



微生物菌肥增施方式对盐碱地大豆幼苗生长发育及产量的影响

滕迁莹¹, 崔明元¹, 姜海英¹, 吴楠², 刘玉兰^{2*}

(1. 通化市农业科学研究院, 吉林 通化 135007; 2. 吉林农业科技学院, 吉林 吉林 132101)

摘要:为明确不同微生物菌肥增施方式对盐碱地大豆幼苗生长发育及产量的影响,促进微生物菌肥在盐碱地大豆高效栽培中的实际应用,选用吉育 86 作为大豆供试品种,于 2023—2024 年设置 6 个处理,分别为常规施肥(CK),常规施肥基础上菌肥拌种(B)、菌肥用作底肥(D)、菌肥用作叶面肥(Y)、菌肥拌种+叶面肥(B+Y)和菌肥用作底肥+叶面肥(D+Y)。于大豆苗期(V4)测定植株农艺性状指标、光合特性指标、抗氧化酶活性和 MDA 含量,成熟期测定产量及产量构成因素。结果表明:与 CK 相比,增施微生物菌肥的大豆幼苗株高、根长、根瘤数和单株叶面积均增加;微生物菌肥能显著提高大豆幼苗叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)和叶绿素含量(SPAD 值),降低叶片胞间 CO_2 浓度(C_i),不同程度提高超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性,显著降低丙二醛(MDA)含量;增施微生物菌肥能明显提高大豆产量及单株有效荚数、单株粒数、单株粒重和百粒重,其中,微生物菌肥 D+Y 处理综合效果最佳,B+Y 处理次之,2 个处理各指标与 CK 相比均差异显著或极显著,产量分别增加 26.49% 和 22.82%。综上,增施微生物菌肥能够不同程度缓解盐碱胁迫对大豆幼苗生长的抑制,从而提高产量,微生物菌肥 D+Y 处理对盐碱地大豆幼苗生长及产量提高促进作用最大,其次为 B+Y 处理。研究表明,在盐碱地大豆生产中增施微生物菌肥能缓解盐碱胁迫,采用合理的施用方式效果更佳。研究结果可为盐碱地大豆微生物菌肥的合理施用提供参考。

关键词:微生物菌肥;施肥方式;大豆;盐碱地;生长发育;产量

Effects of Microbial Fertilizers Application Methods on Growth and Development of Soybean Seedlings and its Yield in Saline-Alkaline Soil

TENG Qianying¹, CUI Mingyuan¹, JIANG Haiying¹, WU Nan², LIU Yulan^{2*}

(1. Tonghua Academy of Agricultural Sciences, Tonghua 135007, Jilin, China; 2. Jilin Agricultural Science and Technology University, Jilin 132101, Jilin, China)

Abstract: To clarify the effects of different microbial fertilizers application methods on the growth, development and yield of soybean seedlings in saline-alkaline soil and promote the practical application of microbial fertilizers in efficient soybean cultivation on saline-alkaline land, JiYu 86 was selected as the soybean test variety. In 2023 and 2024, 6 treatments were set up, including conventional fertilization (CK), seed treatment with microbial fertilizer (B), microbial fertilizer applied as a basal fertilizer (D), microbial fertilizer applied as a foliar spray (Y), microbial fertilizer applied as seed treatment + foliar spray (B + Y), and microbial fertilizer applied as basal fertilizer + foliar spray (D + Y). The agronomic traits, photosynthetic characteristics, antioxidant enzyme activities and MDA content of soybean seedlings at the V4 stage were measured, and yield and yield components were assessed at maturity to study the effects of microbial fertilizers on soybean. The results indicated that the application of microbial fertilizers significantly increased soybean seedling height, root length, number of nodules and leaf area per plant compared to the CK. Microbial fertilizers also significantly improved the net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), transpiration rate (T_r) and chlorophyll content (SPAD value) of soybean leaves, while reducing the intercellular CO_2 concentrations (C_i). The application of microbial fertilizers enhanced the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), and catalase (CAT), and significantly reduced the content of MDA. Additionally, microbial fertilizers contributed to an increase in soybean yield, effective pod number per plant, seed number per plant, seed weight per plant, and 100-seed weight, with significant effects. Among the treatments, the D + Y treatment showed the best overall effect, followed by the B + Y treatment. Both treatments differed significantly or highly significantly compared to CK, with yield increases of 26.49% and 22.82% respectively. In conclusion, the application of microbial fertilizers can alleviate the inhibitory effects of saline-alkaline stress on soybean seedling growth to varying degrees, thereby improving yield. The D + Y treatment has the most significant promoting effect on seedling growth and yield, followed by the B + Y treatment. The research shows that the application of microbial fertilizer in soybean production in saline - alkaline soil can alleviate the saline-alkaline stress, and a better effect can be achieved with rational application. The results can provide a reference for the rational application of microbial fertilizer in soybean planting in saline-alkaline soil.

Keywords: microbial fertilizer; fertilizers application methods; soybeans; saline-alkaline soil; growth and development; yield

收稿日期:2025-04-08

基金项目:吉林省科学技术厅项目(20230202014NC)。

第一作者:滕迁莹,女,硕士,助理研究员,主要从事大豆育种研究。E-mail:408811079@qq.com。

通讯作者:刘玉兰,女,硕士,高级实验师,主要从事大豆栽培与育种研究。E-mail:jlyl2006@163.com。

随着全球环境变化和土地资源的不合理利用,土壤盐碱化问题日益严重,已影响正常农业生产^[1]。中国盐渍化土壤在全国广泛分布,耕地中的盐渍化土壤更是严重影响着作物的生长^[2]。大豆(*Glycine max*)是我国重要的粮油作物,为人类提供优质蛋白和脂肪^[3]。目前盐碱胁迫严重影响大豆的种植面积和产量^[4],被列为大豆产量和品质下降的主要非生物胁迫之一^[5]。大豆苗期是整个生育期内的关键时期,与群体发育质量及产量密切相关^[6]。相关研究表明,大豆苗期生长情况对其后期产量具有重要影响,苗期较其他时期对盐胁迫更敏感,更易受盐害损伤^[7-8]。因此,提高大豆苗期质量对于提高大豆的产量极为重要。

微生物菌肥作为一种新型绿色肥料,具有提高作物根际微生物多样性指数、改善土壤酶活性、增加磷、钾等营养供给的功能^[9-10]。苏打盐碱地土壤理化及生物性状差,其中 Na^+ 、 CO_3^{2-} 与 HCO_3^- 离子含量高,且质地黏重、透水性差^[11]。盐碱地增施微生物菌肥可加速解离土壤中的磷、钾等营养元素,改善根际营养状况,从而大幅提高植株抗性^[12]。目前,微生物菌肥在农业上的应用已较为成熟,在多种作物上均有应用^[13-16]。前人对微生物菌肥在大豆上的应用进行了大量研究,结果发现微生物菌肥能提高大豆的百粒重和单株粒重^[17],促进大豆根系生长发育,产量增长3%~10%^[18]。还有研究表明,大豆采用菌剂拌种和鼓粒期喷施叶面菌肥,产量显著增加^[19]。盐碱地种植大豆可采用微生物途径来改善大豆生长状况,提高大豆的抗盐碱能力^[20]。

中国农业农村信息网显示,截至2023年12月,东北地区的盐碱地总面积约为500万 hm^2 ,其中苏打盐碱地占比约为60%~70%^[21]。东北地区是我国大豆种植主要区域之一,如何改良东北地区苏打盐碱土壤,扩大大豆生产面积,提高大豆产量与品质,是目前盐碱土壤资源高效利用的重要难题。本研究选用3种微生物菌肥,通过拌种、作底肥和作叶面肥等不同施肥处理方式,拟分析3种微生物菌肥不同处理对苏打盐碱地大豆幼苗生长发育及产量的影响,探讨微生物菌肥对盐碱地大豆幼苗生长的调节作用,明确微生物菌肥缓解大豆生长盐碱胁迫的应用效果,并为我国苏打盐碱地大豆种植中微生物菌肥的合理使用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试大豆品种为吉育86,由吉林省农业科学院大豆研究中心提供。

供试微生物菌肥包括:拌种(B)用肥为鑫和生物科技有限公司提供的复合微生物活性液(大豆拌种专用);底肥(D)由兆丰和美公司提供,有机质含量 $\geq 20\%$,有效活菌数 ≥ 0.2 亿 $\cdot\text{g}^{-1}$,总养分含量($\text{N} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O}$) $\geq 8\%$,比例为2:2:1;叶面肥(Y)由华联农业发展有限公司(辽宁省)提供,有效活菌数 ≥ 2.0 亿 $\cdot\text{mL}^{-1}$,有效菌种为枯草芽孢杆菌。

1.2 试验设计

试验于2023—2024年在吉林省大安市事必特家庭种植农场试验基地进行。2023年采用盆栽试验方法。在直径25 cm、高度35 cm的花盆内填充试验站内轻度盐碱化农田的0~30 cm混合表土,土壤 $\text{pH} 7.5 \sim 8.2$ 。底肥施入磷酸二铵 $45 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,尿素 $75 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。根据菌肥推荐用量设置5个菌肥处理,分别是拌种(B)、底肥(D)、叶面肥(Y)、拌种+叶面肥(B+Y)和底肥+叶面肥(D+Y),以不施用菌肥为对照(CK)。所有底肥均施于15 cm深度,随后覆土播种。每个处理设置8盆,每盆播种8粒种子,各处理均重复3次。待大豆两片真叶完全展开时进行间苗,每个盆内留长势一致的幼苗4株。处理和对照的其他管理条件均一致。待大豆第一片复叶完全展开后,对相应处理喷施叶面肥,其他处理喷施清水,每个处理喷施50~60 mL。在大豆V4期进行取样及各项指标测定。

2024年,在2023年研究基础上再次开展大田试验,采用随机区组设计,设置6行区,小区面积 19.5 m^2 ,各处理肥料用量及方法与2023年相同,重复3次。苗期各调查项目与2023年相同,成熟期进行产量及产量指标测定。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 农艺性状指标 大豆生长至V4期时,各处理选取长势一致植株,测定株高、根长、根瘤数量和单株叶面积。单株叶面积采用WY-2000叶面积仪(上海威野)测定。盆栽试验每个处理选取3株大豆进行测定,大田试验每个处理选取5株大豆进行测定。下同。

1.3.2 叶绿素含量 于大豆V4期,采用SPAD-502型叶绿素仪(日本)测定第3个复叶中间小叶片最宽处SPAD值。

1.3.3 光合参数 采用Li-6400便携式光合仪(Li-cor公司,USA),于大豆V4期测定第三片复叶中间小叶的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)。

1.3.4 抗氧化酶活性和MDA含量 采用南京建成生物工程研究所有限公司的试剂盒测定超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶

(CAT)活性;采用 Jumrani 等^[22]的方法测定丙二醛(MDA)含量。

1.3.5 产量及产量构成因素 于大豆成熟期每个重复取3点,调查每1 m²的株数,在每个重复内连续取10株大豆进行室内考种,调查各产量构成因素。

1.4 数据分析

采用 Excel 2019 软件进行数据统计分析,利用 DPS 9.05 软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 对盐碱地大豆幼苗农艺性状的影响

2.1.1 株高 由表1可知,增施微生物菌肥处理的大豆幼苗株高均高于CK,各处理株高 D + Y > B + Y > B > D > Y > CK,其中 D + Y 处理的大豆株高最高,与CK差异显著。2023年,B + Y、B、D和Y处理株高略高于CK,分别比CK增加7.56%、5.25%、2.63%和12.15%,与CK无显著性差异;2024年,B + Y处理大豆株高与CK差异显著,B、D和Y处理株高略高于CK,分别比CK增加8.02%、4.26%和1.80%,与CK无显著性差异。说明不同微生物菌肥处理均能提高大豆幼苗株高,但菌肥不同处理方式影响效果有差异,D + Y处理促进效果最明显,其

次为 B + Y 处理。

2.1.2 根长和根瘤数 由表1可知,增施微生物菌肥处理的大豆幼苗根长均高于CK,且均与CK差异极显著,各处理根长 D + Y > B + Y > B > D > Y > CK,其中 D + Y 处理的大豆根长最长,与其他各菌肥处理差异极显著。2023年,B + Y、D、Y各处理间差异极显著;B + Y与B处理间差异显著;B与D处理间差异不显著,但B与Y处理间差异极显著。2024年,B + Y与B、D、Y处理间均差异极显著;B与D处理间差异显著;B与Y、D与Y各处理间差异极显著。

由表1可以看出,增施微生物菌肥能有效增加大豆根瘤数,2023年和2024年两年试验中,各处理大豆根瘤数均呈现 D + Y > B + Y > B > D > Y > CK,其中 D + Y、B + Y处理与CK差异显著,B、D、Y各处理与CK差异不显著,B、D、Y处理的大豆根瘤数比CK分别增加16.74%、13.88%和12.11%;各菌肥处理间差异不显著。

以上分析表明不同微生物菌肥处理均有利于大豆幼苗根的生长和根瘤形成,但菌肥不同处理方式影响效果有差异,D + Y处理促进效果最明显,其次为 B + Y 处理。

表1 不同处理对大豆幼苗农艺性状的影响

Table 1 Effects of different treatments on agronomic traits of soybean seedlings

| 年份 Year | 处理 Treatment | 株高 Plant height/cm | 根长 Root length/cm | 根瘤数 Rhizobium number/个 | 单株叶面积 Leaf area per plant/cm ² |
|------------|-----------------|-----------------------|----------------------|---------------------------|--|
| 2023 | CK | 25.52 ± 1.71 Ab | 21.51 ± 0.90 Ee | 18.50 ± 1.23 Ab | 132.63 ± 0.35 Dd |
| | B | 27.45 ± 1.03 Aab | 23.86 ± 1.18 BCc | 21.85 ± 1.33 Aab | 150.48 ± 0.78 Cc |
| | D | 26.86 ± 0.95 Aab | 23.53 ± 1.04 Cc | 21.27 ± 1.28 Aab | 153.56 ± 0.41 BCb |
| | Y | 26.19 ± 1.73 Aab | 22.36 ± 1.18 Dd | 20.70 ± 1.02 Aab | 155.39 ± 0.65 Bb |
| | B + Y | 28.62 ± 0.58 Aab | 24.48 ± 0.94 Bb | 23.76 ± 0.77 Aa | 168.14 ± 1.35 Aa |
| | D + Y | 29.37 ± 0.64 Aa | 25.36 ± 0.76 Aa | 24.36 ± 0.77 Aa | 170.36 ± 1.93 Aa |
| 2024 | CK | 23.93 ± 0.58 Ab | 19.16 ± 0.69 Ef | 17.05 ± 1.01 Ab | 127.94 ± 1.30 Cc |
| | B | 25.85 ± 0.30 Aab | 21.25 ± 0.73 Cc | 19.67 ± 1.22 Aab | 134.80 ± 1.41 BCb |
| | D | 24.95 ± 0.40 Aab | 20.94 ± 0.74 Cd | 19.23 ± 1.16 Aab | 136.60 ± 1.72 Bb |
| | Y | 24.36 ± 0.75 Ab | 19.88 ± 0.71 De | 19.15 ± 1.25 Aab | 138.11 ± 1.72 Bb |
| | B + Y | 26.72 ± 0.51 Aa | 21.78 ± 0.83 Bb | 21.37 ± 0.96 Aa | 149.37 ± 2.10 Aa |
| | D + Y | 27.25 ± 0.51 Aa | 22.47 ± 0.84 Aa | 21.94 ± 1.06 Aa | 151.43 ± 3.04 Aa |

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),不同大写字母表示差异极显著($P < 0.01$)。

Note: Different lowercase letters following the data in the same column indicate significant differences at $P < 0.05$, while different uppercase letters denote highly significant differences at $P < 0.01$.

2.1.3 单株叶面积 由表1可知,增施微生物菌肥能有效提高大豆单株叶面积,各处理与CK差异显著或极显著,大豆单株叶面积 D + Y > B + Y > Y > D > B > CK,其中 D + Y、B + Y与B、D、Y各处理间均差异极显著,D + Y与B + Y处理间差异不显著。

2023年,Y与D处理间差异不显著,但与B处理间差异极显著,D与B处理间差异显著;2024年,B、D、Y各处理间差异不显著。因此,不同微生物菌肥处理均促进了大豆幼苗单株叶面积增加,有助于光合产物的合成,但菌肥不同处理方式影响效果有差

异, D + Y 处理促进效果最明显, 其次为 B + Y 处理。

2.2 对盐碱地大豆幼苗叶片光合参数的影响

2.2.1 净光合速率 微生物菌肥处理的大豆幼苗叶片净光合速率均明显高于 CK, 表现为 $D + Y > B + Y > Y > D > B > CK$ 。其中, D + Y、B + Y 处理间差异不显著, D + Y、B + Y、Y 各处理与 CK 均差异极显著。2023 年, D 与 CK、B 与 CK、D + Y 与 Y、D + Y 与 D 各处理间差异显著; D + Y、B + Y 与 B 处理间差异极显著; B + Y 与 Y、B + Y 与 D 以及 Y、D、B 处理间差异不显著。2024 年, D 与 CK、D + Y 与 B、D + Y 与 D、D + Y 与 Y、B + Y 与 B 各处理间差异极显著; B 与 CK、B + Y 与 D、B + Y 与 Y、Y 与 B 处理间差异显著; D、B 处理间差异不显著(表 2)。由此可知, 增施微生物菌肥能够提升大豆幼苗叶片净光合速率, 有助于光合作用的进行及碳水化合物的合成, 不同处理增幅不同, D + Y 处理叶片净光合速率最高。

2.2.2 气孔导度 2023 年和 2024 年两年试验结果均表明: 菌肥处理的大豆幼苗叶片气孔导度值明显高于 CK, 表现为 $D + Y > B + Y > D > B > Y > CK$, 且 D + Y、B + Y 处理均与 CK 差异极显著, D、B、Y 各处理均与 CK 差异显著; D + Y 与 B、Y 处理间差异显著, D + Y、B + Y、D 各处理间及 B + Y、D、B、Y 各处理间均差异不显著(表 2)。由此可知, 增施微生物菌肥有助于提高大豆幼苗时期叶片气孔张开程度, 促进气体交换与水分散失, 不同处理影响效果不同, D + Y 处理最有利于叶片气孔张开。

2.2.3 胞间 CO_2 浓度 微生物菌肥处理的大豆幼苗叶片胞间 CO_2 浓度明显低于 CK, 表现为 $D + Y < B + Y < Y < D < B < CK$, 且 D + Y、B + Y 处理均与 CK 差异极显著, Y、D、B 各处理与 CK 差异显著。2023 年, D + Y 与 D、D + Y 与 B、B + Y 与 B 各处理间均差异显著; D + Y 与 B + Y、D + Y 与 Y、B + Y 与 Y、B + Y 与 D 各处理间均差异不显著; B、D、Y 处理间差异不显著。2024 年, D + Y 与 D、D + Y 与 B、B + Y 与 B 各处理间均差异极显著; D + Y 与 Y、B + Y 与 Y、B + Y 与 D 各处理间均差异显著; D + Y 与 B + Y 处理间及 B、D、Y 各处理间均差异不显著(表 2)。说明增施微生物菌肥能够有效调控大豆幼苗叶片胞间 CO_2 浓度, 有助于光合作用的进行, 不同处理有所差异, D + Y 处理叶片胞间 CO_2 浓度最低。

2.2.4 蒸腾速率 微生物菌肥处理的大豆幼苗叶片蒸腾速率均明显高于 CK, 表现为 $D + Y > B + Y > Y > D > B > CK$ 。2023 年, D + Y、B + Y、Y、D 各处理与 CK 均差异极显著, B 处理与 CK 差异显著, D + Y 与 B 处理差异极显著, D + Y 与 Y、D 处理间差异显著, B + Y 与 D + Y、Y 处理间及 B、D、Y 各处理间均差异不显著。2024 年, 各菌肥处理与 CK 均差异极显著, D + Y 与 D、B 处理间及 B + Y 与 D、B 处理间均差异显著, D + Y、B + Y、Y 各处理间及 B、D、Y 各处理间均差异不显著(表 2)。由此可知, 微生物菌肥可通过提高大豆幼苗的蒸腾速率促进蒸腾作用, 有利于叶片对营养物质的吸收, 不同处理增幅不同, D + Y 处理叶片蒸腾速率最高。

表 2 不同处理对大豆幼苗叶片光合参数的影响

Table 2 Effects of different treatments on photosynthetic parameter of soybean seedlings

| 年份 Year | 处理 Treatment | 净光合速率 $P_n / (\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ | 气孔导度 $G_s / (\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ | 胞间 CO_2 浓度 $C_i / (\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1})$ | 蒸腾速率 $T_r / (\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ |
|------------|-----------------|---|---|---|---|
| 2023 | CK | 18.50 ± 0.81 Cd | 0.48 ± 0.06 Bc | 317.86 ± 5.61 Aa | 3.14 ± 0.10 Cd |
| | B | 20.80 ± 0.67 BCc | 0.61 ± 0.07 ABb | 303.49 ± 6.97 ABb | 3.76 ± 0.21 BCc |
| | D | 21.90 ± 0.45 ABCbc | 0.65 ± 0.07 ABab | 300.51 ± 9.54 ABCb | 3.89 ± 0.10 ABc |
| | Y | 22.37 ± 0.87 ABbc | 0.60 ± 0.04 ABb | 291.65 ± 5.69 ABCbc | 4.06 ± 0.15 ABbc |
| | B + Y | 24.31 ± 0.94 Aab | 0.71 ± 0.09 Aab | 273.67 ± 9.29 BCc | 4.36 ± 0.10 ABab |
| | D + Y | 25.52 ± 0.97 Aa | 0.75 ± 0.07 Aa | 271.54 ± 6.84 Cc | 4.49 ± 0.17 Aa |
| 2024 | CK | 16.65 ± 0.38 Dd | 0.44 ± 0.05 Bc | 281.49 ± 2.50 Aa | 2.79 ± 0.04 Bc |
| | B | 18.35 ± 0.42 CDc | 0.57 ± 0.04 ABb | 267.13 ± 5.54 ABb | 3.37 ± 0.15 Ab |
| | D | 19.71 ± 0.98 BCbc | 0.59 ± 0.04 ABab | 263.95 ± 6.27 ABCb | 3.46 ± 0.02 Ab |
| | Y | 20.13 ± 0.51 BCb | 0.55 ± 0.04 ABb | 259.65 ± 5.01 BCDb | 3.52 ± 0.08 Aab |
| | B + Y | 21.93 ± 0.55 ABa | 0.64 ± 0.08 Aab | 242.33 ± 6.05 CDc | 3.80 ± 0.19 Aa |
| | D + Y | 22.88 ± 0.59 Aa | 0.68 ± 0.06 Aa | 240.02 ± 3.29 Dc | 3.91 ± 0.12 Aa |

注: 同列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

Note: Different lowercase letters following the data in the same column indicate significant differences at $P < 0.05$, while different uppercase letters denote highly significant differences at $P < 0.01$.

2.3 对盐碱地大豆幼苗 SPAD 值的影响

增施微生物菌肥能不同程度提高大豆幼苗 SPAD 值。2023 年, $D+Y > B+Y > D > Y > B > CK$, $D+Y$ 处理与 CK 差异极显著, $D+Y$ 与 B、 $B+Y$ 与 CK 处理间均差异显著, $D+Y$ 、 $B+Y$ 、 D 、 Y 各处理间及 B、 D 、 Y 、CK 各处理间、 $B+Y$ 与 B 处理间均差异不显著; 2024 年, $D+Y > B+Y > Y > D > B > CK$, 菌肥各处理与 CK 间均差异极显著, $D+Y$ 、 $B+Y$ 处理与 B、 D 、 Y 各处理间及 Y 与 B 处理间均差异极显著 ($P < 0.01$), Y 与 D、D 与 B 处理间差异不显著 (表 3)。说明增施微生物菌肥能够提高大豆幼苗叶片的 SPAD 值, 进而促进大豆幼苗光合作用; 不同年份不同菌肥处理影响程度不同, 两年试验 $D+Y$ 处理叶片 SPAD 值均最高, $B+Y$ 处理次之。

表 3 不同处理对盐碱地大豆幼苗 SPAD 值和 MDA 含量的影响

Table 3 Effects of different treatments on SPAD value and MDA content in leaves of soybean seedlings in saline alkali soil

| 年份 Year | 处理 Treatment | SPAD 值 SPAD value | MDA 含量 MDA content |
|------------|-----------------|----------------------|-----------------------|
| 2023 | CK | 29.51 ± 1.64 Bc | 24.94 ± 0.41 Aa |
| | B | 32.83 ± 1.16 ABbc | 20.91 ± 1.07 Bb |
| | D | 34.31 ± 1.13 ABabc | 19.76 ± 0.72 Bbc |
| | Y | 33.52 ± 1.16 ABabc | 20.43 ± 1.14 Bbc |
| | B+Y | 35.62 ± 0.72 ABab | 17.16 ± 1.13 Bbc |
| | D+Y | 36.58 ± 1.79 Aa | 16.58 ± 1.10 Bc |
| 2024 | CK | 28.15 ± 0.72 Dd | 22.35 ± 0.30 Aa |
| | B | 30.37 ± 0.79 Cc | 19.06 ± 0.28 Bb |
| | D | 31.06 ± 0.68 BCbc | 17.99 ± 0.92 Bc |
| | Y | 31.63 ± 0.47 Bb | 18.59 ± 0.61 Bbc |
| | B+Y | 33.19 ± 0.78 Aa | 15.62 ± 0.32 Cd |
| | D+Y | 33.31 ± 0.46 Aa | 15.14 ± 0.35 Cd |

注: 同列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

Note: Different lowercase letters following the data in the same column indicate significant differences at $P < 0.05$, while different uppercase letters denote highly significant differences at $P < 0.01$.

2.4 对盐碱地大豆幼苗 MDA 含量的影响

在盐碱地增施微生物菌肥, 可使大豆幼苗 MDA 含量降低, 缓解大豆幼苗氧化损伤。2023 年和 2024 年试验中, 各处理 MDA 含量 $D+Y < B+Y < D < Y < B < CK$, 菌肥各处理均与 CK 差异极显著。2023

年, $D+Y$ 与 B 处理差异显著, 与 $B+Y$ 、 D 、 Y 各处理差异不显著, $B+Y$ 、 D 、 Y 、B 各菌肥处理间差异不显著; 2024 年, $D+Y$ 、 $B+Y$ 与 B、 D 、 Y 各处理间均差异极显著, B、 D 处理间差异显著, B 与 Y、Y 与 D 处理间均差异不显著 (表 3)。以上分析说明, 增施微生物菌肥能够降低盐碱地大豆幼苗体内的 MDA 积累, 缓解膜系统受到的氧化损伤, 从而提高植株抗盐碱能力, 不同菌肥处理效果不同, 其中 $D+Y$ 处理效果最好, $B+Y$ 次之。

2.5 对盐碱地大豆幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

2.5.1 SOD 活性 2023 和 2024 年两年试验结果均表明: 增施微生物菌肥能够不同程度提高大豆幼苗叶片 SOD 活性, 各处理 SOD 活性表现为 $D+Y > B+Y > B > D > Y > CK$, 其中 $D+Y$ 、 $B+Y$ 处理均与 CK 差异极显著, B、 D 和 Y 处理略高于 CK, 无显著性差异, 比 CK 分别增加 9.45%、7.84% 和 7.77%; $B+Y$ 、B、 D 、 Y 各处理间 SOD 活性无显著性差异。这表明不同微生物菌肥处理均可以提高盐碱地大豆幼苗叶片 SOD 活性, 提升其清除氧自由基的能力, 进而提高了植物抗盐碱能力; 不同处理方式影响程度不同, $D+Y$ 处理方式影响效果最明显, $B+Y$ 处理次之 (表 4)。

2.5.2 POD 活性 增施微生物菌肥能够增强大豆幼苗叶片 POD 活性, 各处理 POD 活性表现为 $D+Y > B+Y > B > D > Y > CK$, 其中 $D+Y$ 、 $B+Y$ 处理均与 CK 差异极显著, 微生物菌肥各处理间 POD 活性差异不显著; 2023 年, B、 D 、 Y 各处理与 CK 差异不显著, 比 CK 分别增加 7.01%、5.76% 和 4.50%; 2024 年, B、 D 、 Y 各处理均与 CK 差异显著。这表明不同微生物菌肥处理均可以提高盐碱地大豆幼苗叶片 POD 活性, 减少膜脂氧化损伤; 不同处理方式影响程度不同, $D+Y$ 处理方式影响效果最明显, $B+Y$ 处理次之 (表 4)。

2.5.3 CAT 活性 2023 年和 2024 年试验中, 增施微生物菌肥能够提高大豆幼苗叶片 CAT 活性, 微生物菌肥处理对 CAT 活性影响规律相同, 各处理 CAT 活性表现为 $D+Y > B+Y > D > B > Y > CK$, 其中 $D+Y$ 、 $B+Y$ 处理均与 CK 差异显著, $D+Y$ 、 $B+Y$ 、 D 、B、 Y 各处理之间无显著性差异, D 、B、 Y 各处理均与 CK 差异不显著, 比 CK 分别增加 12.52%、10.13% 和 8.78%。这表明不同微生物菌肥处理均可以提高盐碱地大豆幼苗叶片 CAT 活性, 保护细胞免受氧化损伤; 不同处理方式影响程度不同, $D+Y$ 处理方式影响效果最明显, $B+Y$ 处理次之 (表 4)。

表4 不同处理对大豆幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

Table 4 Effects of different treatments on antioxidant enzyme activity of soybean seedlings

| 年份 Year | 处理 Treatment | SOD | POD | CAT |
|------------|-----------------|--------------------|------------------|------------------|
| 2023 | CK | 57.86 ± 1.00 Bc | 5.56 ± 0.09 Bb | 3.47 ± 0.07 Ac |
| | B | 64.13 ± 1.35 ABabc | 5.95 ± 0.13 ABab | 3.86 ± 0.17 Aabc |
| | D | 63.57 ± 1.26 ABbc | 5.88 ± 0.11 ABab | 3.94 ± 0.18 Aabc |
| | Y | 63.53 ± 1.07 ABbc | 5.81 ± 0.07 ABab | 3.81 ± 0.14 Aabc |
| | B + Y | 68.52 ± 1.93 Aab | 6.15 ± 0.06 Aa | 4.27 ± 0.14 Aab |
| | D + Y | 68.86 ± 1.10 Aa | 6.23 ± 0.14 Aa | 4.46 ± 0.21 Aa |
| 2024 | CK | 54.08 ± 1.12 Bc | 4.89 ± 0.10 Bb | 3.22 ± 0.09 Ac |
| | B | 58.44 ± 1.03 ABabc | 5.39 ± 0.18 ABa | 3.51 ± 0.22 Aabc |
| | D | 57.22 ± 1.13 ABbc | 5.34 ± 0.12 ABa | 3.59 ± 0.23 Aabc |
| | Y | 57.18 ± 1.47 ABbc | 5.28 ± 0.10 ABa | 3.47 ± 0.18 Aabc |
| | B + Y | 60.67 ± 1.23 Aab | 5.56 ± 0.13 Aa | 3.89 ± 0.18 Aab |
| | D + Y | 61.98 ± 1.29 Aa | 5.63 ± 0.13 Aa | 4.04 ± 0.23 Aa |

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),不同大写字母表示差异极显著($P < 0.01$)。

Note: Different lowercase letters following the data in the same column indicate significant differences at $P < 0.05$, while different uppercase letters denote highly significant differences at $P < 0.01$.

2.6 对盐碱地大豆产量及产量构成因素的影响

2.6.1 单株有效荚数 增施微生物菌肥能够提高大豆单株有效荚数, D + Y 处理最高, 为 24.56 个; 各处理单株有效荚数 D + Y > B + Y > D > Y > B > CK, D + Y、B + Y 处理与 CK 均差异显著, D、Y 和 B 处理与 CK 均差异不显著; D + Y、B + Y、D 和 Y 各处理间及 D、Y 与 B 处理间均差异不显著 ($P > 0.05$), B + Y、D + Y 与 B 处理间均差异显著 (表 5)。说明不同微生物菌肥处理均能增加大豆单株有效荚数, 不同处理方式影响程度不同, D + Y 处理增加幅度最大, B + Y 处理次之。

2.6.2 单株粒数 增施微生物菌肥能够提高大豆单株粒数, D + Y 处理单株粒数最高, 为 50.03 个; 各处理单株粒数 D + Y > B + Y > Y > D > B > CK, 其中 D + Y、B + Y 处理与 CK 均差异极显著, D、Y 处理与 CK 均差异显著, B 处理与 CK 差异不显著。各处理间比较, D + Y 与 B + Y、B + Y 与 Y、Y 与 D、D 与 B 处理间均差异不显著; D + Y 与 Y、D + Y 与 D、B + Y 与 D、Y 与 B 处理间均差异显著; D + Y 与 B、B + Y 与 B 处理间均差异极显著 (表 5)。说明不同微生物菌肥处理均能增加大豆单株粒数, 不同处理方式影响程度不同, D + Y 处理增加幅度最大, B + Y 处理次之。

2.6.3 单株粒重 增施微生物菌肥能够提高大豆的单株粒重, 其中 D + Y 处理的单株粒重最高, 为

9.38 g。各处理单株粒重排序为 D + Y > B + Y > Y > D > B > CK, 其中 D + Y、B + Y 处理与 CK 均差异极显著, Y、D、B 各处理与 CK 差异不显著; D + Y、B + Y、Y、D 和 B 处理间差异不显著 (表 5)。说明不同微生物菌肥处理均能增加大豆单株粒重, 不同处理方式影响程度不同, D + Y 处理增加幅度最大, B + Y 处理次之。

2.6.4 百粒重 增施微生物菌肥能够提高大豆百粒重, 其中 D + Y 处理最高, 为 19.99 g。各处理百粒重 D + Y > B + Y > D > Y > B > CK, 其中 D + Y、B + Y 处理与 CK 均差异显著, D、Y、B 各处理与 CK 均差异不显著; D + Y、B + Y、D、Y、B 各处理间差异不显著 (表 5)。说明不同微生物菌肥处理均能增加大豆百粒重, 不同处理方式影响程度不同, D + Y 处理增加幅度最大, B + Y 处理次之。

2.6.5 产量 增施微生物菌肥能够提高大豆产量, D + Y 处理产量最高, 为 1 887.82 kg·hm⁻²。各处理产量 D + Y > B + Y > D > Y > B > CK, 其中 D + Y、B + Y、D、Y 各处理与 CK 均差异极显著, B 处理与 CK 差异显著; D + Y、B + Y 处理间差异不显著, D + Y、B + Y 处理与 D、Y、B 各处理间均差异极显著, D、Y 与 B 处理间均差异极显著; D 与 Y 处理间差异不显著 (表 5)。说明不同微生物菌肥处理均能增加大豆产量, 不同处理方式影响程度不同, D + Y 处理提升幅度最大, B + Y 处理次之。

表 5 不同处理对大豆产量及产量构成因素的影响
Table 5 Effects of different treatments on soybean yield and yield components

| 处理 Treatment | 单株有效荚数 Effective pods number per plant/个 | 单株粒数 Seeds number per plant/个 | 单株粒重 Seed weight per plant/g | 百粒重 100-seed weight/g | 理论产量 Theoretical yield/ (kg·hm ⁻²) |
|-----------------|---|-------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|--|
| CK | 20.38 ± 0.79 Ab | 43.75 ± 0.82 Be | 7.43 ± 0.38 Ab | 17.56 ± 0.47 Ab | 1492.46 ± 78.61 Cd |
| B | 21.46 ± 0.71 Ab | 44.92 ± 0.72 Bde | 7.98 ± 0.44 Aab | 18.53 ± 0.45 Aab | 1580.28 ± 93.02 Cc |
| D | 22.87 ± 0.86 Aab | 46.84 ± 0.59 ABcd | 8.51 ± 0.62 Aab | 19.02 ± 0.76 Aab | 1706.08 ± 70.89 Bb |
| Y | 21.93 ± 0.97 Aab | 47.36 ± 0.87 ABbc | 8.52 ± 0.94 Aab | 18.83 ± 0.67 Aab | 1698.21 ± 73.53 Bb |
| B + Y | 24.13 ± 0.72 Aa | 49.30 ± 0.83 Aab | 9.21 ± 0.77 Aa | 19.76 ± 0.56 Aa | 1833.07 ± 74.43 Aa |
| D + Y | 24.56 ± 0.83 Aa | 50.03 ± 0.81 Aa | 9.38 ± 0.71 Aa | 19.99 ± 0.78 Aa | 1887.82 ± 84.30 Aa |

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),不同大写字母表示差异极显著($P < 0.01$)。

Note: Different lowercase letters following the data in the same column indicate significant differences at $P < 0.05$, while different uppercase letters denote highly significant differences at $P < 0.01$.

3 讨论

3.1 微生物菌肥对盐碱地大豆幼苗农艺性状的影响

微生物菌肥对植株农艺性状的影响研究表明,菌肥处理显著影响作物的株高、茎粗和叶面积^[23]。候婷婷等^[24]试验发现,复合微生物菌剂在根瘤菌的配施下明显增加大豆结瘤数、根瘤干质量、根瘤鲜质量、株高、根长、单株质量和生物量,促进大豆的生长发育,尤其对根系生长有着显著的促进作用。本研究结果表明,盐碱地增施微生物菌肥能提高苗期大豆株高、根长、根瘤数和单株叶面积,与前人^[23-24]的研究结果相同。同时表明,微生物菌肥不同处理方式对各农艺性状影响幅度不同,两年试验中,B、D、Y、B + Y 和 D + Y 各处理株高分别比 CK 平均增加 7.79%、4.76%、2.21%、11.90% 和 14.48%,根长分别比 CK 平均增加 10.92%、9.34%、3.86%、13.74% 和 17.59%,根瘤数分别比 CK 平均增加 16.74%、13.88%、12.10%、26.88% 和 30.18%,单株叶面积分别比 CK 平均增加 9.41%、11.27%、12.55%、21.76% 和 23.40%; D + Y 处理株高、根长、根瘤数和单株叶面积值均最高,B + Y 次之,与 CK 相比,除 2023 年 B + Y 处理的株高外,其余均差异显著或极显著。以上分析说明微生物菌肥能提高苗期大豆株高、根长、根瘤数和单株叶面积,对根瘤数和单株叶面积提升幅度比较大,施加 2 次微生物菌肥,大豆苗期各农艺性状明显优于 1 次施加。

3.2 微生物菌肥对盐碱地大豆幼苗光合参数的影响

微生物菌肥能不同程度地提高和改善作物的光合特性,显著增强作物的光合效能^[25-26]。植物的

净光合速率、蒸腾速率和气孔导度等指标随着微生物菌肥施用量的增加显著提高,胞间 CO₂ 浓度降低^[27]。本研究结果表明,盐碱地增施微生物菌肥能提高大豆幼苗净光合速率、气孔导度和蒸腾速率,降低胞间 CO₂ 浓度,与前人^[25-27]的研究结果基本相同。本研究还表明,微生物菌肥的不同处理方式对大豆幼苗光合参数的影响程度不同,两年试验中,与 CK 相比,B、D、Y、B + Y 和 D + Y 各处理净光合速率平均分别增加 11.32%、18.38%、20.91%、31.56% 和 37.68%,气孔导度平均分别增加 26.04%、34.75%、25.00%、46.69% 和 55.40%,蒸腾速率平均分别增加 20.27%、23.95%、29.52%、37.53% 和 41.56%,胞间 CO₂ 浓度平均分别降低 3.81%、5.84%、8.00%、13.91% 和 14.65%; D + Y 处理对光合参数影响最大,其次为 B + Y 处理,二者与 CK 之间均差异极显著。以上分析说明,微生物菌肥的施用会增强植株叶片光合能力,施用 2 次微生物菌肥的处理对盐碱地大豆幼苗光合参数影响更显著。

3.3 微生物菌肥对盐碱地大豆幼苗生理指标的影响

叶绿素是光合作用中最重要的色素之一,其含量直接影响光合作用强弱,与植株生长发育相关^[28]。庞强强等^[29]研究发现,微生物菌肥可以增强植株叶片光捕获能力,从而改善植物的光合性能,提高植物的叶绿素含量。本研究结果表明,微生物菌肥能够提高盐碱地大豆幼苗叶片叶绿素含量,增强大豆叶片光合作用,与庞强强等^[29]的研究结果相同。本研究结果还表明,不同微生物菌肥处理方式对大豆叶片叶绿素含量影响幅度不同,两年试验中,B、D、Y、B + Y 和 D + Y 各处理叶绿素含量分别比 CK 平均增加 9.57%、13.30%、12.98%、

19.52%和20.93% ;D + Y 处理大豆叶片叶绿素含量最高,B + Y 次之,均与CK 差异极显著。说明增施微生物菌肥能够缓解盐碱胁迫引起的叶绿素降解,增加大豆幼苗叶片中叶绿素含量,提高光合性能,从而缓解盐碱胁迫造成的生长抑制,施加2次微生物菌肥的叶片叶绿素含量提升效果更明显。

SOD、POD 和 CAT 是植物抗逆境胁迫中的重要组成部分,3种酶的协同作用有助于提高植物抗氧化能力^[30]。MDA 作为生物体内氧化损伤的生物标志物,其含量可直接反映膜脂过氧化程度及植物抗逆性。鹿鑫等^[31]研究发现,菌剂拌种处理对盐碱地大豆植株叶片 POD、SOD 活性和 MDA 含量影响不明显。杨倩等^[32]研究证实,盐胁迫状态下的高粱采用微生物菌肥灌根处理能够提升体内超氧化物歧化酶活性,降低丙二醛含量,提升幼苗抗旱性和抗盐性。本研究结果表明,微生物菌肥能够提高盐碱地大豆幼苗叶片 POD、SOD 和 CAT 活性,降低 MDA 含量,缓解了大豆幼苗氧化损伤。本研究结果与鹿鑫等^[31]研究结果不完全相同,与杨倩等^[32]研究结果基本相同,可能是试验取样于不同生育时期,或者微生物菌肥不同,导致结果不同,有待进一步研究。本研究结果还表明,两年试验中,与CK 相比,B、D、Y、B + Y 和 D + Y 各处理 SOD 值平均分别增加 8.51%、6.90%、6.83%、14.30% 和 15.80%,POD 值平均分别增加 10.62%、9.45%、8.19%、14.22% 和 15.68%,CAT 值平均分别增加 11.87%、14.30%、10.51%、23.81% 和 29.01%,MDA 含量平均分别降低 18.55%、23.08%、20.49%、33.21% 和 35.36%;D + Y 处理对 POD、SOD、CAT 活性和 MDA 含量影响最大,其次为 B + Y 处理,二者与CK 之间均差异极显著。

综上所述,不同微生物菌肥处理能够一定程度上缓解盐碱胁迫给大豆幼苗带来的损害,提高大豆植株抵抗盐碱胁迫的能力,其中施用2次微生物菌肥的处理抗盐碱效果更好。

3.4 微生物菌肥对盐碱地大豆产量及产量构成因素的影响

微生物菌肥富含微生物,能够改善土壤微生物群落和养分结构,促进植物生长,从而提高产量^[33]。鹿鑫等^[31]对复合菌剂在盐碱地大豆上的应用研究发现,复合菌剂拌种能提高大豆单株有效荚数、单株粒数、百粒重等相关指标,进而实现大豆产量显著增加。本研究证实了盐碱地增施微生物菌肥能提高大豆单株有效荚数、单株粒数、单株粒重、百粒重和产量。研究结果还表明,不同微生物菌肥处理方式对产量及产量构成因素影响效果不尽相同,与

CK 相比,B、D、Y、B + Y 和 D + Y 各处理单株有效荚数分别增加 5.30%、12.21%、7.61%、18.40% 和 20.51%,单株粒数分别增加 2.67%、7.06%、8.25%、12.69% 和 14.35%,单株粒重分别增加 7.40%、14.54%、14.67%、23.95% 和 26.24%,百粒重分别增加 5.53%、8.31%、7.23%、12.53% 和 13.83%,产量分别增加 5.88%、14.31%、13.79%、22.82% 和 26.49%;D + Y 处理产量及产量构成因素增加幅度最大,B + Y 次之,说明增施微生物菌肥能提高与产量相关的各项指标值,从而增加大豆产量;施加2次微生物菌肥后各处理的产量及产量指标均明显好于各施加1次微生物菌肥的处理。

4 结论

研究表明,盐碱地增施微生物菌肥能够提高大豆幼苗株高、根长、根瘤数和单株叶面积,大豆幼苗长势明显好于对照。不同微生物菌肥处理均显著提高大豆幼苗叶片的光合能力,使净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和叶绿素含量显著增加,胞间 CO₂ 浓度显著降低。施用微生物菌肥还能够不同程度提高 SOD、POD 和 CAT 的活性,显著降低 MDA 含量。增施微生物菌肥能提高大豆产量及单株有效荚数、单株粒数、单株粒重和百粒重,B、D、Y、B + Y 和 D + Y 各处理大豆产量分别比CK 增加 5.88%、14.31%、13.79%、22.82% 和 26.49%。微生物菌肥 D + Y 处理综合效果最佳,B + Y 处理综合效果次之。因此,盐碱地大豆可采用适当增施微生物菌肥来达到大豆增产的目的。本研究仅针对微生物菌肥对盐碱地大豆幼苗时期部分指标及成熟期产量的影响展开探讨,对其他指标及不同生育时期的影响有待后续研究。

参考文献

- [1] VAN ZELM E, ZHANG Y, TESTERINK C. Salt tolerance mechanisms of plants[J]. Annual Review of Plant Biology, 2020, 71: 403-433.
- [2] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 837-845.
YANG J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 837-845.
- [3] 刘美玲, 冯乃杰, 郑殿峰, 等. 不同浓度吡啶丁酸钾对大豆苗期生长发育及生理代谢的影响[J]. 大豆科学, 2021, 40(2): 217-223.
LIU M L, FENG N J, ZHENG D F, et al. Effects of different concentrations of potassium indole butyrate on soybean growth development and physiological metabolism at seedlings stage[J]. Soybean Science, 2021, 40(2): 217-223.

- [4] 王娜, 谢强, 陈井生, 等. 盐碱胁迫下不同木霉菌肥对大豆幼苗氮代谢的影响[J]. 大豆科学, 2023, 42(6): 726-732.
WANG N, XIE Q, CHEN J S, et al. Effects of different *Trichoderma* fertilizers on nitrogen metabolism of soybean seedlings under saline-alkali stress[J]. Soybean Science, 2023, 42(6): 726-732.
- [5] RAVELOMBOLO W, DONG L, BARICKMAN T C, et al. Evaluation of salt tolerance in cowpea at seedling stage [J]. Euphytica, 2021, 217(6): 116.
- [6] 刘文夫, 董守坤, 徐亚会, 等. 大豆苗期干旱胁迫对糖分吸收与相关酶活性的影响[J]. 作物杂志, 2014(3): 117-120.
LIU W F, DONG S K, XU Y H, et al. Effects of drought stress on sugar absorption and related enzyme activities at soybean seedling[J]. Crops, 2014(3): 117-120.
- [7] 侯鹏浩, 杨万明, 杜维俊, 等. 不同程度盐胁迫对大豆苗期生物量及生理指标的影响[J]. 大豆科学, 2020, 39(3): 422-430.
HOU P H, YANG W M, DU W J, et al. Effects of different degree salt stress on biomass and physiological indexes of soybean seedling[J]. Soybean Science, 2020, 39(3): 422-430.
- [8] 牛远, 杨修艳, 戴存凤, 等. 大豆芽期和苗期耐盐性评价指标筛选[J]. 大豆科学, 2018, 37(2): 215-223.
NIU Y, YANG X Y, DAI C F, et al. Related indices selection of soybean salt tolerance at germination and seedling stages [J]. Soybean Science, 2018, 37(2): 215-223.
- [9] 黄玉波, 庄秋丽, 李习军. 复合生物菌肥在大豆种植上的应用效果初报[J]. 农业科技通讯, 2014(10): 114-115.
HUANG Y B, ZHUANG Q L, LI X J. Preliminary report on the application effect of compound biological bacterial fertilizer in soybean planting [J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2014(10): 114-115.
- [10] 武志海, 刘晶晶, 杨美英, 等. 外源溶磷菌对不同土壤条件下大豆生长特性的影响[J]. 大豆科学, 2017, 36(1): 78-86.
WU Z H, LIU J J, YANG M Y, et al. Effects of exogenous phosphate-solubilizing bacteria on growth characteristics of soybean under different soil condition [J]. Soybean Science, 2017, 36(1): 78-86.
- [11] 全淑萍, 梁正伟, 关法春, 等. 松嫩平原苏打盐碱地羊草人工移栽草地生物多样性特征和生物量[J]. 草地学报, 2019, 27(1): 22-27.
TONG S P, LIANG Z W, GUAN F C, et al. Biodiversity characteristics and biomass of artificial transplanting leymus chinensis grassland in soda saline-alkali land of Songnen Plain [J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(1): 22-27.
- [12] HSU S H, SHEN M W, CHEN J C, et al. The photosynthetic bacterium *Rhodospseudomonas palustris* strain PS3 exerts plant growth-promoting effects by stimulating nitrogen uptake and elevating auxin levels in expanding leaves[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 573634.
- [13] 张盼, 马佳琪, 董文恒, 等. 玉米产量、肥料利用率对化肥减量配施微生物菌肥的响应[J]. 天津农业科学, 2024, 30(7): 20-24.
ZHANG P, MA J Q, DONG W H, et al. Response of maize yield and fertilizer utilization to reduction in chemical fertilizer and application of microbial fertilizer [J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2024, 30(7): 20-24.
- [14] 许立阳, 王亚男, 曾希柏, 等. 微生物菌肥对瘠薄稻田土壤养分及水稻生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(10): 2350-2362.
XU L Y, WANG Y N, ZENG X B, et al. Microbial fertilizer effects on soil nutrients and rice growth in barren paddy fields[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(10): 2350-2362.
- [15] 轩晓博, 赵文靖, 李树瑶, 等. 微生物菌肥对盐碱地向日葵减施氮肥效应研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2023, 43(3): 102-111.
XUAN X B, ZHAO W J, LI S Y, et al. Study on the effect of microbial fertilizer on reducing nitrogen fertilizer application on *Helianthus annuus* L. in saline-alkali Soil [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2023, 43(3): 102-111.
- [16] 张建鹏. 化肥减量配施微生物菌肥及土壤调理剂对重茬马铃薯生长发育和土壤质量的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(7): 205-21.
ZHANG J P. Effect of reduced chemical fertilizer application combined with microbial fertilizer and soil conditioner on the growth and development of consecutive cropping potatoes and soil quality [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(7): 205-212.
- [17] 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.
- [18] 姚延轩, 接伟光, 胡崴, 等. 微生物菌肥对大豆生长发育及根际土壤性质的影响综述[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(20): 21-24, 38.
YAO Y X, JIE W G, HU W, et al. Research progress on the effects of microbial fertilizer on the growth and development of soybean and the properties of rhizosphere soil [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2019, 58(20): 21-24, 38.
- [19] 冯明印, 吕泽芬, 李国强. 生物菌肥在大豆上应用效果研究[J]. 现代农业科技, 2007(1): 87, 89.
FENG M Y, LÜ Z F, LI G Q. Study on the application effect of biological bacterial fertilizer on soybean [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2007(1): 87, 89.
- [20] 武志海, 刘晶晶, 付丽, 等. 溶磷菌对大豆根际土壤酶活性及微生物群落的影响[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(11): 58-67.
WU Z H, LIU J J, FU L, et al. Effects of phosphate solubilizing bacteria on the soil enzyme activities and microecology of soybean rhizosphere [J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(11): 58-67.
- [21] 王俊岭. 盐碱地如何变身黑土地 [EB/OL]. (2023-11-01) [2024-12-22]. https://www.moa.gov.cn/xw/qg/202311/t20231102_643966.htm.
- [22] WANG J L. How does saline-alkali land turn into black land [EB/OL]. (2023-11-01) [2024-12-22]. https://www.moa.gov.cn/xw/qg/202311/t20231102_643966.htm.
- [22] JUMRANI K, BHATIA V S. Interactive effect of temperature and

- water stress on physiological and biochemical processes in soybean [J]. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 2019, 25(3): 667-681.
- [23] 张萍萍. 微生物菌肥对土壤及作物的改良效果研究—以蔬菜为例[D]. 厦门: 厦门大学, 2022.
ZHANG P P. Study on the improvement effect of microbial fertilizers on soil and crop-waterspinach as an example [D]. Xiamen: Xiamen University, 2022.
- [24] 候婷婷, 于德水, 何鑫, 等. 复合微生物菌剂对大豆生长发育、结瘤和产量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(10): 65-72.
HOU T T, YU D S, HE X, et al. Effects of complex microbial inoculants on growth, nodulation and yield of soybean[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(10): 65-72.
- [25] 孟思达, 张文祥, 郑昕雨, 等. 不同微生物菌肥对日光温室袋培番茄生长、产量和品质的影响[J]. *北方园艺*, 2021(7): 49-54.
MENG S D, ZHANG W X, ZHENG X Y, et al. Effects of different microbial inoculants treatment on growth, yield and quality of tomato in greenhouse[J]. *Northern Horticulture*, 2021(7): 49-54.
- [26] 刘华, 李明, 田永强. 化肥减量配施微生物肥对黄芪生长及产量的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2022(1): 67-70.
LIU H, LI M, TIAN Y Q. Effects of reducing chemical fertilizer combined with microbial fertilizer on the growth and yield of *Astragalus membranaceus*[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2022(1): 67-70.
- [27] 周进. 生物菌肥施用对温室辣椒光合特性、产量和品质的影响[J]. *北方园艺*, 2021(1): 42-47.
ZHOU J. Effects of microbial fertilizer application on photosynthetic characteristics, yield and quality of greenhouse pepper[J]. *Northern Horticulture*, 2021(1): 42-47.
- [28] 刘玉兰, 陈殿元, 元明浩, 等. 种植密度对小粒大豆光合生产能力的影响[J]. *大豆科学*, 2018, 37(4): 551-557.
LIU Y L, CHEN D Y, YUAN M H, et al. Effects of planting density on photosynthetic capacity of *Glycine gracilis*[J]. *Soybean Science*, 2018, 37(4): 551-557.
- [29] 庞强强, 蔡兴来, 周曼, 等. 微生物菌肥对设施白菜生长、品质和土壤酶活性的影响[J]. *热带农业科学*, 2018, 38(4): 20-23.
PANG Q Q, CAI X L, ZHOU M, et al. Effects of microbial fertilizer on the growth, quality and soil enzyme activities of pakchoi in the solar greenhouse[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2018, 38(4): 20-23.
- [30] 包悦琳, 陈鸽, 王婷婷, 等. 铁胁迫对大豆农艺性状及生理生化指标的影响[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2021, 39(6): 688-692.
BAO Y L, CHEN G, WANG T T, et al. Effects of iron stress on agronomic characters and physiological and biochemical indexes of Soybean[J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2021, 39(6): 688-692.
- [31] 鹿鑫, 赵敦厚, 关法春, 等. 复合菌剂添加对盐碱地大豆生长发育及产量的影响[J]. *大豆科学*, 2022, 41(5): 588-593.
LU X, ZHAO D H, GUAN F C, et al. Effects of compound bacterial agents on growth, development and yield of soybean in saline alkali soil[J]. *Soybean Science*, 2022, 41(5): 588-593.
- [32] 杨倩, 柴文娟, 张春林, 等. 一种微生物菌肥对甜高粱种子萌发、幼苗生长和抗逆能力的影响[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 201, 34(6): 102-109.
YANG Q, CHAI W J, ZHANG C L, et al. Effects of a microbial fertilizer on *Sorghum bicolor* L. seeds germination, seedling growth and stress tolerance [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 201, 34(6): 102-109.
- [33] 肖娴, 桂一峰, 朱艳, 等. 微生物菌肥对水稻土壤细菌群落结构与活性的影响[J]. *西南农业学报*, 2021, 34(10): 2174-2181.
XIAO X, GUI Y F, ZHU Y, et al. Effects of microbial inoculations on structure and activity of paddy soil bacterial community[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 34(10): 2174-2181.

协办单位

中国作物学会大豆专业委员会
东北农业大学大豆研究所
吉林省农业科学院大豆研究所
南京农业大学大豆研究所
辽宁省农业科学院作物研究所
河北省农林科学院粮油作物研究所