



复合菌剂添加对盐碱地大豆生长发育及产量的影响

鹿鑫^{1,2}, 赵敦厚³, 关法春², 时君友⁴, 崔彦如², 张大勇³, 宗宪春¹, 梁丽丽¹

(1. 牡丹江师范学院 生命科学与技术学院, 黑龙江 牡丹江 157012; 2. 吉林省农业科学院 农村能源与生态研究所, 吉林 长春 130033; 3. 东北农业大学 农学院, 黑龙江 哈尔滨 150036; 4. 北华大学 材料科学与工程学院, 吉林 吉林 132013)

摘要:为了明确复合菌剂在盐碱地大豆上的应用效果,以盆栽试验大豆品种吉育86为材料,研究复合菌剂接种对大豆表型性状、生理特性和产量的影响,为复合菌剂在盐碱地大豆上的应用提供理论基础。结果表明:复合菌剂的施用(BF处理)分别使出苗率和出苗势降低2.22%和6.67%,出现株高高于CK,而茎粗却低于CK的表现。BF处理在一节期、始荚期、鼓粒期的叶面积分别比CK高3.85%、5.78%和3.93%。而其叶绿素SPAD值在始荚期和鼓粒期与CK相比,先降低再升高。不同处理POD、SOD活性和MDA含量没有显著变化。BF处理的杂草的总密度、总盖度、总地上生物量分别比CK降低467.0株·m⁻²、11.94%和90.95g。BF处理的单株茎秆干重、单株有效荚数、单株粒数和百粒重分别比CK高1.97g、4.0、10.22和3.12g,处理间差异不显著($P>0.05$),但BF处理单株产量为10.71g,显著高于对照($P<0.05$)。因此,复合菌剂添加能够促进大豆植株的生长,并抑制杂草的生长,从而增加大豆产量。

关键词:微生物菌剂;大豆;盐碱;产量;杂草

Effects of Compound Bacterial Agents on Growth, Development and Yield of Soybean in Saline Alkali Soil

LU Xin^{1,2}, ZHAO Dun-hou³, GUAN Fa-chun², SHI Jun-you⁴, CUI Yan-ru², ZHANG Da-yong³, ZONG Xian-chun¹, LIANG Li-li¹

(1. College of Life Science and Technology, Mudanjiang Normal University, Mudanjiang 157012, China; 2. Institute of Rural Energy and Ecology, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China; 3. College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150036, China; 4. College of Material Science and Engineering, Beihua University, Jilin 132013, China)

Abstract: In order to clarify the application effect of compound bacterial agent on soybean in saline alkali land, taking the pot experiment soybean variety Jiyu 86 as the material, the effects of compound bacterial agent inoculation on soybean phenotypic characters, physiological characteristics and yield were studied to provide theoretical basis for the application of compound bacterial agent on soybean in saline alkali land. The results showed that the application of compound bacterial agent reduced the seedling emergence rate and seedling emergence potential by 2.22% and 6.67%, respectively. The plant height and stem diameter of BF treatment were higher than CK, while the stem diameter was lower than CK. The leaf area of BF was 3.85%, 5.78% and 3.93% higher than that of CK at node stage, pod beginning stage and seed filling stage, respectively. Compared with CK, chlorophyll SPAD value of BF decreased firstly and then increased at the beginning of pod stage and seed filling stage. There were no significant changes in pod, SOD activity and MDA content in different treatments. The total density, total coverage and total aboveground biomass of weeds in BF were 467.0 plant·m⁻², 11.94% and 90.95 g lower than those in CK, respectively. The stem dry weight per plant, effective pod number per plant, seed number per plant and 100-seed weight of BF were 1.97 g, 4.0, 10.22 and 3.12 g higher than CK respectively. There was no significant difference between treatments ($P>0.05$), but the yield per plant of BF treatment was 10.71 g, which was significantly higher than that of the control ($P<0.05$). Therefore, the addition of compound bacteria can promote the growth of soybean plants and inhibit the growth of weeds, so soybean yield was increased in the treatments.

Keywords: microbial agent; soybean; saline-alkali; yield; weeds

受我国大豆供应紧张的国际形势影响,积极挖掘盐碱地后备土地资源种植大豆,成为现阶段东北区大豆种植产业发展的重点方向之一。但受成土母质、气候等自然因素及人类活动因素影响,作为世界三大苏打盐碱土分布区的松嫩平原,其土壤理化、生物性状差,Na⁺、CO₃²⁻与HCO₃⁻离子含量高,质地粘重、透水性差^[1-2],苏打盐碱胁迫对大豆种子萌

发、植株生长发育以及根际营养吸收等造成不利影响,进而严重影响大豆的产量^[3]。传统种植方法多采用物理法、化学法等盐碱化土壤改良途径^[1,3],但采用微生物途径整体改善大豆生长状况,被认为是盐碱地种植大豆的经济有效途径之一^[4]。有研究表明添加微生物菌剂具有提高根际微生物多样性指数、改善土壤酶活性、增加磷素等营养供应的功

收稿日期:2022-02-15

基金项目:国家重点研发计划(2018YFD1000905)。

第一作者:鹿鑫(1993—),男,硕士研究生,主要从事农业生物学研究。E-mail:99225095@qq.com。

通讯作者:关法春(1976—),男,博士,副研究员,主要从事农业微生物资源利用研究。E-mail:gfc1940@163.com。

能^[4-5],能够提高大豆的抗盐碱能力。如多粘类芽孢杆菌(*Paenibacillus polymyxa*)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^[6-7],尤其在营养缺乏的贫瘠土地上,接种多粘芽孢杆菌、产碱假单胞菌(*Pseudomonas pseudoalcaligenes*)等复合菌剂对植物生长的促进作用更大^[8-9]。但以往关于复合菌剂的大量研究工作主要集中在探明其生理活性及防治植物病害方面,而缺少对盐碱胁迫下大豆产量影响的研究报道,为此,本研究拟通过分析土壤盐碱胁迫下多粘芽孢杆菌复合菌剂拌种对大豆种子萌发及田间植物生长状况的影响,阐明该措施对盐碱地大豆的增产效果,从而为明确多粘芽孢杆菌复合菌剂缓解大豆生长盐碱胁迫的应用效果提供理论依据,并为我国推广苏打盐碱地大豆种植提供成本低廉的技术途径。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验地点位于松嫩平原西部吉林省白城市的白沙滩灌区试验站(46°15'7"N,123°39'41"E)。供试大豆品种为“吉育 86”;所用菌群来自西藏那曲市那曲镇(31°26'12"N,92°1'12"E)高寒草甸植物群落根际土,在吉林省农业科学院农村能源与生态所实验室分离、筛选、扩繁得到稳定的细菌菌群后,接种在硅藻土自制成复合菌剂,其中多粘类芽孢杆菌 1.0×10^{10} cfu·g⁻¹。

于 2021 年 5 月初,在直径 20 cm、高度 40 cm 的 PVC 白色无底圆管内填充当地轻度盐碱化农田内的 0~30 cm 混合表土。参考前期试验维持土壤特异性菌群丰度所需的菌剂用量,设置复合菌剂处理(BF),在 1 kg 大豆种子中拌入复合菌剂 1 g,然后在每个 PVC 管内播种 5 粒种子,施入磷酸二铵 50 kg·hm⁻²、尿素 80 kg·hm⁻²作为底肥。以不拌入复合菌剂为对照(CK)。大豆出苗后于两片真叶展平时间苗,每个 PVC 管仅留长势一致的幼苗两株。处理和对照的其他管理条件均一致。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 微生物基因组测定 委托上海美吉生物医药科技有限公司测定复合菌剂微生物基因组 DNA,采用细菌通用引物“338F_806R, ITS1F_

ITS2R”进行 16S rRNA 检测。

1.2.2 出苗率和出苗势 自大豆拱土后记录出苗数量,直到大豆出苗期结束不再有新苗长出之止,观察并统计大豆出苗率和 7 d 大豆出苗势,每天观测 1 次。

1.2.3 株高和茎粗 使用精度 1 mm 直尺测量株高,精度 0.02 mm 游标卡尺测量茎粗,每 5 d 测定 1 次。

1.2.4 叶面积及叶绿素值 采用数字图像法^[10]测定大豆整株叶面积,并使用 SPAD-502 型手持式叶绿素测定仪,测定功能叶叶片的叶绿素值(SPAD 值)。

1.2.5 pH 和电导率 分别在播种前和鼓粒期取 0~25 cm 内土壤混合样风干至土水比 1:5,测定 pH 值和电导率,5 次重复。

1.2.6 抗氧化酶活性和 MDA 含量 采集大豆功能叶片,并迅速置于液氮中,然后放入 4 °C 冰箱中并送检,测定超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性和丙二醛(MDA)含量。

1.2.7 杂草 分别记录不同种类杂草的株数、高度,用以计算杂草的密度、盖度,并取杂草地上部分,105 °C 杀青 30 min,80 °C 持续烘干至恒重,测定地上生物量。

1.2.8 产量 收获时期对每株大豆考种,记录其单株茎秆干重、单株有效荚数、单株粒数、百粒重以及单株产量。

1.3 数据分析

使用软件 Excel 2003 和 SPSS 22.0 进行数据统计与分析。

2 结果与分析

2.1 复合菌剂的菌群优势菌种特征

由图 1 可知,复合菌剂菌群以多粘类芽孢杆菌(*Paenibacillus polymyxa*)为主,含有少量的环状芽孢杆菌(*Bacillus circulans*)和微量的短小芽孢杆菌(*Bacillus pumilus*)、鲁氏不动杆菌(*Acinetobacter lwoffii*)、约氏不动杆菌(*Acinetobacter johnsonii*),其中占据绝对优势的是多粘类芽孢杆菌,其相对丰度高达 86.32%,环状芽孢杆菌等其他细菌相对丰度较低。多粘类芽孢杆菌在菌剂中发挥主要作用。

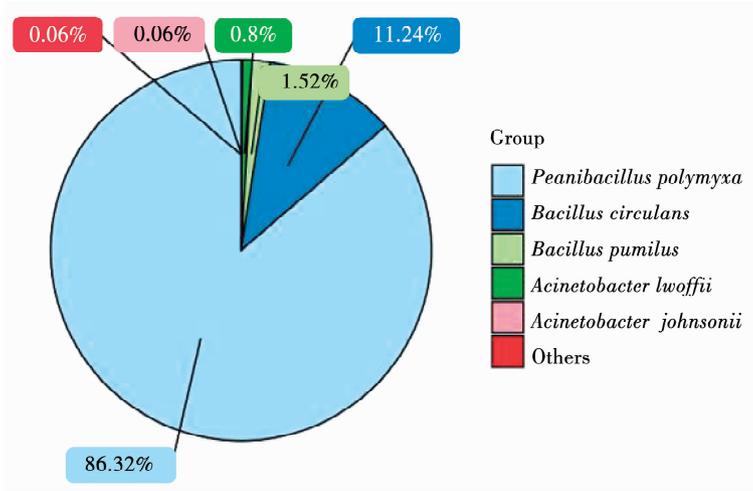


图1 菌剂优势菌种类与相对丰度

Fig. 1 Dominant species and relative abundance of microbial agents

2.2 不同处理下的土壤 pH 和电导率

由表 1 可知,不同处理大豆生产前后阶段均呈现土壤 pH 增加而 EC 减低的相同趋势;BF 处理在播种期和鼓粒期的 pH 分别为 7.61 和 8.34,仅分别比对照高 0.04 和低 0.06,两者之间差异显著

($P < 0.05$);BF 处理的土壤电导率在播种期和鼓粒期分别为 265.14 和 117.00 $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$,分别比对照高 3.85 和 8.67 $\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$,处理间差异不显著($P > 0.05$)。因此,复合菌剂的添加没有改变土壤的盐碱化程度。

表 1 不同处理下的土壤 pH 和电导率

Table 1 Soil pH and soil conductivity under different treatments

| 处理 Treatment | 播种期 Sowing period | | 鼓粒期 R6 | |
|--------------|-------------------|---|---------------|---|
| | pH | EC/($\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$) | pH | EC/($\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$) |
| BF | 7.61 ± 0.17 a | 265.14 ± 13.08 a | 8.34 ± 0.02 a | 117.00 ± 10.39 a |
| CK | 7.57 ± 0.25 a | 261.29 ± 22.48 a | 8.40 ± 0.04 a | 108.33 ± 4.73 a |

注:不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase indicate significant differences ($P < 0.05$). The same below.

2.3 不同处理下的种子出苗状况

发芽率和发芽势是反映种子萌发状况的主要指标。由表 2 可知,BF 处理下的出苗率和出苗势分

别为 86.67% 和 71.11%,分别较 CK 低 2.22% 和 6.67%,但处理间差异不显著($P > 0.05$)。因此菌剂添加对大豆萌发出苗存在一定程度的不利影响。

表 2 不同处理下的出苗率和出苗势

Table 2 Seedling emergence rate and emergence potential under different treatments

单位: %

| 处理 Treatment | 出苗率 Emergence rate | 出苗势 Emergence potential |
|--------------|--------------------|-------------------------|
| BF | 86.67 ± 14.14 a | 71.11 ± 20.28 a |
| CK | 88.89 ± 10.54 a | 77.78 ± 18.56 a |

2.4 不同处理下的植株生长状况

2.4.1 株高和茎粗 菌剂添加后的大豆植株生长状况如图 2 所示,6 月初至 7 月底,BF 处理的植株株高均高于 CK,成株株高为 47.86 cm,比对照高

4.59%;而茎粗则呈低于 CK 的趋势,成株茎粗为 7.14 mm,比对照低 2.19%。处理间各个时期上述指标差异不显著($P > 0.05$),说明菌剂添加对植株外观长势无显著影响。

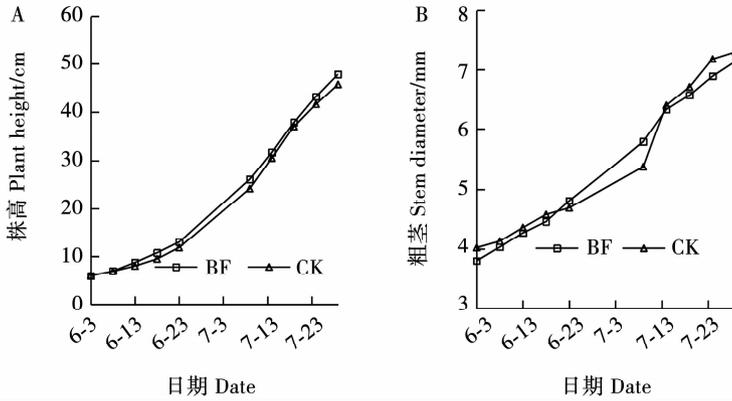


图2 不同处理下的大豆植株株高(A)与茎粗(B)表现

Fig. 2 Plant height (A) and stem diameter (B) of soybean under different treatments

2.4.2 功能叶叶面积 功能叶叶面积与植株干物质累积关系密切。大豆发育不同时期的大豆植株功能叶叶面积变化如表3所示,大豆一节期(VI)、始荚期(R3)、鼓粒期(R6)的功能叶叶面积为5.13、111.04和605.51 cm²,分别较CK高3.85%、5.78%和3.93%,但处理间差异不显著($P > 0.05$)。因此,菌剂添加可促进功能叶叶面积增加,有助于光合产物的合成。

表3 不同处理下的大豆植株功能叶叶面积

Table 3 Functional leaf area of soybean under different treatments

| 处理 Treatment | V1 | R3 | R6 |
|-----------------|---------------|------------------|-------------------|
| BF | 5.13 ± 0.59 a | 111.04 ± 11.92 a | 605.51 ± 130.99 a |
| CK | 4.94 ± 1.06 a | 104.97 ± 12.73 a | 582.60 ± 122.12 a |

2.5 不同处理下的植株生理状况

2.5.1 叶绿素含量 如表4所示,V1期BF处理与CK的SPAD值仅相差0.14,处理间差异不显著($P > 0.05$);R3期BF处理叶绿素含量较CK低6.01,处理间差异显著($P < 0.05$);R6期BF处理较CK高2.55,差异显著($P < 0.05$)。表明菌剂的添加会对植株叶片光合能力产生影响。

表4 不同处理下的大豆叶片叶绿素含量(SPAD值)

Table 4 Chlorophyll content (SPAD value) of soybean leaves under different treatments

| 处理 Treatment | V1 | R3 | R6 |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| BF | 46.69 ± 2.47 a | 27.83 ± 3.00 b | 39.44 ± 3.35 a |
| CK | 46.83 ± 3.00 a | 33.84 ± 3.71 a | 36.89 ± 3.80 b |

2.5.2 抗氧化酶活性 由表5可知,BF处理与CK之间没有明显差别,BF处理的POD、SOD活性分别较CK高1.00和0.79 U·g⁻¹,处理间差异较小;且BF处理MDA含量较CK高22.39 nmol·g⁻¹,处理间差异也并不显著($P > 0.05$)。因此可以认为,菌剂添加对植株叶片POD和SOD活性和MDA含量影响不大。

表5 不同处理下的植株叶片POD和SOD活性和MDA含量

Table 5 Pod and SOD activities and MDA content in leaves of plants under different treatments

| 处理 Treatment | POD活性 POD activity/ (U·g ⁻¹) | SOD活性 SOD activity/ (U·g ⁻¹) | MDA含量 MDA content/ (nmol·g ⁻¹) |
|-----------------|--|--|--|
| BF | 128.00 ± 33.78 a | 503.80 ± 36.55 a | 46.94 ± 27.07 a |
| CK | 127.00 ± 14.42 a | 503.01 ± 65.00 a | 24.55 ± 9.38 a |

2.6 不同处理下的杂草群落特征

由表6可知,BF处理杂草物种数量共4种,与CK相比缺少北美苋(*Amaranthus blitoides*)。BF处理群落植株总密度较CK低467.0株·m⁻²,处理间差异显著($P < 0.05$),其中蒺藜草的密度较CK低183.91株·m⁻²,处理间差异显著($P < 0.05$);BF处理植被总盖度较CK高11.94%,处理间差异显著($P < 0.05$),其中蒺藜草盖度较CK高4.81%,差异显著($P < 0.05$);BF的总地上生物量较CK低90.95g,处理间差异显著($P < 0.05$),其中蒺藜草的地上生物量较CK低69.26g,差异显著($P < 0.05$)。说明菌剂添加能够有效抑制杂草的滋生,减少杂草覆盖度,降低地表杂草的生物量。

表6 不同处理下的杂草群落指标
Table 6 Weed community indexes under different treatments

| 物种 Species | 密度 | | 盖度 | | 地上生物量 | |
|---------------------------------|------------------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------------|-----------------|
| | Density/(株·m ⁻²) | | Coverage/% | | Aboveground biomass/g | |
| | BF | CK | BF | CK | BF | CK |
| 蒺藜草 <i>Cenchrus echinatus</i> | 601.25 ± 109.62 b | 785.16 ± 149.30 a | 15.74 ± 2.87 b | 20.55 ± 3.91 a | 3.92 ± 1.58 b | 73.18 ± 19.11 a |
| 灰绿藜 <i>Chenopodium glaucum</i> | 7.61 ± 0.01 a | 120.25 ± 91.12 a | 0.83 ± 0.01 a | 3.15 ± 2.39 a | 0.33 ± 0.55 a | 8.10 ± 8.45 a |
| 蒺藜 <i>Polygonum aviculare</i> | 319.16 ± 193.38 a | 343.07 ± 101.63 a | 8.43 ± 4.94 a | 8.98 ± 2.66 a | 0.26 ± 0.14 a | 8.70 ± 3.07 a |
| 粘蓼 <i>Polygonum viscoferum</i> | 82.76 ± 42.70 a | 155.62 ± 117.44 a | 2.17 ± 1.12 a | 4.08 ± 3.07 a | 0.39 ± 0.11 a | 3.75 ± 3.42 a |
| 北美苋 <i>Amaranthus blitoides</i> | - | 71.62 ± 40.05 | - | 1.88 ± 1.05 | - | 3.90 ± 4.14 |
| 合计 Total | 968.92 ± 100.38 b | 1435.92 ± 185.23 a | 25.65 ± 7.70 b | 37.59 ± 4.85 a | 4.51 ± 1.69 b | 95.46 ± 9.90 a |

注: - 表示杂草在该区域未出现。

Note: - indicates that weeds do not appear in this area.

2.7 不同处理下的大豆产量影响指标

由表7可知,BF处理的单株茎秆干重、单株有效荚数、单株粒数和百粒重分别为10.69 g、25.44、55.44和19.51 g,分别比CK高1.97 g、4.0、10.22

和3.12 g,但处理间差异不显著($P < 0.05$);尤其是BF处理单株产量为10.71 g,较CK低3.40 g,处理间差异显著($P < 0.05$)。与产量相关的各项指标均有所提高,表明菌剂添加具有明显的增产效果。

表7 不同处理下的产量影响指标

Table 7 Yield influence indexes under different treatments

| 处理 Treatment | 单株茎秆干重 Stem weight per plant /g | 单株有效荚数 Effective pods number per plant | 单株粒数 Seeds number per plant | 百粒重 100-seed weight/g | 单株产量 Yield per plant/g |
|--------------|---------------------------------|--|-----------------------------|-----------------------|------------------------|
| BF | 10.69 ± 2.31 a | 5.44 ± 5.59 a | 55.44 ± 16.06 a | 19.51 ± 2.87 a | 10.14 ± 1.31 a |
| CK | 8.72 ± 2.07 a | 21.44 ± 7.28 a | 45.22 ± 13.47 a | 16.39 ± 2.20 a | 7.64 ± 1.58 b |

3 讨论

根际微生物除了可以活化被土壤晶格结构固定的营养元素外,还可以在根上寄生,产生植物激素来促进营养物质吸收^[11],或产生拮抗物质来减弱一种或多种植物病原物种的有害影响,通过这些机制,特定微生物会在适宜生境下促进作物的生长和发育^[12]。试验所用复合菌剂中占据绝对优势的是厚壁菌门类芽孢杆菌属(*Paenibacillus*)的多粘类芽孢杆菌(*Paenibacillus polymyxa*),目前已知多粘类芽孢杆菌能够通过生物固氮、解磷溶钾等作用促进植物对营养物质的吸收^[8],或者产生拮抗物质诱导植物抗性^[13],但未见菌剂施用会对大豆土壤盐碱程度产生影响的研究结果。本研究证实菌剂施用后播种期和鼓粒期处理间土壤pH和电导率几乎没有差异,说明菌剂施用并非从降低土壤盐碱化角度影响大豆的生长,而以多粘类芽孢杆菌为主的复合菌剂的施用在一定程度上影响了大豆的萌发与出苗,这可能与微生物次生代谢产物具有自毒作用,从而抑制种子萌发有关^[14]。复合菌剂对株高、茎粗和叶片叶绿素影响不一,且对不同处理下的叶片POD、SOD活性和MDA含量几乎没有影响,但却能明显增加

各个时期功能叶叶面积,从而有利于植株光合产物的形成,提高单株有效荚数、单株粒数、百粒重等相关指标,进而实现大豆产量显著增加。本研究揭示了复合菌剂对植物生长的有益促进作用,这与许多关于菌剂能够提高植物生长性能、营养水平和产量的研究结果基本一致^[15]。尤其是包括本试验在内的许多研究都表明,微生物处理后植株的干物质含量提高^[16],这与菌剂接种增强了光合作用的表达,提高了植株光合性能有关^[17]。

杂草能够与作物竞争水分和养分,从而影响大豆产量。施用复合菌剂后杂草的种类、密度和生物量均显著降低($P < 0.05$),说明复合菌剂能够有效控制杂草的生长,这在以往研究中也曾得到了证实^[18-19],多粘类芽孢杆菌等对杂草种子萌发和幼苗生长具有较高的抑制活性。菌剂的抑草作用减弱了杂草与大豆植株水肥、光照的竞争,这也是大豆得以增产的重要原因。

4 结论

复合菌剂施用降低了大豆出苗率和出苗势,对株高、茎粗和叶片叶绿素值影响不同。不同处理下的土壤盐碱化程度和POD活性、SOD活性、MDA含

量没有显著差异,但复合菌剂明显增加了大豆不同时期的叶面积,从而有利于植株光合产物的形成。由于菌剂施用减少了杂草滋生对大豆的影响,从而明显地增加了大豆收获期的植株生产和产量相关指标,使产量显著增加。因此,施用以多粘类芽孢杆菌为主的复合菌剂有利于提高盐碱地大豆的产量。

参考文献

- [1] 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): 23-27.)
- [2] 曲国辉,郭继勋. 松嫩平原不同演替阶段植物群落和土壤特性的关系[J]. 草业学报,2003,12(1): 18-22. (QU G H, GUO J X. The relationship between different plant communities and soil characteristics in Songnen grassland [J]. Acta Prataculturae Sinica,2003,12(1): 18-22.)
- [3] 孔祥清,韦建明,常国伟,等. 生物炭对盐碱土理化性质及大豆产量的影响[J]. 大豆科学,2018,37(4): 647-651. (KONG X Q, WEI J M, CHANG G W, et al. Effect of biochar on the physical and chemical properties of saline-alkali soil and soybean yield[J]. Soybean Science,2018,37(4): 647-651.)
- [4] 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.)
- [5] 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.)
- [6] 金美芳,林茂兹,陈春香,等. 多粘类芽孢杆菌 S960 对番茄生长与光合生理特性的影响[J]. 江西农业大学学报, 2018,40(5): 941-948. (JIN M F, LIN M Z, CHEN C X, et al. Effects of *Paenibacillus polymyxa* S960 on the growth and photosynthetic physiological characteristics of tomato [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis,2018,40(5): 941-948.)
- [7] SHU H H, MENG W S, JEN C 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,2021,16: 12-18.)
- [8] DILFUZA E. The effect of plant growth promoting bacteria on growth and nutrient uptake of maize in two different soils [J]. Applied Soil Ecology,2007,36(23): 184-189.)
- [9] 解娇,高国荣,赵敦厚,等. 添加生物菌剂对低温条件下大豆幼苗生长的促进作用[J]. 大豆科学,2021,40(4): 517-521. (XIE J, GAO G R, ZHAO D H, et al. Promoting effects of adding biological agents on soybean seedlings growth under low temperature[J]. Soybean Science,2021,40(4): 517-521.)
- [10] 兰小中,王超,关法春,等. 波棱瓜叶面积数学图像测定方法的研究[J]. 西南农业学报,2011,24(3): 1222-1224. (LAN X Z, WANG C, GUAN F C, et al. Digital image method for measurement of *Herpetospermum pedunculosum* leaf area [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences,2011,24(3): 1222-1224.)
- [11] GLICK B R. The enhancement of plant growth by free-living bacteria[J]. Canadian Journal of Microbiology,1995,41(2): 109-117.)
- [12] BENEDUZI A, AMBROSINI A, PASSAGLIA L M P. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Their potential as antagonists and biocontrol agents [J]. Genetics and Molecular Biology, 2012, 35(4): 1044-1051.)
- [13] 高玲玲,陈小龙,蒋涛,等. 具有拮抗作用的水稻内生固氮菌的分离与鉴定[J]. 华中农业大学学报,2012,31(5): 553-557. (GAO L L, CHEN X L, JIANG T, et al. Isolation and identification of endophytic nitrogen-fixing bacteria in rice with antipathogenic functions [J]. Journal of Huazhong Agricultural University,2012,31(5): 553-557.)
- [14] 黄玉茜,杨劲峰,梁春浩,等. 香草酸对花生种子萌发、幼苗生长及根际微生物区系的影响[J]. 中国农业科学,2018, 51(9): 1735-1745. (HUANG Y Q, YANG J F, LIANG C H, et al. Effects of vanillic acid on seed germination, seedling growth and rhizosphere microflora of peanut [J]. Scientia Agricultura Sinica,2018,51(9): 1735-1745.)
- [15] MORAIS M C, MUCHA Â, FERREIRA H, et al. Comparative study of plant growth-promoting bacteria on the physiology, growth and fruit quality of strawberry[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,2019,99(12): 5341-5349.)
- [16] BASHAN Y, DE-BASHAN L E, PRABHU S R, et al. Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: Formulations and practical perspectives (1998 - 2013) [J]. Plant and Soil, 2014,378(1-2): 1-33.)
- [17] CHEN L, LIU Y, WU G, et al. Induced maize salt tolerance by rhizosphere inoculation of *Bacillus amyloliquefaciens* SQR9 [J]. Physiologia Plantarum,2016,158(1): 34-44.)
- [18] LI W, SHEN S, GUO Q Y. Identification and biological activity of three strains isolated from distiller's grains of highland barley wine [J]. Chinese Journal of Biological Control, 2016, 32 (4): 544-552.)
- [19] 李明智,李永泉,徐凌,等. 细菌除草剂黄单胞菌反枝菟致病菌的筛选[J]. 微生物学报,2004(2): 226-229. (LI M Z, LI Y Q, XU L, et al. Screening of bacterial herbicide strain *Xanthomonas campestris* pv. *retroflexus* from rhizosphere[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2004(2): 226-229.)