



减施炭基肥配施复合生物菌剂对大豆生长及产量和品质的影响

肖翠红¹, 马 丁², 林志伟¹, 刘振华¹, 王桂华¹, 李 雯³, 孙冬梅^{1*}, 曹福来¹

(1. 黑龙江八一农垦大学 生命科学技术学院, 黑龙江 大庆 163319; 2. 黑龙江八一农垦大学 食品学院, 黑龙江 大庆 163319; 3. 黑龙江珍宝岛湿地国家级自然保护区管理局, 黑龙江 虎林 158414)

摘要:为探究减施炭基肥配施复合生物菌剂在大豆减肥增效中的应用效果,本研究以炭基肥为对照,以垦保1号为供试大豆品种进行3年的小区试验,共设置5个处理:炭基肥(CK)、减1/5炭基肥(1/5R)、减1/3炭基肥(1/3R)、减1/5炭基肥配施复合生物菌剂(1/5RB)、减1/3炭基肥配施复合生物菌剂(1/3RB),测定大豆苗期、初花期及收获期相关指标,考察减施炭基肥配施复合生物菌剂对大豆生长及品质的影响。结果表明:与对照相比,1/5RB处理可以提高大豆苗期出苗率,1/5RB处理和1/3RB处理显著降低大豆根腐病发病率,增加根瘤数,提高土壤脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性;大豆可溶性蛋白质含量在1/5R、1/5RB和1/3RB处理显著提高,而大豆脂肪含量在1/5RB和1/3RB处理显著降低。1/5RB和1/3RB处理的大豆理论产量同CK比较,2021年分别增加12.5%和7.26%;2022年分别增加14.72%和7.91%;2023年分别增加8.86%和6.21%,3年平均增幅分别为11.76%和7.04%。综上所述:在供试炭基肥使用量下,减施20%~30%炭基肥配施复合生物菌剂对大豆生长及产量均有促进作用。研究结果可为大豆减肥增效提质提供理论依据。

关键词:大豆;减施炭基肥;复合生物菌剂;产量;品质

Effects of Reduced Application of Carbon-based Fertilizer Combined with Compound Microbial Inoculant Soybean Growth, Yield and Quality

XIAO Cuihong¹, MA Ding², LIN Zhiwei¹, LIU Zhenhua¹, WANG Guihua¹, LI Wen³, SUN Dongmei^{1*}, CAO Fulai¹

(1. College of Life Science and Technology, Heilongjiang Bayi Agricultural Reclamation University, Daqing 163319, Heilongjiang, China; 2. College of Food Science and Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural Reclamation University, Daqing 163319, Heilongjiang, China; 3. Heilongjiang Zhenbaodao Wetland National Nature Reserve Administration, Hulin 158414, Heilongjiang, China)

Abstract: To investigate the application effect of reducing the application of carbon based fertilizer combined with compound microbial inoculant in soybean weight loss and efficiency improvement, this study conducted a 3-year field experiment with Kenbao 1 as the tested soybean variety, using carbon based fertilizer as the control. A total of 5 treatments were set up: carbon based fertilizer (CK), reducing 1/5 of carbon based fertilizer (1/5R), reducing 1/3 of carbon based fertilizer (1/3R), reducing 1/5 of carbon based fertilizer and apply compound biological agent (1/5RB), and reducing 1/3 of carbon based fertilizer and apply compound biological agent (1/3RB), we measured the relevant indicators of soybean seedling stage, initial flowering stage and harvest stage, and investigated the effect of reducing carbon based fertilizer and applying compound biological agent on soybean growth and quality. The results showed that 1/5RB treatment could increase the emergence rate of soybean seedlings compared with the control, 1/5RB treatment and 1/3RB treatment significantly reduced the incidence rate of soybean root rot, increased the number of root nodules, and increased the activities of soil urease, invertase and alkaline phosphatase; the soluble protein content of soybeans significantly increase in the 1/5R, 1/5RB, and 1/3RB treatments, while the fat content of soybeans significantly decreased in the 1/5RB and 1/3RB treatments. The theoretical yield of soybeans treated with 1/5RB and 1/3RB increased by 12.5% and 7.26% respectively compared to CK in 2021; 14.72% and 7.91% respectively in 2022; 8.86% and 6.21% respectively in 2023, with an average three-year growth rate of 11.76% and 7.04%. In summary, under the tested amount of carbon based fertilizer, reducing the application of 20% to 30% carbon based fertilizer combined with compound microbial inoculant has a promoting effect on soybean growth and yield. The results of this study can provide theoretical basis for soybean weight loss, efficiency improvement, and quality enhancement.

Keywords: soybean; reduced carbon-based fertilizer; compound microbial inoculant; yield; quality

目前中国大豆生产中的化肥施用量已经超过了其经济意义上的最优施用量^[1],过量的化肥施用会对水体、大气和土壤环境造成污染^[2],尤其对土壤的生态环境造成严重破坏,表现为土壤酸化、盐

渍化、板结,土壤微生物菌落多样性降低等^[3]。减施化肥配施功能性微生物菌剂可有效解决化肥过量施用问题,一方面可以减轻化肥对生态环境造成的污染压力,另一方面可以增加功能性微生物对土

收稿日期:2025-03-15

基金项目:三纵科研支持计划基础培育(自然)(ZRCPY202110);黑龙江省农垦总局课题(HKKYZD190211)。

第一作者:肖翠红,女,硕士,副教授,主要从事生理生态方面研究。E-mail:136693881@qq.com。

通讯作者:孙冬梅,女,博士,教授,主要从事微生物学研究。E-mail:7981004@qq.com。

壤微生态环境的改善^[4]。多种功能性微生物复合的生物菌剂,不但含有大量高效的有益活菌,同时还含有多种活性物质和有机质等营养成分,具有提高大豆土壤微生物丰富度、优化土壤团粒结构、调节大豆根部营养环境等作用^[5],尤其是能改善大豆根系微生态环境的功能菌,因此配施生物菌剂被认为是减少化肥使用量的最佳施肥方式^[6]。生物菌剂以芽孢杆菌最为常见,因其形成的孢子活性稳定且对逆境具有较强的抵抗能力,因此成为制备生物菌剂的最佳材料,如枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)、解淀粉芽孢杆菌(*B. amyloliquefaciens*)、巨大芽孢杆菌(*B. megaterium*)、地衣芽孢杆菌(*B. licheniformis*)和胶冻样芽孢杆菌(*B. mucilaginosus*)等都被广泛应用。

炭基肥是一种以生物炭为载体与化肥混合在一起的复混新型肥料,可以弥补化肥前期肥效释放过快导致后期作物生长不良的缺点^[7],同时也减少了化肥使用次数,降低了化肥对环境的污染风险。姜雪等^[8]研究表明炭基肥可促进大豆产量形成,但是侯伟男^[9]的研究则发现适量施用炭基肥对大豆生长发育及产量有促进作用,过量则起到抑制效果,另外炭基肥高额的生产成本又限制了其在大田作物中的推广与应用,因此本研究旨在探究一种减量炭基肥与复合生物菌剂的配施模式,以期达到保证大豆产量和品质的同时降低生产成本的目的,为大豆减肥增效提质提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 试验菌株 复合生物菌剂由5个菌株即拮抗功能的枯草芽孢杆菌(*B. subtilis*)、促生功能的解

淀粉芽孢杆菌(*B. amyloliquefaciens*)、解磷功能的巨大芽孢杆菌(*B. megaterium*)和解钾功能的胶冻样芽孢杆菌(*B. mucilaginosus*)及根瘤菌(*Rhizobium* sp.)组成,上述5个菌株之间无拮抗作用,且对作物生长有不同程度的促进作用^[10-13]。供试菌株均由黑龙江八一农垦大学微生物资源与利用试验室提供,每个菌株采用LB培养基单独发酵24 h后按等体积混合,备用。

1.1.2 大豆品种及炭基肥 大豆品种垦保1号由黑龙江八一农垦大学植物科学技术学院大豆组提供;炭基肥由黑龙江省大庆市地力生物肥料有限公司提供,肥料总养分 $\geq 45\%$,N:P₂O₅:K₂O比例为15:18:12。

1.2 试验设计

1.2.1 试验地基本概况 本试验于2021—2023年在黑龙江八一农垦大学安达试验田进行。安达市试验田位于124°53′~125°55′E,46°01′~47°01′N之间,属于北温带大陆性半干旱季风气候,夏季雨热同期,无霜期142 d左右,年降雨量约430 mm,年有效积温约2 872 ℃。

1.2.2 试验处理 本试验共设5个处理,每个处理3次重复。5个处理分别为:炭基肥(CK)、减1/5炭基肥(1/5R)、减1/3炭基肥(1/3R)、减1/5炭基肥配施复合生物菌剂(1/5RB)和减1/3炭基肥配施复合生物菌剂(1/3RB)。每小区面积39 m²(行长10 m,行距0.65 m,5行区)。炭基肥用量为225 kg·hm⁻²,配施复合生物菌剂用量为1 500 mL·hm⁻²,使用前与炭基肥混合后阴干备用。施肥方法为一次性人工施肥,施肥深度8 cm,人工播种,株距5 cm,保苗30万株·hm⁻²,其他管理措施同大田常规。具体施肥配置详见表1。

表1 施肥配置方法

Table 1 Fertilization configuration

处理 Treatment	炭基肥 Biochar based fertilizer/(kg·hm ⁻²)	纯炭粒 Biochar/ (kg·hm ⁻²)	复合生物菌剂 Compound microbial inoculant/ (L·hm ⁻²)	LB培养基 LB medium/ (L·hm ⁻²)	蒸馏水 Distilled water/ (L·hm ⁻²)
CK	225	0	0	0	1.5
1/5R	180	45	0	1.5	0
1/3R	150	75	0	1.5	0
1/5RB	180	45	1.5	0	0
1/3RB	150	75	1.5	0	0

注:炭基肥减量后用纯炭粒补足。

Note: The reduced biochar based fertilizer was supplemented with biochar.

1.3 测定项目及方法

1.3.1 田间苗期调查统计 根据黑龙江省农作物品种试验调查及操作规范,调查统计出苗率和根腐病发病情况。统计出苗率方法如下:播种时,记录每个小区内播种粒数,计算大豆子叶出土后展开的幼苗数达2/3以上时的田间出苗数,出苗率(%) = (正常出苗数 ÷ 播种粒数) × 100;待大豆第二至第三片真叶完全展开时统计田间幼苗根腐病情况,连续选取20株观测根腐病发病情况,计算发病率,

根腐病发病率(%) = 发病样本数 ÷ 调查样本数 × 100。

1.3.2 初花期农艺性状测定 所有试验处理各取60株长势一致且无明显机械损伤大豆植株,米尺测定株高和根长,游标卡尺测量茎粗,记录根瘤数、根腐病发生情况和病情指数,大豆根腐病的病害分级标准,参照辛惠普等^[14]的方法,根腐病病情指数(%) = $\sum(\text{级数} \times \text{各级病株数}) \div (\text{调查总株数} \times \text{最高病级数}) \times 100$ 。将地上和地下部分别装进牛皮纸袋中,放入105℃鼓风干燥箱中杀青30min后改成80℃烘干至恒重,称量干重并记录。

1.3.3 大豆产量及产量构成因素 成熟期后每小区随机取中间3行,每行连续不间断取20株室内考种。测量大豆株粒数、株荚数、百粒重等产量构成因子。大豆理论产量测定:待大豆收获后风干至恒重,随机选取100粒完整、无机械损伤、无虫蛀的大豆种子测定百粒重,计算出大豆的理论产量,计算方法:理论产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) = (10 000 m^2 收获株数

× 株粒数 × 百粒重 × 90%) ÷ 100 000。

1.3.4 土壤酶活测定 在大豆收获期,每处理小区随机选取9株植株,利用抖根法^[15]收集土壤样品并充分混合,装入干净且无菌的自封袋中带回实验室。除去土样中石子、动植物残体等杂质,风干后过2mm筛,土壤脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性采用分光光度法测定^[16]。

1.3.5 大豆品质测定 大豆可溶性蛋白质含量采用考马斯亮蓝法测定^[17]。脂肪含量测定参考GB T5512-2008 粮油检验—粮食中粗脂肪含量测定中索氏提取法中的减重法测定^[18]。

1.4 数据分析

试验数据采用Excel 2016进行数据处理、SPSS 25.0显著性分析和OriginLab Origin 2021软件制图。

2 结果与分析

2.1 苗期田间调查统计

由表2可知,减施炭基肥配施复合生物菌剂可以在不同程度上促进大豆种子出苗并降低根腐病的发病率。2021年,各处理大豆出苗率与对照CK比较,1/5RB处理略高于CK,1/3RB处理略低于CK,但差异不显著。2022年和2023年,1/5RB和1/3RB处理均略高于CK,但差异均不显著。从3年试验平均结果来看,1/3RB处理的出苗率与对照相比差异不显著,而1/5RB处理可以显著提高大豆出苗率。

表2 大豆苗期生长情况统计
Table 2 Soybean seedling growth statistics

处理 Treatment	出苗率 Emergence rate/%				根腐发病率 Root rot incidence rate/%			
	2021年	2022年	2023年	平均	2021年	2022年	2023年	平均
CK	84.68 ± 0.87 ab	88.08 ± 0.54 a	81.07 ± 0.17 a	84.61 ± 0.18 b	25.39 ± 0.20 a	26.30 ± 0.30 a	23.30 ± 0.15 a	25.00 ± 0.11 a
1/5R	81.26 ± 0.98 c	87.25 ± 0.32 ab	79.19 ± 0.53 b	82.57 ± 0.54 c	18.89 ± 0.07 b	24.80 ± 0.17 b	20.76 ± 0.03 b	21.48 ± 0.41 b
1/3R	80.58 ± 0.32 c	85.70 ± 0.51 b	78.24 ± 0.02 b	81.51 ± 0.27 c	24.21 ± 0.15 a	23.24 ± 0.05 b	20.71 ± 0.18 ab	22.72 ± 0.35 ab
1/5RB	85.92 ± 0.39 a	89.01 ± 0.59 a	82.80 ± 0.52 a	85.91 ± 0.37 a	11.39 ± 0.09 c	15.09 ± 0.04 c	11.05 ± 0.06 c	12.51 ± 0.14 c
1/3RB	83.81 ± 0.97 b	88.11 ± 0.57 a	81.97 ± 0.42 a	84.63 ± 0.57 b	19.61 ± 0.18 b	20.60 ± 0.08 bc	17.34 ± 0.10 bc	19.18 ± 0.23 bc

注:表中不同小写字母差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

根腐病统计结果显示:所有处理幼苗均有根腐病发生,其表现为幼苗主根及近地面茎基部出现红褐色稍凹陷的病斑,或者皮层开裂呈溃疡状(图1箭头所示)。3年统计结果得出,与CK相比,1/5RB

和1/3RB处理组大豆根腐病的发病率均显著降低。其中1/5RB处理3年分别降低了55.14%、42.63%和52.57%,1/3RB处理分别降低了22.76%、21.67%和34.37%,均达到了显著差异水平。



注: A. CK; B. 1/5RB。

图1 不同处理大豆根腐病发病情况

Fig. 1 Incidence of soybean root rot under different treatments

2.2 不同处理对初花期大豆生长的影响

2.2.1 地上部生长性状 如表3所示,不同肥料处理下,初花期大豆的株高、茎粗及地上干重3年结果存在一定差异。2021年,1/3R处理大豆株高增高,

1/5R处理大豆株高降低,与CK比较差异显著。1/5RB和1/3RB处理略低于CK,差异不显著;2022年,1/5R和1/5RB株高增高,1/3R株高降低,与CK比差异显著;2023年1/5R和1/5RB株高增高,1/3R和1/3RB株高降低,与CK比差异不显著。1/5R和1/5RB的3年平均株高大于CK,1/3R和1/3RB小于CK,差异均不显著。

茎粗分析结果显示:2021年,与对照CK比,各处理茎粗均小于CK,且差异显著;2022年,1/5R、1/3R和1/3RB处理茎粗均小于CK,且差异显著;2023年,1/3R处理茎粗小于CK,差异显著,3年各处理的平均茎粗均小于CK,但差异不显著。

地上干重测定结果显示:1/5RB处理地上干重每年均高于CK,差异显著;1/3RB处理地上干重每年也高于CK,但差异不显著。

以上结果表明减碳基肥配施复合生物菌剂没有显著增加大豆株高和茎粗;但减1/5碳基肥配施复合生物菌剂可以显著提高大豆地上干物质积累,与CK比,3年分别提高38.99%、33.95%和11.81%,平均提高28.39%。

表3 大豆初花期地上部生长性状

Table 3 Aboveground biological traits in soybean early flowering period

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem diameter/mm	地上干重 Overground dry weight/g	
2021	CK	17.7 ± 0.31 b	2.39 ± 0.04 a	1.59 ± 0.24 c
	1/5R	18.9 ± 0.25 a	2.18 ± 0.04 b	1.63 ± 0.07 bc
	1/3R	16.4 ± 0.33 c	1.96 ± 0.04 c	1.52 ± 0.11 c
	1/5RB	17.1 ± 0.36 bc	2.08 ± 0.04 bc	2.21 ± 0.91 a
	1/3RB	17.6 ± 0.29 b	2.12 ± 0.02 c	1.71 ± 0.19 bc
2022	CK	18.7 ± 0.31 b	3.12 ± 0.04 a	1.62 ± 0.16 b
	1/5R	20.8 ± 0.25 a	2.97 ± 0.04 b	1.55 ± 0.10 c
	1/3R	16.9 ± 0.33 c	2.75 ± 0.04 c	1.45 ± 0.19 c
	1/5RB	20.1 ± 0.36 a	2.98 ± 0.03 ab	2.17 ± 0.54 a
	1/3RB	18.7 ± 0.29 b	2.87 ± 0.04 bc	1.74 ± 0.14 b
2023	CK	16.7 ± 0.31 ab	2.08 ± 0.03 ab	1.44 ± 0.31 bc
	1/5R	17.0 ± 0.25 a	2.14 ± 0.04 a	1.49 ± 0.03 b
	1/3R	15.4 ± 0.33 b	1.76 ± 0.03 c	1.30 ± 0.21 c
	1/5RB	17.4 ± 0.25 a	2.03 ± 0.04 a	1.61 ± 0.44 a
	1/3RB	16.6 ± 0.25 ab	1.95 ± 0.04 b	1.56 ± 0.09 ab
平均 Mean	CK	17.7 ± 0.58 ab	2.53 ± 0.31 a	1.55 ± 0.05 b
	1/5R	18.9 ± 1.09 a	2.43 ± 0.27 a	1.56 ± 0.04 b
	1/3R	16.2 ± 0.44 b	2.16 ± 0.30 a	1.42 ± 0.06 b
	1/5RB	18.2 ± 0.95 ab	2.36 ± 0.31 a	1.99 ± 0.19 a
	1/3RB	17.5 ± 0.61 ab	2.31 ± 0.28 a	1.67 ± 0.05 ab

注:表中不同小写字母差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

2.2.2 地下部生长性状 如表4所示,2021年,1/5R和1/3R处理的根长明显缩短,与CK相比差异显著;1/5RB和1/3RB处理的根长也减小,但与CK相比差异不显著;2022年和2023年结果相似,1/3RB处理根长小于CK,差异显著,1/5RB处理根长小于CK,差异不显著。从3年的平均结果来看,减施炭基肥使大豆根长减小。

大豆单株根瘤数测定结果显示:与对照CK比较,1/5RB和1/3RB处理的大豆单株根瘤数3年均显著增加,3年分别平均增加19.19%和8.19%,说

明减施炭基肥配施复合生物菌剂对大豆根瘤形成具有显著的促进作用。

大豆根腐病发病率和病情指数的3年试验测定结果表明:减施炭基肥配施复合生物菌剂可以显著降低大豆根腐病的发生。对照CK处理的大豆根腐病3年平均发病率为17.00%,1/5RB较1/5R处理降低了61.09%,较CK降低了62.12%;1/3RB较1/3R处理降低了47.71%,较CK降低了40.12%。

3年试验结果表明:复合生物菌剂可以促进大豆根瘤的形成,减少根腐病的发病率,提高大豆抗病性。

表4 大豆初花期地下部生长性状

Table 4 Underground biological traits in soybean early flowering period

处理 Treatment	根长 Root length/cm	地下干重 Underground dry weight/g	单株根瘤数 Number of nodules per plant	根腐病发病率 Incidence of root rot/%	病情指数 Disease index/%	
2021	CK	20.01 ± 0.53 a	0.46 ± 0.03 b	14.55 ± 1.04 b	18.18 ± 0.29 b	12.12 c
	1/5R	18.20 ± 0.50 bc	0.49 ± 0.01 b	14.00 ± 0.57 b	18.18 ± 0.24 b	13.64 b
	1/3R	16.71 ± 0.51 c	0.44 ± 0.02 b	14.07 ± 0.87 b	25.33 ± 0.08 a	17.21 a
	1/5RB	18.87 ± 0.34 ab	0.55 ± 0.13 a	16.67 ± 0.52 a	6.06 ± 0.10 d	6.06 d
	1/3RB	18.79 ± 0.51 ab	0.49 ± 0.03 b	15.02 ± 0.02 a	12.73 ± 0.31 bc	12.88 bc
2022	CK	20.38 ± 0.53 a	0.65 ± 0.11 bc	13.96 ± 0.67 b	20.55 ± 1.11 a	15.75 b
	1/5R	19.05 ± 0.49 b	0.65 ± 0.10 bc	14.33 ± 0.15 ab	20.73 ± 1.22 a	17.99 a
	1/3R	18.47 ± 0.51 ab	0.50 ± 0.06 c	13.35 ± 0.08 b	22.83 ± 1.58 a	16.78 ab
	1/5RB	19.66 ± 0.34 ab	0.72 ± 0.10 a	16.04 ± 0.52 a	8.22 ± 0.68 b	7.98 d
	1/3RB	19.06 ± 0.51 b	0.68 ± 0.11 b	15.50 ± 0.14 a	10.55 ± 1.02 b	10.53 c
2023	CK	19.50 ± 0.82 a	0.37 ± 0.04 b	14.32 ± 0.77 bc	12.28 ± 0.83 a	6.89 a
	1/5R	18.00 ± 0.95 b	0.38 ± 0.07 b	13.85 ± 0.66 c	10.75 ± 0.20 a	5.55 b
	1/3R	17.55 ± 0.65 b	0.31 ± 0.12 c	13.58 ± 0.13 c	10.25 ± 0.57 a	5.32 b
	1/5RB	18.45 ± 0.77 ab	0.42 ± 0.07 a	18.34 ± 0.52 a	5.03 ± 1.12 c	2.75 c
平均 Mean	1/3RB	17.55 ± 0.24 b	0.37 ± 0.21 b	15.83 ± 0.32 b	7.27 ± 0.38 b	3.01 c
	CK	19.73 ± 0.47 a	0.49 ± 0.08 a	14.28 ± 0.17 bc	17.00 ± 2.46 a	11.58 a
	1/5R	18.42 ± 0.32 ab	0.51 ± 0.08 a	14.06 ± 0.14 c	16.55 ± 2.99 a	12.39 a
	1/3R	17.58 ± 0.51 b	0.42 ± 0.06 a	13.67 ± 0.21 c	19.47 ± 4.66 a	13.10 a
	1/5RB	18.99 ± 0.35 ab	0.56 ± 0.09 a	17.02 ± 0.69 a	6.44 ± 0.94 b	5.59 b
	1/3RB	18.47 ± 0.46 ab	0.51 ± 0.09 a	15.45 ± 0.24 b	10.18 ± 1.59 b	8.81 b

注:表中不同小写字母差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

2.3 不同肥料对大豆土壤酶活性的影响

如表5所示:2021年和2023年,1/5RB和1/3RB处理大豆土壤脲酶活性高于CK,差异显著;2022年,1/5RB和1/3RB处理大豆土壤脲酶活性略高于CK,差异不显著;1/5RB和1/3RB处理大豆土壤脲酶3年平均值较CK分别增加44.98%和13.97%,而1/5R和1/3R处理3年平均值较CK分别增加5.68%和减少11.35%。

2021和2023年大豆土壤碱性磷酸酶的变化趋势相当,与CK相比,1/5RB和1/3RB处理大豆土壤碱性磷酸酶活性显著增高,达到差异显著水平。

2022年仅1/5RB处理大豆土壤碱性磷酸酶活性显著增高。1/5RB和1/3RB处理大豆土壤碱性磷酸酶活性3年平均值较CK分别增加19.82%和9.64%,而1/5R和1/3R则分别降低2.50%和5.00%。

大豆土壤蔗糖酶活性测定结果显示:2021和2022年,1/5RB和1/3RB处理大豆土壤蔗糖酶活性略高于CK,但均未达显著水平。2023年1/5RB处理大豆土壤蔗糖酶活性增高,与CK比,差异显著。1/5RB和1/3RB处理大豆土壤蔗糖酶活性3年平均值较CK分别增加14.56%和4.20%,而1/5R和1/3R则较CK分别降低0.45%和8.11%。

3年土壤酶活测定结果显示:减施炭基肥不同程度降低大豆土壤脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活

性,但是减炭基肥配施复合生物菌剂却不同程度增加大豆土壤脲酶、碱性磷酸酶和蔗糖酶活性。

表5 不同肥料对大豆土壤酶活的影响

Table 5 Effect of different fertilizers on the enzyme activity in soybean soil

处理 Treatment		土壤脲酶 Urease activity/ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase activity/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	蔗糖酶 Sucrase activity /($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}$)
2021	CK	0.244 ± 0.06 c	5.24 ± 0.07 c	6.01 ± 0.24 a
	1/5R	0.241 ± 0.04 c	5.19 ± 0.11 c	5.89 ± 0.57 ab
	1/3R	0.227 ± 0.02 c	5.01 ± 0.10 c	5.58 ± 0.88 b
	1/5RB	0.384 ± 0.01 a	6.25 ± 0.16 a	6.80 ± 0.52 a
	1/3RB	0.295 ± 0.05 b	5.83 ± 0.08 b	6.22 ± 0.02 a
2022	CK	0.187 ± 0.02 ab	5.54 ± 0.45 bc	6.95 ± 0.24 ab
	1/5R	0.198 ± 0.03 a	5.38 ± 0.47 bc	6.31 ± 0.51 ab
	1/3R	0.144 ± 0.02 b	5.16 ± 0.39 c	5.70 ± 0.88 b
	1/5RB	0.216 ± 0.05 a	6.78 ± 0.42 a	7.82 ± 0.52 a
	1/3RB	0.187 ± 0.02 a	6.00 ± 0.67 b	6.78 ± 0.02 ab
2023	CK	0.258 ± 0.05 bc	6.02 ± 0.35 bc	7.01 ± 0.24 b
	1/5R	0.286 ± 0.04 bc	5.79 ± 0.33 c	7.69 ± 0.57 ab
	1/3R	0.238 ± 0.04 c	5.78 ± 0.56 c	7.08 ± 0.88 b
	1/5RB	0.396 ± 0.03 a	7.10 ± 0.18 a	8.26 ± 0.52 a
	1/3RB	0.300 ± 0.02 b	6.59 ± 0.24 a	7.82 ± 0.02 ab
平均 Mean	CK	0.229 ± 0.16 ab	5.60 ± 0.23 bc	6.66 ± 0.33 ab
	1/5R	0.242 ± 0.03 ab	5.46 ± 0.18 bc	6.63 ± 0.54 ab
	1/3R	0.203 ± 0.03 b	5.32 ± 0.24 c	6.12 ± 0.48 b
	1/5RB	0.332 ± 0.05 a	6.71 ± 0.25 a	7.63 ± 0.43 a
	1/3RB	0.261 ± 0.04 ab	6.14 ± 0.23 ab	6.94 ± 0.47 ab

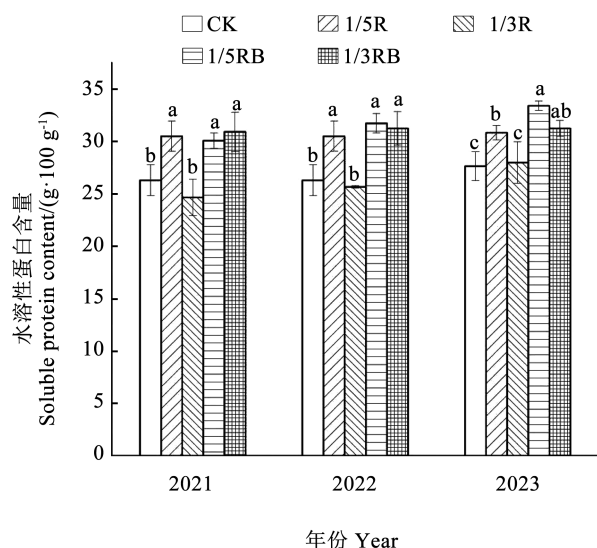
注:表中不同小写字母差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

2.4 不同肥料处理对大豆品质的影响

如图2所示,3年试验结果一致显示:1/5R、1/5RB和1/3RB处理的大豆可溶性蛋白含量均高于CK,平均提高了17.62%、17.95%和23.49%,且差异显著。1/3R处理的大豆可溶性蛋白低于CK。说明不同比例减少炭基肥和减炭基肥配施复合生物菌剂对大豆可溶性蛋白含量均产生重要影响。

如图3所示,2021年,与对照CK比,1/5R和1/3R处理的脂肪含量增高,1/5RB和1/3RB大豆脂肪含量降低,且均达到差异显著水平;2022年,与CK比,1/3R处理大豆脂肪含量增高,1/5RB和1/3RB大豆脂肪含量降低,差异显著;2023年,与CK比,1/5RB和1/3RB处理的大豆脂肪含量降低,差异显著。3年试验结果表明:1/5R和1/3R处理脂肪含量增高,平均增幅为2.85%和5.08%。1/5RB和1/3RB脂肪含量降低,平均降低幅度为5.12%和6.74%。3年试验结果显示减炭基肥的施肥方式可以提高脂肪含量,而减炭基肥配施复合生物菌剂的施肥方式使可溶性蛋白增高而脂肪含量降低。



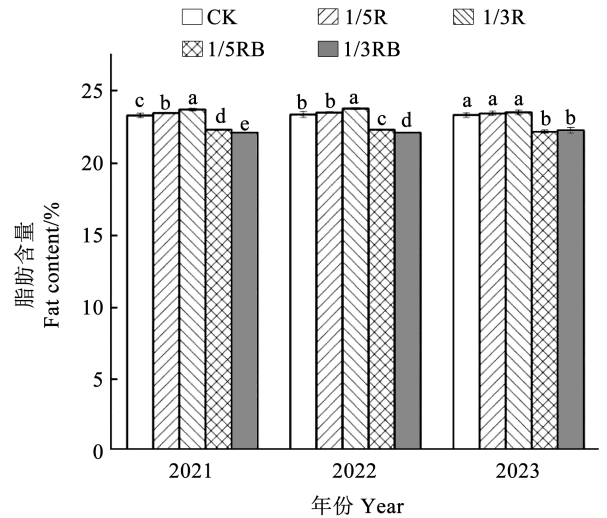
注:不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase indicate significant difference ($P < 0.05$).

图2 不同肥料处理对大豆水溶性蛋白含量的影响
Fig. 2 Effects of different fertilizer treatments on soybean water-soluble protein content

2.5 不同肥料处理对大豆产量的影响

2021 年,黑龙江省平均年降水量为 608.5 mm,比常年多 11%,出现严重涝灾。2023 年春季降雨偏少,干旱持续到 6 月末,7 月开始大量降雨,呈先旱后涝。2021 年和 2023 年的极端天气不同程度影响到大豆的产量构成因子和产量,但每一年小区实验结果总体变化趋势大致相同,即:与 CK 比较,1/5RB 处理单株荚数、单株粒数、百粒重和理论产量均有所增加,其中理论产量差异达到显著水平。1/3RB 处理单株荚数、单株粒数、百粒重和理论产量也均有所增加,其中单株荚数和理论产量均达到显著水平。从 3 年的试验结果来看,减炭基肥配施复合生物菌剂在单株粒数、百粒重和产量性状上占绝对优势。1/5RB 处理单株粒数较 CK 增多 6.78%,百粒重增加 5.24%,产量增加 11.77%;1/3RB 处理单株粒数较 CK 增多 4.24%,百粒重高 2.64%,产量增加 7.04%。减炭基肥处理(1/5R 和 1/3R)与减炭基肥配施复合生物菌剂处理(1/5RB 和 1/3RB)的产量比较,1/5RB 处理高于 1/5R 处理高 7.86%,1/3RB 处理高于 1/3R 处理 7.88%(表 6)。



注:不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase indicate significant difference ($P < 0.05$).

图 3 不同肥料处理对大豆脂肪含量的影响

Fig. 3 Effects of different fertilizer treatments on soybean fat content

表 6 收获期大豆产量及产量构成因子

Table 6 Soybean yield and yield components during harvest period

处理 Treatment	单株荚数 Number of pods per plant	单株粒数 Number of seeds per plant	百粒重 100-seed weight/g	理论产量 Theoretical yield/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	增幅 Increase rate/%
2021 年					
CK	51.0 ± 2.22 c	122.74 ± 1.93 a	20.55 ± 1.11 a	2837.60 ± 221.37 cd	0
1/5R	59.6 ± 2.59 a	127.00 ± 7.00 a	20.56 ± 1.09 a	2937.51 ± 197.36 c	3.52
1/3R	55.1 ± 3.01 b	119.75 ± 2.50 b	20.95 ± 1.16 a	2822.36 ± 121.70 d	-0.53
1/5RB	51.9 ± 2.23 c	132.21 ± 2.69 a	21.47 ± 3.35 a	3193.37 ± 127.02 a	12.55
1/3RB	54.0 ± 4.31 b	127.60 ± 7.77 a	21.20 ± 3.18 a	3043.26 ± 148.26 b	7.26
2022 年					
CK	58.5 ± 1.58 c	110.51 ± 0.99 a	19.02 ± 0.74 a	2364.64 ± 136.95 c	0
1/5R	65.5 ± 1.95 a	115.55 ± 2.02 a	19.28 ± 1.10 a	2506.28 ± 134.64 b	6.01
1/3R	58.3 ± 2.05 c	108.55 ± 2.88 b	18.42 ± 0.65 a	2301.55 ± 97.73 c	-2.66
1/5RB	58.5 ± 1.33 c	118.71 ± 3.44 a	20.31 ± 1.00 a	2712.38 ± 169.28 a	14.72
1/3RB	60.7 ± 3.55 b	116.78 ± 9.21 a	19.00 ± 1.63 a	2551.55 ± 212.94 b	7.91
2023 年					
CK	49.7 ± 3.65 c	122.95 ± 2.02 a	22.83 ± 1.21 a	3157.82 ± 239.09 b	0
1/5R	52.8 ± 1.70 a	121.42 ± 1.88 a	23.78 ± 0.75 a	3218.89 ± 218.49 b	1.93
1/3R	51.8 ± 1.88 b	117.33 ± 1.99 a	23.80 ± 1.22 a	3170.86 ± 140.41 b	0.41
1/5RB	50.7 ± 1.58 bc	128.01 ± 8.52 a	23.87 ± 2.11 a	3437.55 ± 121.36 a	8.86
1/3RB	51.4 ± 2.78 b	125.02 ± 6.22 a	23.84 ± 1.11 a	3353.04 ± 233.51 a	6.21

注:表中不同小写字母差异显著($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$)

综合以上结果本试验研究发现:在试验剂量下,炭基肥大量使用并没有极显著增加大豆的产量,减 1/5 炭基肥的使用量反而可以增加大豆的产

量,当炭基肥减少 1/3 的使用量时,大豆产量略低于 CK,但差异不显著。炭基肥减量配施复合生物菌剂可以显著增加大豆产量。

3 讨论

3.1 减碳基肥配施复合生物菌剂对大豆生长性状的影响

本试验所用复合生物菌剂含有具有拮抗功能的枯草芽孢杆菌、促生功能的解淀粉芽孢杆菌、解磷功能的巨大芽孢杆菌和解钾功能的胶冻样芽孢杆菌及根瘤菌。文安宇等^[19]对复合菌剂的菌株研究发现该复合菌对多种作物均具有不同程度的促生和生防效果,本研究结果也证实该复合菌剂对大豆生长性状产生重要影响。前人研究表明:在大豆生产过程中,当肥料中氮、磷、钾比例为 15:18:12,纯氮量在 0~150 kg·hm⁻²时,大豆生长性能随着施氮量的增加而上升,纯氮量超过 150 kg·hm⁻²时,大豆生产性能增幅减缓,或呈下降趋势^[20],因此本研究确定碳基肥施用量为 225 kg·hm⁻²(纯 N 150 kg·hm⁻²),即为大豆较高生产性能施肥用量。结果显示减碳基肥配施复合生物菌剂处理的大豆苗期干重、根瘤数显著高于对照,根腐病发病率和发病指数显著低于对照。王睿豪^[21]使用微生物菌肥拌种黑小豆发现中等氮肥施用(纯 N 120 kg·hm⁻²)能增加根系根瘤数,提升黑小豆的固氮能力,这与本研究减碳基肥配施复合生物菌可以明显增加大豆根瘤数减少根腐病发病率的结果一致。说明减碳基肥后的营养元素无法满足大豆前期的快速生长需求,但功能生物菌剂通过促生、解磷、解钾作用,提高土壤肥力和改善土壤微生态环境,从而弥补了营养素的不足问题。其机理可能是复合生物菌剂通过改变大豆根际环境的理化条件、根系分泌物的组成和数量以及大豆与微生物的相互作用来影响微生物群落的动态^[22],进而增强大豆抗逆性,也为后期营养物质从大豆的营养器官向生殖器官转移,为提高产量创造条件。

3.2 减碳基肥配施复合生物菌剂对大豆品质和产量的影响

大豆蛋白质和脂肪含量往往作为评价大豆品质的重要参考指标。大豆品质又与大豆品种、肥料的种类、肥料的利用率及气候等因素有关。因此,明确同一品种类型大豆在优质栽培条件下的施肥措施,是改善大豆优质品质的途径之一。本研究表明,减少基础用量碳基肥的 20% 并不影响大豆蛋白质含量,而减碳基肥配施生物菌剂的施肥方式却可以提高大豆蛋白含量,尽管差异不显著,但从侧面表明碳基肥减量配施复合生物菌剂可以改善大豆的氮素营养,从而提高或维持大豆正常蛋白水平。傅晨野^[23]研究表明降低氮肥添加有机生物肥可以

提升大豆蛋白质含量而降低脂肪含量,与大豆蛋白成负相关,与本研究结果一致。

减碳基肥配施复合生物菌剂的施肥方式不仅可以提高可溶性蛋白含量,还大幅度增加大豆产量,其原因是本研究所用复合生物菌剂含有促生、解磷、解钾和固氮功能微生物,施用后解磷解钾菌释放有机酸,活化根系土壤难溶磷和钾^[24]。磷是根瘤生长发育必需的大量营养元素,在豆科作物种植中有“以磷增氮”的措施。本研究所用解磷菌与固氮菌协同促进大豆结瘤固氮,提高大豆固氮能力^[25],显著增加单株荚数、单株粒数、百粒重和理论产量,本研究结果为该复合生物菌剂大田应用提供理论依据。

4 结论

本研究以碳基肥氮:磷:钾为 15:18:12,施用量为 225 kg·hm⁻²(纯 N 150 kg·hm⁻²)作为对照,在此基础上减 1/5 和减 1/3 碳基肥配施复合生物菌剂,可以显著提高大豆出苗率和地上干物质积累,促进大豆根的生长和根瘤的形成,减少根腐病的发病率。提高土壤脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性;显著提高大豆水溶性蛋白质含量。当碳基肥减 1/5 配施复合生物菌剂时,大豆 3 年平均理论产量为 3 114 kg·hm⁻²,产量增幅为 11.76%;当碳基肥减 1/3 配施复合生物菌剂时,大豆 3 年平均理论产量为 2 984 kg·hm⁻²,产量增幅为 7.04%。生产中可根据投入和产出比适当减少碳基肥使用量 20%~30% 配施复合生物菌剂,达到提质增产的目的。

参考文献

- [1] 史常亮,郭焱,朱俊峰. 中国粮食生产中化肥过量施用评价及影响因素研究[J]. 农业现代化研究, 2016, 37(4): 671-679.
SHI C L, GUO Y, ZHU J F. Evaluation of over fertilization in China and its influencing factors[J]. Research of Agricultural Modernization, 2016, 37(4): 671-679.
- [2] 孔凡斌,郭巧琴,潘丹. 中国粮食作物的过量施肥程度评价及时空分析[J]. 经济地理, 2018, 38(10): 201-210, 240.
KONG F B, GUO Q L, PAN D. Evaluation and spatiotemporal analysis of excessive fertilization in China's grain crops [J]. Economic Geography, 2018, 38(10): 201-210, 240.
- [3] 邱君. 农业污染治理政策分析[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008.
QIU J. Policy analysis of agricultural pollution control[M]. China Agricultural Science and Technology Press, 2008.
- [4] 方成,岳明灿,王东升,等. 化肥减施配施微生物菌剂对鲜食玉米生长和土壤肥力的影响[J]. 土壤, 2020, 52(4): 743-749.
FANG C, YUE M C, WANG D S, et al. Effects of fertilizer reduction combined with microbial agent application on growth and soil fertility of fresh Corn [J]. Soils, 2020, 52(4): 743-749.

- [5] CORDEIRO C F D, ECHER F R. Interactive effects of nitrogen-fixing bacteria inoculation and nitrogen fertilization on soybean yield in unfavorable edaphoclimatic environments [J]. Scientific Reports, 2019, 9: 15606.
- [6] DUFFY B, NOWAK J, CLÉMENT C, et al. Use of plant growth-promoting bacteria for applied and compantbiocontrol of plant diseases: principles, mechanisms of action, and future prospects [J]. Environmental Microbiology, 2005, 71(9): 4951-4959.
- [7] 魏春辉, 任奕林, 刘峰, 等. 生物炭及生物炭基肥在农业中的应用研究进展[J]. 河南农业科学, 2016, 45(3): 14-19.
- WEI C H, REN Y L, LIU F, et al. Research progress of application of biochar and biochar-based fertilizer in agriculture [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2016, 45(3): 14-19.
- [8] 姜雪, 王丽学, 戴皖宁, 等. 炭基肥与调亏灌溉对大豆生长及水分利用效率的影响[J]. 大豆科学, 2020, 39(2): 235-242.
- JIANG X, WANG L X, DAI W N, et al. Effects of biochar based fertilizer and regulated deficit irrigation on growth and water use efficiency of soybean [J]. Soybean Science, 2020, 39(2): 235-242.
- [9] 侯伟男, 刘靖瑜, 邢一唱, 等. 生物炭施入量对大豆生长发育及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(15): 14-19.
- HOU W N, LIU J Y, XING Y C, et al. Biochar application amount: Effects on growth, development and yield of soybean[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(15): 14-19.
- [10] 林志伟, 肖翠红, 白鑫雨, 等. 解磷菌 DQ-N 对大豆种子萌发及苗期生长的影响[J]. 大豆科学, 2021, 40(5): 676-681.
- LIN Z W, XIAO C H, BAI X Y, et al. Effects of DQ-N strain on seed germination and seedling growth of soybean [J]. Soybean Science, 2021, 40(5): 676-681.
- [11] 蔡红丹, 王碧盈, 肖翠红, 等. 解磷、溶磷菌对水稻种子萌发的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2019(7): 42-45.
- CAI H D, WANG B Y, XIAO C H, et al. Effects of phosphate-solubilizing bacteria on seed germination of rice [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2019(7): 42-45.
- [12] 林志伟, 肖亚静, 郭春兰, 等. 枯草芽孢杆菌 21 代谢物对大豆茄镰孢菌的抑菌机制[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(11): 175-177.
- LIN Z W, XIAO Y J, GUO C L, et al. Inhibitory mechanism of metabolites of *Bacillus subtilis* 21 against *Fusarium solani* [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(11): 175-177.
- [13] 魏莹, 李达, 过杭剑, 等. 菌株 YW-5 产 γ -PGA 的优化及其发酵液对大豆耐寒性影响初探[J]. 中国油料作物学报, 2024, 46(6): 1372-1381.
- WEI Y, LI D, GUO H J, et al. Optimization of γ -PGA production from strain YW-5 and the effect of fermentation broth on cold tolerance of soybean [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2024, 46(6): 1372-1381.
- [14] 辛惠普, 马汇泉, 刘静茹, 等. 大豆根腐病发生与防治的初步研究[J]. 大豆科学, 1987, 6(3): 189-196.
- XIN H P, MA H Q, LIU J R, et al. A preliminary study on epidemiology and control of disease [J]. Soybean Science, 1987, 6(3): 189-196.
- [15] 冯金玲, 郑新娟, 杨志坚, 等. 套种模式对油茶生长及根际土壤理化性质的影响[J]. 森林与环境学报, 2015, 35(4): 324-330.
- FENG J L, ZHENG X J, YANG Z J, et al. Effects of interplanting pattern on the forest and rhizosphere soil physical and chemical properties of *Camellia oleifera* [J]. Journal of Forest and Environment, 2015, 35(4): 324-330.
- [16] 关松荫, 张德生, 张志明. 土壤酶及其研究方法 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
- GUAN S Y, ZHANG D S, ZHANG Z M. Soil enzymes and research methods [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986.
- [17] 中华人民共和国卫生部. GB 50095 - 2010 食品安全国家标准-食品中蛋白质的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- Ministry of Health of the People's Republic of China. GB 50095 - 2010 National standard for food safety-determination of protein in food [S]. Beijing: China Standards Press, 2010.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 5512 - 2008 粮油检验-粮食中粗脂肪含量测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 5512 - 2008 Grain and oil test-determination of crude fat content in grain [S]. Beijing: China Standards Press, 2008.
- [19] 文安宇, 陈阳, 王雪花, 等. 生物菌剂对小白菜生长及品质的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2019(6): 69-71.
- WEN A Y, CHEN Y, WANG X H, et al. Effects of bioagent on growth and quality of Chinese cabbage [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2019(6): 69-71.
- [20] 李文龙, 李喜焕, 王瑞霞, 等. 河北省夏播早熟区施肥与密度对大豆农艺性状和品质的影响[J]. 河北农业科学, 2015, 19(1): 10-13, 33.
- LI W L, LI X H, WANG R X, et al. Effects of fertilizer and planting density on agronomic traits and quality of soybean in extremely early mature soybean region of Hebei Province [J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2015, 19(1): 10-13, 33.
- [21] 王睿豪. 微生物菌肥对小粒黑豆生长发育及生理特性的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- WANG R H. Effect of microbial fertilizer on the growth and development and physiological characteristics of black beans [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017.
- [22] 张金波, 王永斌, 谭巍巍, 等. 大豆根际微生物的研究进展 [J]. 大豆科学, 2024, 43(4): 471-480.
- ZHANG J B, WANG Y B, TAN W W, et al. Research progress on soybean rhizosphere microorganisms [J]. Soybean Science, 2024, 43(4): 471-480.
- [23] 傅晨野, 李多, 滕思远, 等. 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 [J]. 大豆科学, 2024, 43(1): 54-63.
- FU C Y, LI D, TENG S Y, et al. Effect of chemical fertilizer compound with compound microbial fertilizer on nutrient accumulation, yield and quality of soybean [J]. Soybean Science, 2024, 43(1): 54-63.
- [24] NAHAS E. Phosphate solubilizing microorganisms: Effect of carbon, nitrogen, and phosphorus sources [M] // VELAZQUEZ E, RODRIGUEZ B C. First International Meeting on Microbial Phosphate Solubilization, Springer, 2007: 111-115.
- [25] QIN L, ZHAO J, TIAN J, et al. The high-affinity phosphate transporter GmPT5 regulates phosphate transport to nodules and nodulation in soybean [J]. Plant Physiology, 2012, 159(4): 1634-1643.