



解磷菌 DQ-N 对大豆种子萌发及苗期生长的影响

林志伟,肖翠红,白鑫雨,孙冬梅

(黑龙江八一农垦大学 农学院,黑龙江 大庆 163319)

摘要:为研究解磷菌株 DQ-N 在大豆栽培上的应用潜力,以不同浓度 DQ-N 菌株发酵液浸种处理后,测定大豆萌发率、胚芽长及胚根长,并在田间小区试验中施用菌液处理,比较 DQ-N 菌株发酵液处理后大豆苗期根系发育及根部 and 叶片的抗氧化酶活性的变化。结果表明:DQ-N 菌株发酵液与水体积比为 1:30 和 1:40 时对大豆种子萌发率及胚根生长无影响,但可促进胚轴的伸长,而发酵液与水体积比较低时对种子萌发不利;田间施用菌液处理的大豆苗期根系的干重、根长、根尖数及根表面积等均显著高于对照组,且对大豆植株根部和叶片的相关抗氧化酶活性影响存在差异,其中菌液处理大豆苗根部的 POD 活性较培养基与水对照处理分别增加 30% 和 35%,SOD 活性则分别增加了 25% 和 26%,但对叶部酶活性变化影响不显著。综上结果表明 DQ-N 菌株发酵液可以有效促进大豆根的抗逆能力。

关键词:解磷菌 DQ-N;大豆;种子萌发;苗期;抗氧化酶

Effects of DQ-N Strain on Seed Germination and Seedling Growth of Soybean

LIN Zhi-wei, XIAO Cui-hong, BAI Xin-yu, SUN Dong-mei

(College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: In order to study the application potential of phosphate-solubilizing strain DQ-N in soybean cultivation, the effects of different concentrations of DQ-N strain fermentation on seed germination were determined by seed soaking treatment, the changes of root growth and the activities of antioxidant enzymes in roots and leaves of soybean seedlings treated with DQ-N fermentation in field plot experiment were compared. The results showed that when the ratio of DQ-N fermentation to water was 1:30 and 1:40, the germination rate and radicle growth of soybean seeds were not affected, but the elongation of hypocotyl was promoted. The low ratio of fermentation to water was unfavorable to seed germination. The root dry weight, root length, root tip number and root surface area of soybean seedlings treated with DQ-N fermentation were significantly higher than those of control group, and the effects on the activities of antioxidant enzymes in roots and leaves of soybean were not the same. The activities of POD and SOD in roots were increased by 30%, 35% and 25%, 26% respectively compared with those in the medium and water control, but the changes of enzyme activities in leaves were not significant. The results indicated that DQ-N fermentation could effectively promote the stress resistance of soybean root.

Keywords: Phosphate solubilizing bacteria DQ-N strain; Soybean; Seed germination; Seedling stage; Antioxidant enzymes

微生物肥料的使用有助于应对农业生产中化肥施用量过大、利用率低、环境污染严重等诸多问题,是实现减肥增效的可利用手段之一。微生物菌剂种类繁多,且当前生产中应用的微生物菌剂大多是由多种微生物菌复合而成^[1-2],微生物肥料中的有效菌具有分解土壤有机质、产生植物激素类物质、提升土壤肥力、增强作物的抗性 & 促进作物增产的作用,还可以抑制作物对硝酸盐、重金属等无机污染物的吸收,保证农产品安全^[3-7];细菌、放线菌与真菌均具有解磷能力^[8-9],解磷细菌也是根际促生微生物中常见种类之一,其主要作用为分解固定态磷为可溶态磷,释放有效磷元素为作物吸收利用提供养分,利于营养物质累积,改善农作物品质、提升市场竞争力^[10-14]。不同学者对菌剂或菌肥应

用后的效果进行了相关研究,如刘泽平等^[15]在水稻根际分离到了两株解磷能力较强的芽孢杆菌 LZP02 (*Bacillus pumilus*) 和 LZP05 (*Bacillus huizhouensis*),证实可以产生生长素、赤霉素,及合成铁载体,同时还具有促进水稻生长的作用;唐岷宸等^[12]将解磷菌剂 X-P18 以 2.0×10^9 CFU·盆⁻¹ 添加到黑叶莪扇白菜中,发现具有明显的促生效果,鲜重可增加 65.5%,叶片全磷含量增加 46.9%;石灯文等^[16]研究表明,微生物菌剂对水稻的生长也具有积极作用,微生物菌剂可延长土壤酶的活性时间,减少土壤表层的破坏,从而促进水稻的生长;李凤霞等^[17]研究表明,微生物菌剂可代替氮肥,且能促进花椰菜生长及地上部、地下部干物质的积累,提高作物对土壤中营养元素的吸收利用;雷先德等^[18]研究表明,微生物菌

收稿日期:2020-11-04

基金项目:黑龙江农垦总局科技攻关项目(HKKY190403);黑龙江省应用技术与开发计划(G19B04)。

第一作者:林志伟(1970—),男,硕士,副教授,主要从事植物保护研究。E-mail:lwzsdm@sohu.com。

通讯作者:孙冬梅(1970—),女,博士,教授,主要从事农业微生物教学与研究。E-mail:sdmlzw@163.com。

剂对菠菜的生长促进有积极作用。本研究对实验室保存的解磷菌在大豆上的应用进行了探讨。

大豆在中国已有五千年的栽培历史,黑龙江是我国有机大豆主产区,是国家重要的优质大豆生产和供给基地^[19]。实施大豆振兴计划以来,提单产、优品质的特色要求,对大豆生产中的肥料施用技术也提出新要求,而微生物肥料技术的发展为大豆生产提供了新肥源^[20]。胡倡等^[21]研究表明,解磷菌单独或复合根瘤菌应用对大豆地上生物量、百粒重、产量等有不同程度促进作用。覃建忠等^[22]在大豆田施用含地衣芽孢杆菌的磷肥,增产效果明显;南明慧等^[23]证实了大豆上施用不同生物肥的效果,同时相关解磷菌应用的机制研究也在开展中^[24],但有关其应用后对大豆种子萌发及苗相关抗氧化酶如 SOD(超氧化物歧化酶)、POD(过氧化物酶)和 CAT(过氧化氢酶)等影响鲜见报道。本试验针对解磷菌株 DQ-N 发酵液在大豆种子萌发和苗期生长及相关酶方面的影响进行了研究,为该菌株的进一步开发利用奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试菌种 解磷菌株 DQ-N 由黑龙江八一农垦大学生命学院实验室保存。

1.1.2 供试大豆 绥农 28,由黑龙江八一农垦大学农学院提供。

1.1.3 供试培养基 牛肉膏蛋白胨培养基:牛肉膏 5 g,蛋白胨 10 g,NaCl 5 g,H₂O 1 000 mL。

YM 培养基:胰蛋白胨 5 g,麦芽浸粉 3 g,葡萄糖 10 g,酵母浸粉 3 g,琼脂 20 g,H₂O 1 000 mL,pH6.0。

1.2 试验设计

1.2.1 解磷菌发酵液对大豆种子萌发的影响 将 DQ-N 菌株发酵液与无菌水分别按 1:60、1:50、1:40、1:30、1:20、1:10 和 1:0 配制成 7 个浓度,为避免培养基对种子萌发的影响,同时将牛肉膏蛋白胨液体培养基也按照上述比例配制成 7 个浓度,以无菌水为空白对照,一共设置 15 个处理。每处理精选 100 粒种子,经酒精表面消毒后分别用各处理液浸种 8 h,整齐摆放于铺有无菌双层滤纸的发芽盒中,滤纸分别用上述不同处理液湿润,并分别覆盖相应不同处理液湿润的无菌纱布,盖上发芽盒盖,28 ℃ 培养箱中放置,从第 2 天开始,

每天同一时间记录各个发芽盒中萌发的种子数,为避免培养皿中种子干燥,同时为双层滤纸上补充 30 mL 相应的处理液。7 d 后测量发芽种子的胚根及胚轴长度及重量,统计种子萌发率。每处理重复 3 次。

1.2.2 小区种植应用试验 共设 3 个处理,分别为垄施菌株发酵液(浓度为 2.0×10^9 GFU·mL⁻¹)、培养基液,并以清水为对照,小区排列采用随机区组设计,各处理用液量为 30 kg·hm⁻²,3 次重复。试验地前茬为玉米,常规使用底肥。每小区为 5 垄,垄距 0.65 m,垄长 7.0 m,小区面积为 22.75 m²。人工摆籽,垄上双行,行距、株距 5 cm。播种后,人工除草。在大豆长至 3 片复叶时,小区内五点取样,每点取 5 株。测定各处理大豆植株根长、根数、根体积、地下与地上部分干重等生长指标,对比植株根及叶片抗氧化相关酶活性。

1.3 方法

1.3.1 菌种活化与菌剂制备 将实验室保存的解磷菌 DQ-N 菌株接种于 YM 平板中培养 24 h,在平板中加入 10 mL 无菌水,制成菌悬液,按体积比 10:1 接入到牛肉膏蛋白胨液体培养基中,28 ℃,140 r·min⁻¹,恒温振荡培养 24 h,获得实验用发酵液。需要用菌前 7 d 内,依据上述方法在实验室内制备发酵液备用。

1.3.2 种子萌发率计算 大豆萌发率(%)=(萌发种子数/供试种子总数)×100。

1.3.3 粗酶提取液制备 称取 0.5 g 大豆苗叶片或根,置于研钵中,在冰浴条件下将其研磨成粉末后,加入 5 mL pH7.8 的磷酸缓冲液,继续研磨,将研钵内样品全部倒入 10 mL 离心管中,4 ℃、4 000 r·min⁻¹ 离心 20 min 后保留上清液即为粗酶液,置于 4 ℃ 备用^[12]。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 大豆生长指标 采用 MicroTEK ScanMaker i800 plus 根部扫描测定豆苗的根冠比、根长、根表面积、根体积、根平均直径和根尖数等指标,利用烘干法测定地下与地上部分干重。

1.4.2 抗氧化相关酶活性 利用 U-2900 紫外可见分光光度计测定植株根及叶片过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)及多酚氧化酶(POD)活性。

1.5 数据分析

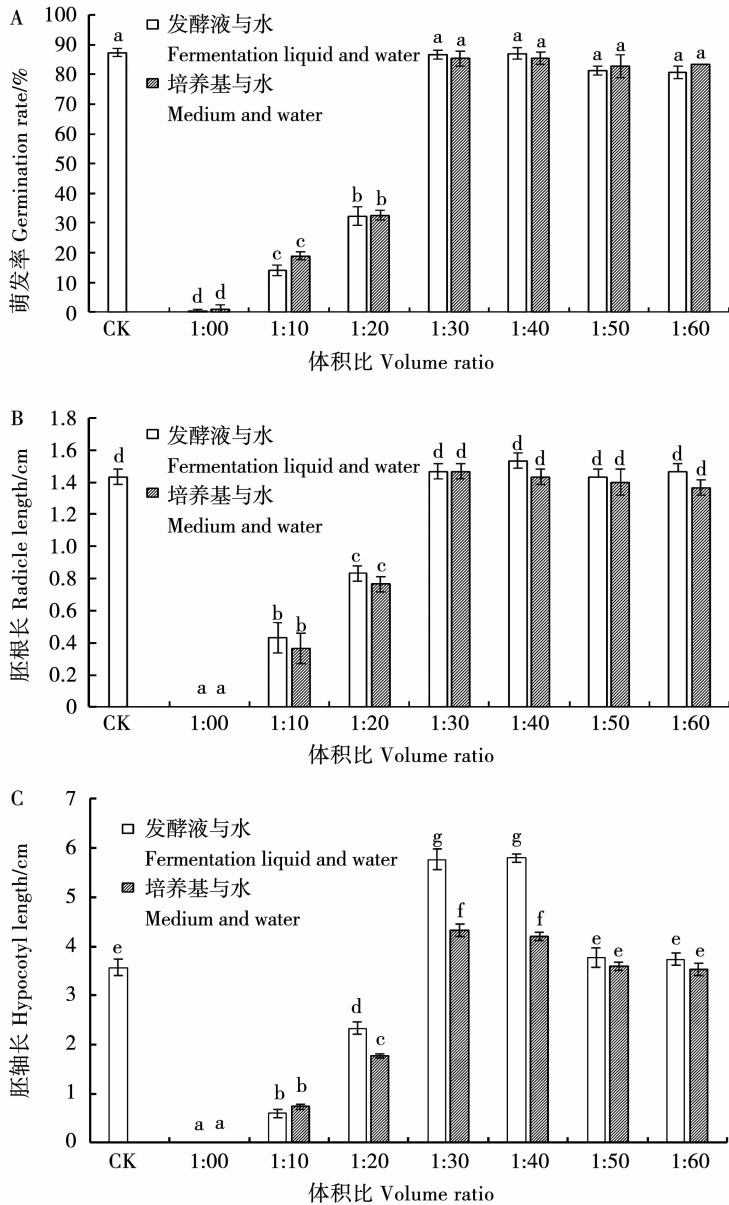
使用 Excel 2019 作图,用 SPSS 19.0 对数据进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 DQ-N 菌株发酵液对大豆种子萌发的影响

如图 1 所示,与清水对照相比,DQ-N 菌株发酵液和培养基与水体积比为 1:0、1:10 和 1:20 时,会显著降低大豆种子萌发率,且不利于胚芽与胚根的

生长;当培养基浓度低于 1:30 处理时,对种子萌发率及胚根长度均无影响,但 DQ-N 菌株发酵液浓度为 1:30 和 1:40 时可明显促进胚轴的伸长,且显著高于清水对照和各培养基处理。说明菌株发酵液适当稀释可促进胚轴生长,有助于种子萌发出土。



不同小写字母代表差异显著($P < 0.05$)。下同。
Different lowercase indicate significate difference($P < 0.05$). The same below.

图 1 DQ-N 菌株发酵液对大豆种子萌发率 (A) 胚根长度 (B) 和胚轴长度 (C) 的影响
Fig.1 The effects of DQ-N strain fermentation liquid on seed germination rate (A),radicle length (B) and hypocotyl length (C) of soybean

2.2 DQ-N 菌株发酵液对大豆苗期生长的影响

菌株发酵液处理后,大豆苗期的地下干重、地上干重及根冠比均显著高于培养基和清水处理,较清水对照分别提高了 60.8%、15.5% 和 53.9% (表 1)。

发酵液处理的根总长、根表面积、体积与根尖数均明显高于培养基与水处理,但根的平均直径变化不大 (表 1)。试验结果进一步证明该菌株发酵液对大豆苗期根的生长具有促进作用。

表 1 DQ-N 菌株发酵液对大豆苗期生长的影响

Table 1 The effects of DQ-N strain on soybean growth at seedling stage

| 指标 Index | 培养基 Medium | DQ-N 菌株发酵液 DQ-N strain fermentation liquid | CK |
|---|---------------------|---|----------------------|
| 地下部分干重 Dry weight of underground/g | 0.2047 ± 0.013 b | 0.2711 ± 0.016 c | 0.1686 ± 0.019 a |
| 地上部分干重 Dry weight of upground/g | 0.3676 ± 0.011 a | 0.4020 ± 0.021 b | 0.3482 ± 0.015 a |
| 根冠比 Root/shoot ratio | 0.5565 ± 0.020 b | 0.6744 ± 0.012 c | 0.4832 ± 0.033 a |
| 根长度 Root length/cm | 270.1430 ± 9.0689 a | 504.1506 ± 16.2751 b | 273.0218 ± 14.5467 a |
| 根表面积 Root surface area/cm ² | 59.4286 ± 4.2826 a | 99.7890 ± 1.6312 b | 56.6687 ± 2.5714 a |
| 根体积 Root volume/cm ³ | 2.7821 ± 0.0798 b | 3.8665 ± 0.1800 c | 2.4948 ± 0.0998 a |
| 根平均直径 Average root diameter/mm | 0.7083 ± 0.0217 a | 0.7456 ± 0.0322 a | 0.6550 ± 0.0535 a |
| 根尖数 Root tips number | 359 ± 21 a | 546 ± 30 b | 352 ± 20 a |

2.3 DQ-N 菌株发酵液处理对大豆苗期抗氧化酶活性的影响

SOD、POD 与 CAT 均为植物中存在的抗氧化酶,不同处理对抗氧化酶活性影响不完全一致。DQ-N 菌株发酵液处理的植株根部 POD 活性较培养基与水处理分别提高 35% 和 30% ,差异显著,而叶部 POD 活性无显著差异。说明在土壤中施用发酵液处理后,可促进根部 POD 活性的提高,但不会诱

导植株叶片 POD 活性的变化。各处理的植株叶片及根部的 CAT 活性均差异不显著,发酵液的施用对 CAT 活性无影响。根部 SOD 表现为发酵液处理较对照和培养基分别提高了 26% 和 25% ,且差异显著;但植株叶片的 SOD 活性变化差异不显著,说明土壤中施用发酵液对根部 SOD 活性具有促进作用,但对叶部 SOD 影响不明显(表 2)。

表 2 DQ-N 菌株对大豆苗期植株 3 种酶活性的影响

Table 2 The effects of DQ-N strain on soybean SOD,POD and CAT activity at seedling stage

单位:kat

| 处理 Treatment | 根部酶活 Root enzyme activity | | | 叶片酶活 Leaf enzyme activity | | |
|--|------------------------------|---------------------|------------------|------------------------------|------------------|--------------------|
| | POD | CAT | SOD | POD | CAT | SOD |
| 培养基 Medium | 52014.07 ± 2026.57 a | 10739.48 ± 160.20 a | 659.97 ± 57.51 a | 48951.46 ± 1626.33 a | 288.22 ± 20.34 a | 7873.91 ± 150.86 a |
| DQ-N 菌株发酵液 DQ-N strain fermentation liquid | 70324.23 ± 2011.07 b | 10833.83 ± 268.55 a | 834.00 ± 48.68 b | 52727.21 ± 1264.42 a | 516.77 ± 51.51 a | 7664.20 ± 167.20 a |
| | 57354.64 ± 1714.51 a | 10801.33 ± 262.89 a | 657.30 ± 42.18 a | 52338.80 ± 1628.16 a | 265.72 ± 52.68 a | 7541.17 ± 224.21 a |
| CK | | | | | | |

3 讨论

解磷菌种类较多,主要集中在细菌的芽孢杆菌属 (*Bacillus* spp.)、假单胞菌属 (*Pseudomonas* spp.)、伯克氏菌属 (*Burkholderia* spp.)、泛菌属 (*Pantoea* spp.)等^[13-14],鉴于芽孢杆菌属的抗逆能力较强,故应用也较为广泛,因而本试验以实验室保存的解磷菌株进行了相关研究。

前人对不同接种方式下解磷菌菌株在作物上的影响进行了研究,如 Hameeda 等^[25]利用泥炭作为灭菌载体,接入不同解磷菌并共同孵育一段时间后,作为盆栽实验的接种剂在玉米栽培中应用,施用后玉米干重及产量均得到提高;郭英等^[26]将大豆先催芽,然后待真叶长出后在大豆根系附近将解磷菌与根瘤菌接入,探讨二者在大豆生长中的作用,也同样证实了解磷菌的促生作用,并证实了解磷菌与根瘤菌共同作用的效果;刘微等^[27]利用不同解磷菌对大豆进行浸种,探讨了大豆展叶、开花等生育指标及大豆植株干重、根瘤形成情况等,证实了解磷菌株的促生效果;上述试验结果均证实解磷菌剂的促生作用,但大部分的研究均以苗期生长为主,在本研究中采用解磷菌株发酵液,进行了浸种处理,这与其他学者的研究一致。不同之处在于本研究利用发酵液与水的不同比例,以培养基与水的不同比例作为对照,探讨了其对大豆种子萌发的影响,证实了应用菌株发酵液对大豆种子发芽中胚轴伸长的促进作用;在促生长的研究中,本研究证明了发酵液对苗期干重的增加、根数增多等的促进作用,这与其他学者研究一致。但多数学者在研究促进作用中均未针对抗逆酶进行探讨,本研究发现应用菌株发酵液后大豆苗期根部部分抗氧化酶活性的提高。在土壤中施用 DQ-N 菌株发酵液主要影响到根部 POD 和 SOD 的活性,但对 CAT 活性影响不明显,对苗期叶片酶活性没有影响。

4 结论

解磷菌 DQ-N 菌株发酵液与水体积比为 1:30、1:40 时可有效促进大豆种子萌发中胚轴的伸长,但原液及比例低于 1:20 时对种子萌发具有抑制作用;栽培中应用该菌株发酵液浓度为 2.0×10^9 CFU·mL⁻¹,用量为 30 kg·hm⁻²时,可提高大豆苗期根的生长状况及根部 POD 与 CAT 的活性。解磷菌在大豆发芽及苗期的应用效果,为适应我国

农业种植和发展提出的减肥、减药措施提供了可行的微生物菌剂,同时也为解磷菌的应用提供理论与数据支持。

参考文献

[1] 许景钢,孙涛,李嵩.我国微生物肥料的研发及其在农业生产中的应用[J].作物杂志,2016(1):1-6. (Xu J G, Sun T, Li S. Application of microbial fertilizers in agricultural production of China[J]. Crops, 2016(1):1-6.)

[2] Lobo C B, Juárez Tomás M S, Viruel E, et al. Development of low-cost formulations of plant growth-promoting bacteria to be used as inoculations in beneficial agriculture technologies [J]. Microbiological Research, 2019, 219:12-25.

[3] Gill J S, Sale P, Peries R R, et al. Changes in soil physical properties and crop root growth in dense sodic subsoil following incorporation of organic amendments[J]. Field Crops Research, 2009, 114(1):137-146.

[4] 李俊,姜昕,马鸣超,等.我国微生物肥料产业需求与技术创新[J].中国土壤与肥料,2019(2):1-5. (Li J, Jiang X, Ma M C. Development demand and technical innovation for bio-fertilizer industry in China[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019(2):1-5.)

[5] 李忠.复合微生物肥料的标准生产及应用探讨[J].中国标准化,2018(6):190-192. (Li Z. Discussion on standard production and application of compound microbial fertilizer [J]. China Standardization, 2018(6):190-192.)

[6] 冯健,于森,孙佳妮.解磷菌对设施土壤金属元素有效含量及黄瓜秧苗金属元素吸收量的影响[J].微生物学杂志,2020,40(3):81-85. (Feng J, Yu M, Sun J N. Effects of phosphate solubilizing bacteria (PSB) on effective content of metallic elements in soil and Cucumber absorption in protected soil [J]. Journal of Microbiology, 2020, 40(3):81-85.)

[7] 汪金舫,刘月娟,李本银.秸秆还田对砂姜黑土理化性与锰、锌、铜有效性的影响[J].中国生态农业学报,2006,14(3):49-51. (Wang J F, Liu Y J, Li B Y. Effects of returning crop straw into vertisol on the physical and chemical properties and availability of manganese, zine, copper [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(3):49-51.)

[8] 赵小蓉,林启美,孙焱鑫,等.小麦根际与非根际解磷细菌的分布[J].华北农学报,2001,16(1):111-115. (Zhao X R, Lin Q M, Sun Y X, et al. Phosphobacteria distribution in rhizosphere and non-rhizosphere soil of winter wheat [J]. Acta Agriculturae Boreali Sinica, 2001, 16(1):111-115.)

[9] Reddy M S, Kumar S, Babita K, et al. Biosolubilization of poorly soluble rock phosphates by *Aspergillus tubin-gensis* and *Aspergillus niger* [J]. Bioresource Technology, 2002, 84:187-189.

[10] Wu D C, Teng D, Xi D, et al. Rapid cloning, expression and purification of a novel high-activity alkaline phosphatase with detoxification of lipopolysaccharide [J]. Process Biochemistry, 2014, 49(3):402-408.

[11] 吴伟,张鹏飞,张桂萍,等.连翘根际高效解有机磷细菌的筛选鉴定及促生长特性研究[J].西南林业大学学报,2018,38(3):94-100. (Wu W,Zhang P F,Zhang G P,et al. Screening, identification and growth promoting characteristics of high efficient organic phosphate mineralizing bacterium from rhizosphere soils of forsythia suspensa[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2018,38(3):94-100.)

[12] 唐岷宸,李文静,宋天顺,等.一株高效解磷菌的筛选及其解磷效果验证[J].生物技术通报,2020,36(6):102-109. (Tang M C,Li W J, Song T S, et al. Screening of a highly efficient phosphate-solubilizing bacterium and validation of its phosphate-solubilizing effect [J]. Biotechnology Bulletin, 2020, 36 (6): 102-109.)

[13] 赵小蓉,林启美.微生物解磷的研究进展[J].土壤肥料,2001(3):7-11. (Zhao X R,Lin Q M. A review of phosphate dissolving [J]. Soils and Fertilizers,2001 (3):7-11.)

[14] 孟祥坤,于新,朱超,等.解磷微生物研究与应用进展[J].华北农学报,2018,33(S1):208-214. (Meng X K, Yu X, Zhu C, et al. Research and application of advance in phosphate solubilizing microorganisms [J]. Acta Agriculturae Boreli-Sinica, 2018, 33 (S1):208-214.)

[15] 刘泽平,王志刚,徐伟慧,等.水稻根际促生菌的筛选鉴定及促生能力分析[J].农业资源与环境学报,2018,35(2):119-125. (Liu Z P,Wang Z G,Xu W H, et al. Screen, identification and analysis on the growth-promoting ability for the rice growth-promoting rhizobacteria[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment,2018,35(2):119-125.)

[16] 石灯文.微生物菌剂对水稻生长的影响[J].生物化工,2018,4(5):80-82. (Shi D W. Effect of microbial agents on rice growth [J]. Biological Chemical Engineering,2018,4(5):80-82.)

[17] 李凤霞,赵莹.氮肥减量配施微生物菌剂对灌淤土花椰菜产量及土壤微生物的影响[J].水土保持研究,2017,24(2):94-100. (Li F X, Zhao Y. Effect of nitrogen fertilizer reduction with microbial inoculants on *Broccoli* production and the influence of the soil microbial characteristics[J]. Research of Soil and Water Conservation ,2017,24(2):94-100.)

[18] 雷先德,李金文,徐秀玲,等.微生物菌剂对菠菜生长特性及土壤微生物多样性的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(4):488-494. (Lei X D, Li J W, Xu X L, et al. Effect of microbial inoculants on spinach growth characteristics and soil microbial diversity[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2012, 20(4):488-494.)

[19] 朱梓菲,刘鑫磊,薛永国,等.黑龙江省大豆生产现状与发展建议[J].中国种业,2020(8):18-23. (Zhu Z F, Liu X L, Xue Y G, et al. Current situation and development suggestion of soybean production in Heilongjiang [J]. China Seed Industry, 2020 (8): 18-23.)

[20] 谢明杰,程爱华,曹文伟.我国微生物肥料的研究进展及发展趋势[J].微生物学杂志,2000,20(4):42-45. (Xie M J, Cheng A H, Cao W W. Advanced and development tendency of microbial fertilizer in China [J]. Journal of Microbiology, 2000, 20 (4): 42- 45.)

[21] 胡倡,李慧明,伍惠,等.解磷菌和根瘤菌复合接种对大豆和紫云英共生固氮的影响[J].华中农业大学学报,2020,39(4):38-45. (Hu C, Li H M, Wu H, et al. Effects of co-inoculations of phosphate-solubilizing bacteria and rhizobium on symbiotic nitrogen fixation of soybean and *Astragalus sinensis* [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(4):38-45.)

[22] 覃建忠,邓正春,周诗彪,等.大豆施用含地衣芽孢杆菌生物活化酶磷肥试验[J].作物研究,2017,31(7):722-723. (Qin J Z, Deng Z C, Zhou S B, et al. Experiment of applying bio-activated enzyme phosphate fertilizer containing *Bacillus licheniformis* to soybean [J]. Crop Research ,2017,31(7):722-723.)

[23] 南明慧,刘蕾,陈秀珍,等.不同生物肥在大豆上的施用效果[J].安徽农学通报,2007,13(18):300. (Nan M H, Liu L, Chen X Z, et al. Application effect of different bio-fertilizers on soybean [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2007, 13(18):300.)

[24] 安东,车永梅,赵方贵,等.解磷菌 3P29 促进辣椒生长的生理机制[J].北方园艺,2019(22):8-16. (An D, Che Y M, Zhao F G, et al. Physiological mechanism in the growth promoting effect of phosphate solubilizing bacteria 3P29 on Pepper [J]. Northern Horticulture, 2019(22):8-16.)

[25] Hameeda B, Harini G S, Rupela O P, et al. Growth promotion of maize by phosphate solubilizing bacteria isolated from compacts and macrofauna [J]. Microbiology Research, 2008(163):234-242.)

[26] 郭英,杨萍,张丹雨,等.野大豆多功能根际促生菌的筛选鉴定和促生效果研究[J].生物技术通报,2018,34(10):108-115. (Guo Y, Yang P, Zhang D Y, et al. Screening, identification and growth-promoting effect of multi-function Rhizosphere growth-promoting strain of wild soybean [J]. Biotechnology Bulletin, 2018, 34(10):108-115.)

[27] 刘微,朱小平,高书国,等.解磷微生物浸种对大豆生长发育及其根瘤形成的影响研究[J].中国生态农业学报,2004,12(3):153-155. (Liu W, Zhu X P, Gao S G, et al. Effects of soaked seeds with phosphate-dissolving microorganisms on the growth and development and its nodule of soybean plant [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2004, 12(3):153-155.)