⁻¹, 总养分含量(N+P₂O₅+K₂O≥8%, 比例为 2:2:1)。开沟播种采用机械, 人工施肥, 施肥深度

10 cm 覆土, 然后播种, 种子在肥侧上方 7~8 cm。

1.3 试验设计

采用单因素完全随机区组设计, 共设 3 个处理, 3 次重复。采用小区对比法, 小区设置为 8 行区, 垄长 6 m, 垄宽 0.65 m, 小区面积 31.2 m², 大豆种植密度为 35 万~40 万株·hm⁻²。以当地施肥水平为基准, 施用纯氮 54 kg·hm⁻²、纯磷 67.5 kg·hm⁻²、纯钾 37.5 kg·hm⁻²。分别设置处理 T1(常规施肥不添加复合微生物肥)、处理 T2(50% 氮肥+复合微生物肥)、处理 T3(无氮肥+复合微生物肥)。施肥方法为一次性人工施入基肥, 具体试验处理如表 2 所示。

表 2 具体施肥配置
Table 2 Specific fertilization configuration

处理 Treatment	尿素 Urea/ (kg·hm ⁻²)	重过磷酸钙 Heavy superphosphate calcium/(kg·hm ⁻²)	氯化钾 Potassium chloride/ (kg·hm ⁻²)	复合微生物肥 Compound microbial fertilizer/(kg·hm ⁻²)	总氮量 Total nitrogen/ (kg·hm ⁻²)	总磷量 Total phosphorus content/ (kg·hm ⁻²)	总钾量 Total potassium/ (kg·hm ⁻²)
T1(CK)	175.95 (54.0)	229.95 (67.5)	112.5 (37.5)	0	54	67.5	37.5
T2	87.90 (27.0)	137.85 (40.5)	72.0 (24.0)	2023.95 (1.3:1.3:0.6)	54	67.5	37.5
T3	0 (0)	15.30 (4.5)	27.0 (9.0)	4048.05 (1.3:1.3:0.6)	54	58.5 (30.7)	36.0 (4.5)

注: 括号里为化肥中 N、P₂O₅、K₂O 含量, 在化肥减少后用复合微生物肥补足其 N、P₂O₅、K₂O 含量, T3 处理中复合微生物肥所欠缺的磷钾含量, 再用下方括号化肥量补足, 使 3 个处理间不会因施用肥料变化而改变 N、P₂O₅、K₂O 含量。复合微生物肥下方括号里为氮、磷、钾元素比例。

Note: The contents of N, P₂O₅ and K₂O in the fertilizer are shown in the brackets. After the reduction of the fertilizer, the contents of N, P₂O₅ and K₂O in the fertilizer are made up by composite microbial fertilizer. The lack of phosphorus and potassium in the composite microbial fertilizer in the T3 treatment is made up by the fertilizer amount below the parentheses, so that the contents of N, P₂O₅ and K₂O in the three treatments will not be changed due to the change of fertilizer application. The ratio of nitrogen, phosphorus and potassium elements in brackets under composite microbial fertilizer.

1.4 测定项目及方法

1.4.1 大豆干物质含量 于大豆盛花期、盛荚期、鼓粒中期将各器官按根、茎、叶、柄、荚皮、籽粒部位分类后装进牛皮纸信封中, 同时送入 105℃ 烘箱中杀青 30 min, 再调至 80℃ 烘至水分完全丧失, 统一称量各部位干重, 每个处理 6 次重复。

1.4.2 大豆各器官氮、磷、钾素及籽粒品质 将烘干后的大豆植株样品粉碎后过筛, 采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮法^[12] 制成备用待测液, 采用凯氏定氮法^[12] 测定氮元素含量; 采用钼锑抗比色法^[12] 测定磷元素含量; 采用火焰光度计法^[12] 测定钾元素含量, 每个处理 6 次重复。

籽粒品质测定: 采用 GB/T24870-2010 近红外法^[13] 测定大豆蛋白质和脂肪含量, 每个处理 6 次重复。

1.4.3 产量及产量构成因素 于大豆成熟期, 每个

小区选取 1 m² 的大豆进行考种, 选取长势一致的 10 株大豆样品测定株高、茎粗、单株粒数、单株荚数、单株粒重、百粒重等产量构成因子, 按 13% 的含水量折算出小区的实际产量。

1.5 数据分析

采用 Excel 2016 软件进行数据处理, 采用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析及 Duncan 检验。

2 结果与分析

2.1 化肥配施复合微生物肥对大豆干物质质量的影响

如表 3 所示, 在 2021 年试验中金源 55(P1): 盛花期, 根、茎、柄和叶干重处理间差异不显著; 盛荚期, P1T2 处理茎、柄、叶部干重显著高于 P1T1 处理(P<0.05); 鼓粒中期, 根、叶部处理间无显著差异, 而茎、柄、叶、荚皮和籽粒部 P1T2 处理均显著高于

P1T1 处理($P < 0.05$);成熟期,各部位处理间差异不显著。而克山 1 号(P2):盛花期,处理间差异不显著;盛荚期,根、茎部 P2T1、P2T3 处理间差异显著, P2T3 处理显著低于 P2T1 处理($P < 0.05$);鼓粒中期,柄部 P2T3 处理均显著低于 P2T1 处理,荚皮部 P2T2 处理均显著高于 P2T1 处理($P < 0.05$),其余部位处理间无显著差异;成熟期,茎和荚皮部 P2T2 处理均显著高于 P2T1 处理($P < 0.05$)。

表 3 化肥配施复合微生物肥对大豆干物质质量的影响

Table 3 Effects of chemical fertilizer with microbial fertilizer complex on dry matter quality of soybean								
年份 Year	生育期 Growth period	处理 Treatment	根 Root/g	茎 Stem/g	柄 Petiole/g	叶 Leaf/g	荚或荚皮 Pod or pod skin/g	籽粒 Seed/g
2021	盛花期 Blooming stage	P1T1	4.03 ± 0.49 a	5.60 ± 0.15 a	2.71 ± 0.15 a	6.59 ± 0.22 a		
		P1T2	3.22 ± 1.07 a	5.58 ± 1.14 a	2.76 ± 0.36 a	8.31 ± 1.60 a		
		P1T3	3.74 ± 1.22 a	5.96 ± 0.80 a	3.12 ± 0.68 a	8.83 ± 1.40 a		
		P2T1	4.21 ± 0.72 a	4.69 ± 0.61 a	2.18 ± 0.48 a	5.72 ± 1.20 a		
		P2T2	2.73 ± 0.73 a	6.01 ± 2.00 a	3.17 ± 1.31 a	8.60 ± 2.40 a		
		P2T3	2.77 ± 0.56 a	5.19 ± 0.93 a	2.61 ± 1.03 a	7.30 ± 2.00 a		
	盛荚期 Full pod stage	P1T1	2.96 ± 0.64 a	4.88 ± 0.45 b	2.92 ± 0.25 b	3.98 ± 0.64 b	0.51 ± 0.22 a	
		P1T2	3.42 ± 0.50 a	7.00 ± 1.11 a	4.47 ± 0.64 a	6.63 ± 0.95 a	0.84 ± 0.22 a	
		P1T3	3.40 ± 0.95 a	5.65 ± 1.30 ab	3.59 ± 0.67 ab	4.98 ± 1.01 b	1.00 ± 0.42 a	
		P2T1	5.29 ± 1.49 a	7.12 ± 2.35 a	4.43 ± 1.89 a	6.01 ± 2.70 a	0.93 ± 0.42 a	
		P2T2	4.31 ± 0.80 ab	5.89 ± 0.79 ab	3.75 ± 0.60 a	4.77 ± 0.26 a	0.73 ± 0.29 a	
		P2T3	3.25 ± 1.00 b	4.03 ± 1.25 b	2.38 ± 0.80 a	4.47 ± 2.06 a	0.72 ± 0.30 a	
	鼓粒中期 Mid seed filling stage	P1T1	3.51 ± 0.82 a	6.24 ± 1.60 b	2.36 ± 0.48 b	4.11 ± 1.05 b	3.19 ± 0.78 b	4.20 ± 0.92 b
		P1T2	4.24 ± 0.54 a	11.13 ± 1.21 a	4.13 ± 0.87 a	6.04 ± 0.72 a	6.41 ± 0.99 a	7.22 ± 1.61 a
		P1T3	3.33 ± 0.32 a	6.85 ± 1.27 b	2.56 ± 0.42 b	4.38 ± 0.49 b	4.51 ± 0.74 b	6.47 ± 1.44 ab
		P2T1	3.81 ± 1.35 ab	9.59 ± 2.91 ab	4.29 ± 1.08 a	6.10 ± 1.30 ab	3.81 ± 1.01 b	4.97 ± 1.41 a
		P2T2	5.02 ± 1.47 a	12.77 ± 2.10 a	5.07 ± 1.18 a	8.44 ± 1.95 a	6.55 ± 1.63 a	7.46 ± 1.21 a
		P2T3	2.66 ± 0.93 b	6.96 ± 1.89 b	2.31 ± 0.87 b	3.71 ± 1.15 b	4.46 ± 1.30 ab	6.97 ± 2.10 a
2022	盛花期 Blooming stage	P1T1	1.37 ± 0.52 a	2.54 ± 0.84 a	1.74 ± 0.43 a	4.24 ± 1.41 a		
		P1T2	1.41 ± 0.39 a	2.84 ± 0.68 a	1.62 ± 0.57 a	4.29 ± 1.25 a		
		P1T3	1.30 ± 0.32 a	2.14 ± 0.44 a	1.25 ± 0.31 a	3.70 ± 0.82 a		
		P2T1	1.29 ± 0.31 a	2.97 ± 0.50 b	1.79 ± 0.35 a	4.03 ± 0.73 b		
		P2T2	1.99 ± 0.31 a	3.80 ± 0.39 a	2.49 ± 0.44 a	5.61 ± 0.77 a		
		P2T3	1.37 ± 0.52 a	2.54 ± 0.84 b	1.74 ± 0.43 a	4.24 ± 1.41 ab		
	盛荚期 Full pod stage	P1T1	3.17 ± 0.70 a	7.26 ± 0.92 b	3.76 ± 0.34 a	7.74 ± 1.07 ab	1.39 ± 0.44 a	
		P1T2	3.68 ± 1.36 a	9.44 ± 1.66 a	3.94 ± 0.63 a	9.31 ± 2.78 a	1.47 ± 0.64 a	
		P1T3	3.08 ± 0.55 a	5.64 ± 1.03 b	2.81 ± 0.31 b	5.65 ± 0.94 b	1.69 ± 0.75 a	
		P2T1	2.80 ± 0.54 ab	6.45 ± 1.04 b	3.14 ± 0.54 b	5.74 ± 0.90 b	1.95 ± 0.43 b	
		P2T2	3.77 ± 0.93 a	11.03 ± 1.80 a	5.16 ± 0.48 a	10.76 ± 1.42 a	3.12 ± 0.81 a	
		P2T3	2.53 ± 0.39 b	5.09 ± 0.74 b	2.51 ± 0.41 b	5.78 ± 0.79 b	1.68 ± 0.48 b	
	鼓粒中期 Mid seed filling stage	P1T1	2.57 ± 0.85 a	9.76 ± 0.83 a	4.27 ± 0.37 a	8.79 ± 0.87 a	7.23 ± 0.80 a	6.58 ± 0.85 a
		P1T2	3.23 ± 0.39 a	8.50 ± 1.08 a	3.58 ± 0.62 ab	7.51 ± 1.22 ab	6.10 ± 1.22 ab	5.95 ± 0.84 ab
		P1T3	2.74 ± 0.57 a	6.56 ± 1.25 b	3.29 ± 0.64 b	6.17 ± 1.42 b	4.52 ± 1.31 b	4.40 ± 0.87 b
		P2T1	2.98 ± 0.38 ab	9.92 ± 1.23 b	4.17 ± 0.67 b	7.95 ± 2.16 ab	6.43 ± 0.75 b	8.50 ± 0.53 ab
		P2T2	3.80 ± 1.26 a	14.55 ± 2.08 a	5.86 ± 0.69 a	11.71 ± 2.03 a	9.35 ± 1.42 a	10.35 ± 2.49 a
		P2T3	1.86 ± 0.35 b	7.54 ± 1.03 b	3.29 ± 0.58 b	7.43 ± 2.86 b	5.20 ± 1.62 b	5.77 ± 2.38 b

注:不同小写字母差异显著($P < 0.05$),下同。盛荚期测量全荚平均质量,鼓粒中期分别测量荚皮和籽粒平均质量。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference($P < 0.05$), the same below. Full pod dry matter quality was measured at full pod stage, pod skin dry matter quality and seed dry matter quality were measured respectively at mid seed filling stage.

在 2022 年试验中,金源 55(P1):盛花期,各部位处理间差异不显著;盛荚期,茎部干重 P1T2 处理显著高于 P1T1,柄部干重 P1T3 处理显著低于 P1T1 ($P<0.05$);鼓粒中期,茎、柄、叶、荚皮和籽粒部处理间 P1T1 处理均显著高于 P1T3 ($P<0.05$);成熟期,各部位 P1T2、P1T3 处理与 P1T1 差异不显著。而克山 1 号(P2),盛花期,茎、叶部干重处理间差异显著,P2T2 处理显著均高于 P2T1 ($P<0.05$);盛荚期,茎、柄、叶和荚部干重 P2T2 处理均显著高于和 P2T1 ($P<0.05$);鼓粒中期,茎、柄和荚皮部 P2T2 处理均显著高于 P2T3 ($P<0.05$);成熟期, P2T2、P2T3 处理与 P2T1 差异不显著。

两年试验表明,合理施用复合微生物肥 T2 处理可显著提高大豆各部位干物质积累,但过量施用复合微生物肥 T3 处理反而导致大豆各部位干物质减小。2021 年因遇极端降水情况,相比 2022 年复合微生物肥施用效果较差,各时期各部位 T1 与 T3 处理间差异不明显,但 T2 处理两年试验均为最优处理。

2.2 化肥配施复合微生物肥对大豆各器官氮、磷、钾素积累量的影响

2.2.1 氮素积累量 如表 4 所示,在 2021 年试验中,金源 55(P1)的根、茎、柄、叶、荚皮、籽粒氮素积累和总量处理间无显著差异,而荚皮部 P1T2 和 P1T3 处理均显著高于 P1T1 ($P<0.05$)。克山 1 号(P2)根部与籽粒处理间无显著差异,茎、叶、荚皮和总量 P2T2 处理均显著高于 P2T1 ($P<0.05$)。

在 2022 年试验中,金源 55(P1)的根部处理间无显著差异,茎、柄、叶氮素积累和总量 P1T2、P1T3 处理显著低于 P1T1,荚皮和籽粒 P1T3 处理显著低于 P1T1,较 P1T1 处理分别减小 29.73% 和 51.42% ($P<0.05$)。克山 1 号(P2)的根部氮素积累处理间无显著差异,茎、叶、柄、荚皮和总量氮素积累 P2T2 处理均显著高于 P2T1,较 P2T1 处理分别增加 66.45%、49.67%、78.93%、75.77% 和 36.87% ($P<0.05$),茎和籽粒部氮素积累 P2T3 处理均显著低于 P2T1 处理,分别减小 36.01% 和 37.82% ($P<0.05$)。

表 4 化肥配施复合微生物肥对大豆各器官氮素积累量的影响

Table 4 Effects of chemical fertilizer with compound microbial fertilizer on nitrogen accumulation in various organs of soybean

单位:kg·hm⁻²

年份	处理	根	茎	柄	叶	荚皮	籽粒	总量
Year	Treatment	Root	Stem	Petiole	Leaf	Pod skin	Seed	Total
2021	P1T1	11.09±2.60 a	12.97±3.32 a	3.44±0.69 a	26.31±6.7 a	9.99±2.45 c	62.52±13.75 a	126.32±21.43 a
	P1T2	9.18±1.16 a	13.05±1.42 a	3.13±0.66 a	32.90±3.95 a	20.80±3.22 a	85.92±19.17 a	164.98±26.08 a
	P1T3	11.72±1.11 a	11.96±2.21 a	3.53±0.57 a	27.70±3.10 a	15.87±2.62 b	84.01±18.66 a	154.80±26.59 a
	P2T1	11.63±4.11 a	14.55±4.41 b	4.68±1.18 ab	38.57±8.25 b	10.51±2.78 b	70.50±19.97 a	150.45±30.67 b
	P2T2	11.64±3.41 a	21.99±3.62 a	5.89±1.38 a	64.91±14.96 a	21.84±5.46 a	98.78±15.96 a	225.06±28.05 a
	P2T3	7.50±2.63 a	8.90±2.42 b	2.82±1.07 b	22.97±7.14 b	15.06±4.40 ab	90.58±27.33 a	147.82±41.10 b
2022	P1T1	8.11±2.67 a	20.28±1.72 a	6.22±0.55 a	56.32±5.55 a	22.64±2.50 a	97.96±12.70 a	211.54±20.39 a
	P1T2	7.00±0.83 a	9.97±1.27 b	2.71±0.47 c	40.91±6.64 b	19.80±3.94 ab	70.79±10.04 ab	151.18±14.33 b
	P1T3	9.64±2.02 a	11.46±2.19 b	4.54±0.88 b	39.03±8.97 b	15.91±4.61 b	47.59±23.67 b	128.17±37.89 b
	P2T1	9.09±1.17 a	15.05±1.87 b	4.55±0.73 b	50.31±13.68 b	17.75±2.08 b	120.58±7.51 a	217.33±20.88 b
	P2T2	7.35±4.23 a	25.05±3.58 a	6.81±0.81 a	90.02±15.61 a	31.20±4.73 a	137.02±33.01 a	297.45±49.25 a
	P2T3	5.23±1.00 a	9.63±1.32 c	4.02±0.71 b	46.01±17.73 b	17.57±5.46 b	74.98±30.90 b	157.44±49.46 b

2.2.2 磷素积累量 如表 5 所示,在 2021 年试验中,金源 55(P1)的根、柄、叶和籽粒磷素积累 P1T2、P1T3 处理与 P1T1 处理间无显著差异,而茎、柄、叶、荚皮、籽粒和总量 P1T2 处理均显著高于 P1T1 处理,分别提高 70.6%、48.00%、41.11%、93.15%、

61.90% 和 58.08% ($P<0.05$)。克山 1 号(P2)根、叶磷素积累 P2T3 处理均显著低于 P2T1 处理,分别减小了 52.34% 和 46.05% ($P<0.05$),茎、荚皮磷素积累和总量 P2T2 处理均显著高于 P2T1 处理,分别增加 47.25%、79.76% 和 38.26% ($P<0.05$)。

表 5 化肥配施复合微生物肥对大豆各器官磷素积累量的影响

Table 5 Effects of chemical fertilizer with microbial fertilizer complex on phosphorus accumulation

in various organs of soybean

单位: kg · hm⁻²

年份	处理	根	茎	柄	叶	荚皮	籽粒	总量
Year	Treatment	Root	Stem	Petiole	Leaf	Pod skin	Seed	Total
2021	P1T1	0.84 ± 0.20 ab	1.37 ± 0.35 b	0.50 ± 0.10 b	0.90 ± 0.23 b	0.73 ± 0.18 b	1.47 ± 0.32 b	5.82 ± 0.96 b
	P1T2	1.06 ± 0.13 a	2.34 ± 0.25 a	0.74 ± 0.16 a	1.27 ± 0.15 a	1.41 ± 0.22 a	2.38 ± 0.53 a	9.20 ± 1.20 a
	P1T3	0.80 ± 0.08 b	1.30 ± 0.24 b	0.46 ± 0.07 b	1.05 ± 0.12 ab	1.04 ± 0.17 b	1.94 ± 0.43 ab	6.59 ± 0.99 b
	P2T1	1.07 ± 0.38 a	1.82 ± 0.55 b	0.82 ± 0.21 ab	1.52 ± 0.33 a	0.84 ± 0.22 b	1.64 ± 0.46 a	7.71 ± 1.57 b
	P2T2	1.05 ± 0.31 a	2.68 ± 0.44 a	1.01 ± 0.24 a	1.94 ± 0.45 a	1.51 ± 0.38 a	2.46 ± 0.40 a	10.66 ± 1.56 a
	P2T3	0.51 ± 0.18 b	1.32 ± 0.36 b	0.48 ± 0.18 b	0.82 ± 0.25 b	1.03 ± 0.30 ab	2.02 ± 0.61 a	6.17 ± 1.70 b
2022	P1T1	0.62 ± 0.20 a	2.15 ± 0.18 a	0.90 ± 0.08 a	1.93 ± 0.19 a	1.66 ± 0.18 a	2.30 ± 0.30 a	9.56 ± 0.83 a
	P1T2	0.81 ± 0.10 a	1.78 ± 0.23 a	0.64 ± 0.11 b	1.58 ± 0.26 a	1.34 ± 0.27 ab	1.96 ± 0.28 a	8.12 ± 0.77 a
	P1T3	0.66 ± 0.14 a	1.25 ± 0.24 b	0.59 ± 0.11 b	1.48 ± 0.34 a	1.04 ± 0.30 b	1.10 ± 0.55 b	6.12 ± 1.44 b
	P2T1	0.83 ± 0.11 a	1.89 ± 0.23 b	0.79 ± 0.13 b	1.99 ± 0.54 ab	1.42 ± 0.17 b	2.81 ± 0.17 a	9.72 ± 1.15 b
	P2T2	0.67 ± 0.38 ab	3.06 ± 0.44 a	1.17 ± 0.14 a	2.69 ± 0.47 a	2.15 ± 0.33 a	3.42 ± 0.82 a	13.15 ± 1.93 a
	P2T3	0.35 ± 0.07 b	1.43 ± 0.20 b	0.69 ± 0.12 b	1.64 ± 0.63 b	1.20 ± 0.37 b	1.67 ± 0.69 b	6.98 ± 1.64 c

在 2022 年试验中,金源 55(P1)根、叶处理间无显著差异,而茎、柄、荚皮、籽粒和总量 P1T3 处理显著低于 P1T1 处理,分别减小 41.86%、34.44%、37.35%、52.17% 和 35.98% ($P < 0.05$),柄部 T2 处理显著低于 P1T1 处理。克山 1 号(P2)根、籽粒磷素积累和总量 P2T3 处理均显著低于 P2T1 处理,分别减小 57.83%、40.57% 和 28.19% ($P < 0.05$);茎、柄、荚皮磷素积累和总量 P2T2 处理均显著高于 P2T1 处理,分别增加 61.90%、48.10%、51.41% 和 35.29% ($P < 0.05$)。

2.2.3 钾素积累量 如表 6 所示,在 2022 年试验中,金源 55(P1)的根、柄、叶钾素积累 P1T2、P1T3 处理与 P1T1 处理间无显著差异,而茎、荚皮、籽粒和总量 P1T2 处理均显著高于 P1T1 处理($P < 0.05$),分别提高 39.44%、56.21%、112.09% 和 51.70%。克山 1

号根、茎和籽粒钾素积累 P2T2、P2T3 处理与 P2T1 处理间无显著差异,荚皮和总量 P2T2 处理均显著高于 P2T1 处理($P < 0.05$),分别增加 92.12% 和 36.84%;柄、叶钾素积累 P2T3 处理均显著低于 P2T1 处理($P < 0.05$),分别减小 44.75% 和 64.13%。

如表 6 所示,在 2022 年试验中,金源 55(P1)的根、籽粒钾素积累 P1T2、P1T3 处理与 P1T1 处理间无显著差异,而茎、柄、叶、荚皮和总量 P1T2、P1T3 处理显著均低于 T1 处理。克山 1 号的根、柄和籽粒钾素积累 P2T2、P2T3 处理与 P2T1 处理间无显著差异,茎、荚皮和总量 P2T2 处理均显著高于 P2T1 处理,分别增加 44.30%、66.43% 和 32.32% ($P < 0.05$),茎、叶和总量 P2T3 处理均显著低于 P2T1 处理,分别减小 36.53%、44.83% 和 29.63% ($P < 0.05$)。

表 6 化肥配施复合微生物肥对大豆各器官钾素积累量的影响

Table 6 Effects of chemical fertilizer with microbial fertilizer complex on potassium accumulation

in various organs of soybean

单位: kg · hm⁻²

年份	处理	根	茎	柄	叶	荚皮	籽粒	总量
Year	Treatment	Root	Stem	Petiole	Leaf	Pod skin	Seed	Total
2021	P1T1	2.60 ± 0.61 a	4.31 ± 1.10 b	3.61 ± 0.73 a	3.98 ± 1.01 ab	4.43 ± 1.09 b	5.21 ± 1.15 b	24.14 ± 3.81 b
	P1T2	2.03 ± 0.26 a	6.01 ± 0.65 a	3.59 ± 0.75 a	5.01 ± 0.60 a	6.92 ± 1.07 a	11.05 ± 2.46 a	34.62 ± 4.83 a
	P1T3	2.00 ± 0.19 a	4.04 ± 0.75 b	2.66 ± 0.43 a	3.72 ± 0.42 b	4.82 ± 0.79 b	9.97 ± 2.21 a	27.21 ± 4.35 ab
	P2T1	2.86 ± 1.01 a	5.85 ± 1.77 ab	4.38 ± 1.10 a	6.83 ± 1.46 a	4.19 ± 1.11 b	8.45 ± 2.39 a	32.55 ± 6.45 b
	P2T2	3.06 ± 0.90 a	7.66 ± 1.26 a	4.51 ± 1.05 a	8.27 ± 1.91 a	8.05 ± 2.01 a	12.98 ± 2.10 a	44.54 ± 6.27 a
	P2T3	1.76 ± 0.62 a	3.55 ± 0.97 b	2.42 ± 0.92 b	2.45 ± 0.76 b	6.11 ± 1.78 ab	11.70 ± 3.53 a	27.99 ± 7.83 b
2022	P1T1	1.90 ± 0.63 a	6.74 ± 0.57 a	6.54 ± 0.57 a	8.52 ± 0.84 a	10.05 ± 1.11 a	8.16 ± 1.06 ab	41.91 ± 3.76 a
	P1T2	1.55 ± 0.19 a	4.59 ± 0.58 b	3.11 ± 0.54 b	6.23 ± 1.01 b	6.59 ± 1.31 b	9.10 ± 1.29 a	31.17 ± 3.25 b
	P1T3	1.65 ± 0.34 a	3.87 ± 0.74 b	3.43 ± 0.66 b	5.24 ± 1.20 b	4.83 ± 1.40 b	5.65 ± 2.81 b	24.66 ± 6.31 b
	P2T1	2.23 ± 0.29 a	6.05 ± 0.75 b	4.25 ± 0.69 ab	8.90 ± 2.42 a	7.08 ± 0.83 b	14.45 ± 0.9 ab	42.97 ± 4.97 b
	P2T2	1.93 ± 1.11 a	8.73 ± 1.25 a	5.21 ± 0.62 a	11.47 ± 1.99 a	11.50 ± 1.74 a	18.01 ± 4.34 a	56.86 ± 8.68 a
	P2T3	1.23 ± 0.23 a	3.84 ± 0.53 c	3.45 ± 0.61 b	4.91 ± 1.89 b	7.12 ± 2.22 b	9.69 ± 3.99 b	30.24 ± 7.79 c

2.3 化肥配施复合微生物肥配施有机肥对大豆产量的影响

如表 7 所示,2021 年因遇极端降水情况,不同品种各处理产量及其产量构成因素均受到影响。与金源 55 常规施肥(P1T1)相比,(50%氮肥+50%有机肥)P1T2 处理的单株荚数、百粒重、单株粒重、产量较 P1T1 均有一定幅度的提高,其中 P1T2 与 P1T1 单株粒重差异达到显著水平($P<0.05$),P1T2

大豆产量较 P1T1 提高了 13.02%,(无氮肥+100%有机肥)P1T3 处理大豆产量较 P1T1 处理降低了 9.34%。与克山 1 号常规施肥(P2T1)相比,(50%氮肥+50%有机肥)P2T2 处理的单株荚数、单株粒数、百粒重、单株粒重、产量较相对应的 P2T1 均有一定幅度的提高,但均未达到显著水平。处理 P2T2 大豆产量较 P2T1 提高了 5.34%;P2T3 处理大豆产量较 P2T1 降低了 9.26%。

表 7 化肥配施复合微生物肥对大豆产量及产量构成因素的影响

Table 7 Effects of chemical fertilizer with microbial fertilizer complex on soybean yield and yield components						
年份 Year	处理 Treatment	单株荚数 Pods number per plant	单株粒数 Seeds number per plant	百粒重 100-seed weight/g	单株粒重 Seed weight per plant/g	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)
2021	P1T1	24.07 ± 3.99 a	54.58 ± 8.35 a	18.83 ± 0.01 a	9.78 ± 0.57 ab	3014.94 ± 55.06 a
	P1T2	26.00 ± 2.42 a	57.23 ± 3.78 a	19.78 ± 1.09 a	10.91 ± 0.94 a	3407.44 ± 183.44 a
	P1T3	20.33 ± 6.97 a	43.27 ± 3.55 a	18.33 ± 0.49 a	7.78 ± 0.59 b	2733.38 ± 104.00 a
	P2T1	21.03 ± 4.64 a	51.01 ± 6.41 a	18.53 ± 2.60 a	8.67 ± 1.95 a	3195.49 ± 89.26 a
	P2T2	27.87 ± 4.53 a	52.30 ± 7.48 a	19.97 ± 0.33 a	9.18 ± 2.02 a	3366.25 ± 250.14 a
	P2T3	20.46 ± 2.21 a	46.50 ± 6.84 a	19.19 ± 0.74 a	8.06 ± 0.13 a	2899.56 ± 245.62 a
2022	P1T1	29.13 ± 1.44 a	71.66 ± 3.91 ab	19.66 ± 0.21 a	12.72 ± 0.56 ab	3787.47 ± 93.76 b
	P1T2	31.15 ± 1.35 a	76.48 ± 8.15 a	20.68 ± 0.26 a	14.92 ± 0.91 a	4264.60 ± 73.60 a
	P1T3	23.54 ± 0.74 b	54.23 ± 5.17 b	20.13 ± 0.13 a	10.81 ± 1.04 b	3135.03 ± 101.39 c
	P2T1	29.10 ± 5.04 a	74.13 ± 16.1 a	19.81 ± 0.71 a	13.15 ± 0.73 a	3526.80 ± 328.00 ab
	P2T2	34.40 ± 5.16 a	78.83 ± 5.33 a	20.21 ± 0.16 a	14.75 ± 1.47 a	4247.33 ± 91.66 a
	P2T3	24.83 ± 2.85 a	56.29 ± 3.44 a	18.19 ± 0.09 b	10.59 ± 1.24 a	3124.30 ± 269.00 b

2022 年,各品种处理较 2021 年产量都有所提升。与金源 55 常规施肥(P1T1)相比,(50%氮肥+50%有机肥)P1T2 处理的单株荚数、百粒重、单株粒重、产量较相对应的 P1T1 均有一定幅度的提高,P1T2 大豆产量较 P1T1 显著提高了 12.6% ($P<0.05$)。(无氮肥+100%有机肥)P1T3 处理的单株荚数、百粒重、单株粒重、产量较相对应的 P1T1 均有一定幅度的降低,其中 P1T3 大豆产量较 P1T1 显著降低了 17.21% ($P<0.05$)。克山 1 号品种,与常规施肥(P2T1)相比,(50%氮肥+50%有机肥)P2T2 处理的单株荚数、单株粒数、百粒重、单株粒重、产量均有一定幅度的提高,其中产量提高了 20.4%。(无氮肥+100%有机肥)P2T3 处理的单株荚数、单株粒数、百粒重、单株粒重、产量较相对应的 P2T1 均有一定幅度的降低,其中 P2T3 百粒重显著降低,降低了 8.18% ($P<0.05$),P2T3 处理大豆产量降低了 11.41%。

两年减氮配施有机肥试验对大豆产量影响表明,有机肥合理施用对产量提升起促进作用,过量施用有机肥会对大豆产量起负向作用。

2.4 化肥配施复合微生物肥对大豆品质的影响

由表 8 可以看出,2021 年,金源 55(P1)的蛋白质、脂肪含量各处理间无显著差异。克山 1 号(P2)的蛋白质、脂肪含量表现为:P2T2 处理蛋白质含量较 P2T1 处理提高 1.25%,P2T3 处理蛋白质含量略微高于 P2T1 处理;P2T2 处理脂肪含量较 P2T1 处理显著降低 2.91% ($P<0.05$),P2T3 处理脂肪含量较 P2T1 处理降低 2.89%。

通过对 2022 年大豆品质的测定发现,不同处理对大豆脂肪含量的影响大于对蛋白质含量的影响,与 2021 年规律一致。在金源 55(P1)中,虽然不同复合微生物肥处理间蛋白质含量有所差异,但未达显著水平,其中 P1T2、P1T3 处理的脂肪含量较 P1T1 处理分别降低了 15.58%、31.71%。在克山 1 号(P2)中:P2T3 处理的蛋白质含量均显著高于 P2T1 处理,其中 P2T3 处理较 P2T1 处理提高 2.70% ($P<0.05$);P2T1 处理的脂肪含量均显著高于 P2T2 和 P2T3 处理,其中 P2T2 和 P2T3 处理较 P2T1 处理分别降低了 9.11% 和 12.42% ($P<0.05$),差异达到了显著水平。

两年结果表明,复合微生物肥施用对大豆品质影响较大,复合微生物肥主要通过提升大豆蛋白质含量和抑制大豆脂肪含量使大豆品质发生变化。

表 8 化肥配施复合微生物肥对大豆品质的影响
Table 8 Effects of chemical fertilizers with microbial fertilizer complex on soybean quality

年份 Year	处理 Treatment	蛋白质含量 Protein content/%	脂肪含量 Fat content/%
2021	P1T1	39.30 ± 0.38 a	20.20 ± 0.09 a
	P1T2	39.90 ± 0.16 a	20.20 ± 0.16 a
	P1T3	40.10 ± 0.16 a	20.10 ± 0.09 a
	P2T1	40.10 ± 0.16 ab	20.60 ± 0.11 a
	P2T2	40.60 ± 0.08 a	20.00 ± 0.08 b
	P2T3	40.10 ± 0.42 b	20.00 ± 0.25 ab
2022	P1T1	31.88 ± 1.20 a	25.86 ± 3.37 a
	P1T2	31.99 ± 0.37 a	21.83 ± 1.14 b
	P1T3	32.78 ± 1.41 a	17.66 ± 0.55 c
	P2T1	31.09 ± 0.36 b	19.32 ± 0.82 a
	P2T2	31.28 ± 0.43 b	17.56 ± 0.18 b
	P2T3	32.20 ± 0.97 a	16.92 ± 0.85 b

3 讨论

3.1 化肥配施复合微生物肥对大豆干物质质量和养分积累的影响

植株干物质质量是产量形成的重要基础。研究发现,大豆的干物质质量和氮素积累有类似的趋势,一定的氮素浓度可以有效地增加大豆的干物质质量和氮素积累,特别是在结荚期和鼓粒期^[14-15]。在生育前期,叶片氮素增幅较快,随着生育期的推进,各器官的干物质积累在结荚期和鼓粒期后达到高峰,最后向荚皮、籽粒部分转移^[16]。朱海荣^[17]研究表明,大豆在 4 个生育期内对肥料的要求较高,不同比例的氮、磷、钾肥直接影响大豆根系固氮和地上、地下生物量的积累,尤其是氮肥,对株高和地上、地下生物量影响较大。本研究结果与以往试验结果基本一致,即在不同品种和不同施肥量下,各处理中以 T2 处理(50% 氮肥 + 复合微生物肥)效果最佳。作物养分吸收是干物质积累的前提条件^[18]。作物的养分积累量对产量很重要。大量研究表明,农作物养分吸收量的积累与干物质的积累趋势一致,存在明显的正相关关系^[19-23]。本研究结果表明,大豆的氮、磷、钾的积累与干物质积累的变化规律一致,盛花期前氮、磷、钾的积累缓慢增加,盛荚期后迅速增加,总体呈上升趋势。在本研究中,T2 处理(50% 氮肥 + 复合微生物肥)通过施用减氮复合微生物肥,促进营养物质从大豆的营养器官向生

殖器官转移,增强了大豆的氮、磷、钾积累,为提高产量创造了条件。与单独施用化肥相比,复合微生物肥替代部分化肥增加了对 N、P 和 K 的养分吸收,当复合微生物肥替代 30% ~ 50% 的化肥时,养分利用效率最高^[24]。在本研究中 T2 处理对两个品种的养分积累都有较好的促进效果,在生长季节促进了积累的 N、P 和 K 向籽粒的转移,明显提高了籽粒的养分含量。

3.2 化肥配施复合微生物肥对大豆产量和品质的影响

在本研究中,化肥与不同量的复合微生物肥搭配能有效提高大豆产量,主要原因是化肥与复合微生物肥搭配能使有机酸更好地释放,使微生物数量和微生物活性增加,使化肥和水更容易被吸收利用^[25],更能满足大豆在各个季节的营养需求,从而使大豆产量更容易提高,与使用常规化肥以及自然生长的大豆相比,施用微生物肥的大豆在株高、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,发现大多数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、添加的复合微生物肥类型和肥量以及试验地点和气候的不同,复合微生物肥的施肥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复合微生物肥促进产量提高主要是由单株粒数、单株荚数及单株粒重的提高实现。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,与李国清等^[29]的研究一致。

减少化肥不一定会提升作物品质,但在减少化肥的同时施用合理比例的复合微生物肥会对作物品质有明显的影响,也可能产生一定的反向作用。田艺心等^[30]发现提升大豆品质的关键在于平衡氮磷钾肥的施用,其中氮肥与钾肥是主要与次要因素。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^[31-32]。朱宝国等^[33]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^[34]。本研究表明,复合微生物肥处理(T2 和 T3)提高了大豆的蛋白质含量,但对大豆的脂肪含量有明显的抑制作用。

4 结论

两年试验表明,随着施肥年限的增加,使营养器官中干物质积累向籽粒的转移加速,促进了产量的提高。在常规化肥施用量减少 50% 的基础上,相应增加复合微生物肥的施用量能够促进氮、磷、钾营养物质的积累,改善了大豆植物早期生育期各部分的干物质质量,有利于大豆生长。50% 氮肥 + 复合微生物肥处理和复合微生物肥替代化肥处理对大豆的蛋白质含量有显著促进作用,但对大豆脂肪含量有明显抑制效果,化肥处理脂肪含量显著高于复合微生物肥处理。复合微生物肥处理相比常规施肥不添加复合微生物肥产量下降。如选择 50% 氮肥和复合微生物肥配合施用,复合微生物肥最适用量为 $2.023\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,大豆理论最高产量为 $4\,264.60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。复合微生物肥施用量超过 $2.023\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,产量不增反减。综上所述,建议在减施氮肥 50% 的基础上配施复合微生物肥,复合微生物肥施用量以 $2.023\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 为宜。如无降水过于异常的年份,可采用适当复合微生物肥配施,来达到大豆提质增产的目的。

参考文献

[1] 张立强,张景勇,孙宇,等. 施用钼肥对大豆生长性状、产量和品质影响的 Meta 分析[J]. 大豆科学, 2022, 41(3): 288-299. (ZHANG L Q, ZHANG J Y, SUN Y, et al. Meta analysis of effects of molybdenum fertilizer on soybean growth traits, yield and quality[J]. Soybean Science, 2022, 41(3): 288-299.)

[2] 尚翠. 微生物有机肥对烟田土壤养分调节和烟草品质改善的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013. (SHANG C. Role of biofertilizer on regulating soil nutrition and improving quality of tobacco leaves[D]. Changsha: Hunan University, 2013.)

[3] ZHOU Y, XIAO C, YANG S, et al. Life cycle assessment and life cycle cost analysis of compound microbial fertilizer production in China[J]. Sustainable Production and Consumption, 2021, 28: 1622-1634.

[4] LI X, LI D, JIANG Y, et al. The effects of microbial fertilizer based *Aspergillus brunneoviolaceus* HZ23 on pakchoi growth, soil properties, rhizosphere bacterial community structure, and metabolites in newly reclaimed land [J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1091380.

[5] DOS SANTOS CORDEIRO C F, ECHER F R. Publisher correction: Interactive effects of nitrogen-fixing bacteria inoculation and nitrogen fertilization on soybean yield in unfavorable edaphoclimatic environments [J]. Scientific Reports, 2020, 10: 12115.

[6] ZOBIOLE L H S, OLIVEIRA JR R S, CONSTANTIN J, et al. Nutrient accumulation in conventional and glyphosate-resistant soybean under different types of weed control [J]. Planta Daninha, 2012, 30(1): 75-85.

[7] 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.)

[8] 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.)

[9] 魏丹,蔡姗姗,王伟,等. 黑土肥力与大豆产量及品质的途径分析[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.)

[10] 魏丹,李艳,李玉梅,等. 氮磷钾元素对黑龙江不同地区大豆产量和品质的影响[J]. 大豆科学, 2017, 36(1): 87-91. (WEI D, LI Y, LI Y M, et al. Effect of N, P, K fertilization on yield and quality of soybean in Heilongjiang Province[J]. Soybean Science, 2017, 36(1): 87-91.)

[11] 李鸣雷,谷洁,高华,等. 不同有机肥对大豆植株性状、品质和产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(9): 67-72. (LI M L, GU J, GAO H, et al. Effects of different organic fertilizer on plant character, quality and yield of soybean[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2007, 35(9): 67-72.)

[12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000. (BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.)

[13] 祝溪,王若兰,黄亚伟,等. 局部发热过程中进口大豆品质劣变规律研究[J]. 中国油料作物学报, 2022, 44(5): 1108-1116. (ZHU X, WANG R L, HUANG Y W, et al. Quality deterioration of imported soybean during local heating process[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2022, 44(5): 1108-1116.)

[14] 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. Effects of different types of urea on nitrogen accumulation and nitrogen use efficiency of soybean[J]. Soybean Science, 2013, 32(5): 655-658.)

[15] 俞霞. 红壤旱地甜玉米 || 大豆间作系统作物产量、碳氮吸收累积和土壤养分的变化特征研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2021. (YU X. Study on the variation characteristics of crop yield, carbon and nitrogen accumulation and soil nutrients under sweet corn || soybean intercropping system in upland red soil [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2021.)

[16] 闫非凡. 玉米-大豆轮作对大豆产量及土壤微生物群落的影响[D]. 延吉: 延边大学, 2021. (YAN F F. Effects of maize-soybean rotation on soybean yield and soil microbial community [D]. Yanji: Yanbian University, 2021.)

[17] 朱海荣. 减氮条件下增施根瘤菌肥和叶面液肥对大豆生长发育和产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(1): 60-65. (ZHU H R. Effects of rhizobium fertilizer and foliar liquid fertilizer on growth and yield of soybean under reduced nitrogen condition [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(1): 60-65.)

[18] 张阳. 氮磷调控对大豆-玉米轮作下作物生长、养分积累及产量的影响[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2020. (ZHANG

Y. Effects of nitrogen and phosphorus regulation on crop growth, nutrient accumulation and yield in soybean-maize rotation [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2020.)

[19] 周鑫, 姜宇, 位昕宇, 等. 不同施肥处理对黑龙江省北部高寒区密植小粒大豆产量及品质的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2021(4): 29-32. (ZHOU X, JIANG Y, WEI X Y, et al. Effects of different fertilization treatments on yield and quality of close planting small-seeded soybean in northern high cold region of Heilongjiang Province [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2021(4): 29-32.)

[20] KOUTROUBAS S D, ANTONIADIS V, DAMALAS C A, et al. Effect of organic manure on wheat grain yield, nutrient accumulation, and translocation[J]. Agronomy Journal, 2016, 108(2): 615-625.

[21] 李春艳, 文如意, 石洪亮, 等. 海岛棉与陆地棉干物质积累与氮素吸收分配的特点[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(5): 175-181. (LI C Y, WEN R Y, SHI H L, et al. Dry matter and nitrogen accumulation distribution on island cotton and upland cotton[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(5): 175-181.)

[22] BALBOA G R, SADRAS V O, CIAMPITTI I A. Shifts in soybean yield, nutrient uptake, and nutrient stoichiometry: A historical synthesis-analysis[J]. Crop Science, 2018, 58(1): 43-54.

[23] 晋凡生, 韩彦龙, 李洁, 等. 氮磷钾配施对红芸豆养分吸收、干物质积累及产量构成因子的影响[J]. 华北农学报, 2018, 33(6): 183-192. (JIN F S, HAN Y L, LI J, et al. Effect of NPK fertilizers on nutrient uptake and dry matter accumulation and yield components of red kidney beans [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2018, 33(6): 183-192.)

[24] BARUA S, TRIPATHI S, CHAKRABORTY A, et al. Characterization and crop production efficiency of diazotrophic bacterial isolates from coastal saline soils [J]. Microbiological Research, 2012, 167(2): 95-102.

[25] LI X, LU Q, LI D, et al. Effects of different microbial fertilizers on growth and rhizosphere soil properties of corn in newly reclaimed land[J]. Plants, 2022, 11(15): 1978.

[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 Russian high efficiency soybean rhizobia fertilizer on main characters and yield of soybean [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 fertier and *Rhizobium* on soybean in central Shandong Province [J]. Soybean Science, 2021, 40(5): 682-687.)

[30] 田艺心, 高凤菊, 曹鹏鹏. 饱和 D-最优设计在高蛋白大豆施肥优化中的应用[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(2): 343-350. (TIAN Y X, GAO F J, CAO P P. Application of saturated D-optimal design for optimum fertilization in the production of high protein soybean[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(2): 343-350.)

[31] IMRAN, AMANULLAH. Soybean quality and profitability improved with peach (*Prunus persica* L) remnants, phosphorus and beneficial microbes[J]. Journal of Plant Nutrition, 2023, 46(3): 370-385.

[32] TOOMER O T, OVIEDO E O, ALI M, et al. Current agronomic practices, harvest & post-harvest processing of soybeans (*Glycine max*)-A review[J]. Agronomy, 2023, 13(2): 427.

[33] 朱宝国, 于忠和, 王囡囡, 等. 有机肥和化肥不同比例配施对大豆产量和品质的影响[J]. 大豆科学, 2010, 29(1): 97-100. (ZHU B G, YU Z H, WANG N N, et al. Effect of different proportion combined application of organic and chemical fertilizer on soybean yield and quality [J]. Soybean Science, 2010, 29(1): 97-100.)

[34] 王开勇, 郭岩彬, 孟凡乔, 等. 有机耕作对大豆土壤—植株氮磷吸收及品质的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(33): 248-252. (WANG K Y, GUO Y B, MENG F Q, et al. Effect of organic cultivation on soil nitrogen and phosphor uptake and quality of soybean [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(33): 248-252.)