

# 外源溶磷菌对不同土壤条件下大豆生长特性的影响

武志海<sup>1</sup>,刘晶晶<sup>2</sup>,杨美英<sup>2</sup>,卢冬雪<sup>2</sup>,岳胜天<sup>2</sup>,付 丽<sup>2</sup>

(1. 吉林农业大学 农学院,吉林 长春 130118; 2. 吉林农业大学 生命科学院,吉林 长春 130118)

**摘要:**为了明确溶磷菌在多种土壤中的应用效果,探讨了两株溶磷菌对黑土及盐碱土种植大豆的促生效应。采用盆栽试验分析了不同处理对大豆光合作用、渗透调节物质含量、生物量、氮磷吸收及产量的影响。结果表明:加菌处理可增加植株  $P_n$ ,显著降低 R6、R8 两时期叶片可溶性蛋白、可溶性糖及游离氨基酸含量,增加 R2 ~ R8 时期大豆株高和根干重,混合土壤中加菌处理也可提高植株地上部分氮、磷及植株全磷、全氮含量。添加 wj1 和混合菌处理的植株干重优于添加 wj3 的处理。黑土加混合菌可显著提高大豆 R2 期叶片 WUE,增加 V3、R2 和 R8 这 3 个时期大豆地上、地下部分氮、磷及植株全氮、全磷的含量。黑土加 wj1 与混合土壤加菌处理的大豆株荚数、总粒数、单株粒重及百粒重均高于未加菌处理。添加外源溶磷菌,对黑土及盐碱土栽培大豆均有不同程度的促生效果,能明显增强大豆在混合盐碱土壤中的适应性,增加植株生物量、氮磷吸收量和产量,且混合菌处理对大豆的促生效应优于 wj1 及 wj3 单一菌株处理。

**关键词:**溶磷菌;大豆;盐碱土;促生效应  
**中图分类号:**S565.1      **文献标识码:**A      **DOI:**10.11861/j.issn.1000-9841.2017.01.0078

## Effects of Exogenous Phosphate-Solubilizing Bacteria on Growth Characteristics of Soybean Under Different Soil Condition

WU Zhi-hai<sup>1</sup>, LIU Jing-jing<sup>2</sup>, YANG Mei-ying<sup>2</sup>, LU Dong-xue<sup>2</sup>, YUE Sheng-tian<sup>2</sup>, FU Li<sup>2</sup>

(1. College of Agronomy, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 2. College of Life Science, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

**Abstract:** In order to determine the application effect of phosphate-solubilizing bacteria (PSB) in different soils, the growth promoting effects of two PSB on soybean in the black soil and saline alkali soil were studied. The photosynthesis, osmotic adjustment substances, biomass, N and P uptake and yield of soybean were investigated with a pot experiment. By the addition of PSB,  $P_n$  was increased, the content of leaf soluble protein, soluble sugar and free amino acid were significantly reduced at R6 and R8, plant height and root dry weight of soybean were increased from R2 to R8. The plant dry weight treated with wj1 and mixed bacteria was better than that of wj3. The WUE of R2 was significantly improved, the content of total N and P of shoot, root and plant were increased at the stage of V3, R2 and R8 by adding the mixed PSB into black soil. The total of N and P of shoot and plant growing in the mixed soil were also increased after inoculation with PSB. The pod number, total grain number, grain weight per plant and 100-seed weight per plant of black soil with wj1 and mixed soil with PSB were higher than that without bacteria. As a result, adding exogenous PSB could improve photosynthesis and enhance adaptability of soybean in the mixed salt alkaline soil, thereby increase plant biomass, nitrogen and phosphorus uptake and crop yield. The growth promoting effect of mixed PSB was better than single strain of wj1 or wj3.

**Keywords:** Phosphate-solubilizing bacteria (PSB); Soybean; Salt-alkaline soil; Growth promoting effect

磷是植物生长发育不可缺少的营养元素之一,在植物生长发育和新陈代谢过程中起着重要的作用。在农业生产过程中,为增加作物产量,磷肥被过度施用,但施入土壤中的磷易与  $Fe^{3+}$ 、 $Ca^{2+}$  和  $Al^{3+}$  等结合而丧失其有效性,造成农业生产中磷肥利用率低,土壤磷素富集污染环境<sup>[1-2]</sup>。溶磷微生物可以通过分泌一定量的有机酸,与不溶或难溶性复合磷酸盐中的  $Fe^{3+}$ 、 $Ca^{2+}$  和  $Al^{3+}$  螯合而释放出磷酸根<sup>[3]</sup>。其次,溶磷微生物还可产生植物激素、ACC 脱氨酶、铁载体、低分子量有机酸等,从而增加土壤营养,调节土壤 pH<sup>[4-6]</sup>。

大豆是重要的油料作物与经济作物,由于受土地资源和生产条件的限制,大豆重茬问题越来越严重,给农民带来一定经济效益的同时,也造成病虫害加剧,大豆单产下降,农田生态系统稳定性遭到破坏<sup>[7]</sup>,直接制约着农业生产的可持续发展。据统计,我国盐碱地总面积约为 3 600 万  $hm^2$ ,具有利用潜力的盐碱荒地与盐碱障碍耕地约 1 236 万  $hm^2$ <sup>[8]</sup>。合理有效利用盐碱土,扩大作物种植面积,提高粮食产量已成为共识。因此,近年来微生物菌

收稿日期:2016-09-23  
基金项目:国家自然科学基金(31201687)。  
第一作者简介:武志海(1975-),男,副教授,硕导,主要从事作物栽培生理研究。E-mail:wuzhihai116@163.com。  
通讯作者:杨美英(1974-)女,博士,副教授,主要从事微生物生化与分子生物学研究。E-mail:jlaumeiying@163.com。

剂应用于盐碱土改良的研究不断增多。赵国杰等<sup>[9]</sup>研究表明添加无机溶磷微生物菌剂能促进盐碱土种植鸡毛菜的叶绿素含量、株高和叶片数增加,且有利于鸡毛菜地上部分干物质的积累。宋家清等<sup>[10]</sup>利用菌肥改善滨海盐碱地,明显增加了上层土壤铵态氮含量,菌肥浓度较高时对盐度降幅较大,施加无机解磷微生物菌剂,可提高碱化土壤质量,达到改良碱化土壤的目的。刘微等<sup>[11]</sup>研究表明,大豆浸种溶磷微生物会促进花期提前,显著提高根瘤数量,增加大豆植株对氮的吸收。与常规施肥大豆相比,施用溶磷菌后大豆平均株高、每株有效结荚数和百粒鲜豆重增加,最低结荚位降低<sup>[12]</sup>。

吉林省西部土地盐碱化数量和程度在明显加剧,根据 TM 卫星数据监测,受自然条件和人为因素的影响,近 15 年间增加了 25.67 万 km<sup>2</sup><sup>[13-14]</sup>。因此,探索盐碱地改良种植作物的有效措施具有重要的现实意义。本试验研究了盐碱土与黑土添加溶磷菌 wj1 和 wj3 对大豆生长的影响,为明确溶磷菌在各种土壤中的促生效应及其应用奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试菌株为假单胞菌属 *Pseudomonas* sp. wj1 (KM975675.1) 和肠杆菌属 *Enterobacter* sp. wj3 (KM975677),2012 年分离于大豆根际土壤中,两菌株溶磷特性详见文献<sup>[15]</sup>。

大豆材料由吉林省农业科学院大豆研究所提供,为吉林省高产高油大豆主推品种吉育 406,适于吉林省中熟区种植。

供试黑土采自吉林农业大学大豆试验田,前茬为玉米,采样深度为 0~20 cm。试验中所用的原状盐碱土(pH10.72,大豆不能生长)采自吉林省农安地区(E125°15',N44°45'),取土时充分晾干、过筛,混合。

### 1.2 试验设计

盆栽试验于 2014 和 2015 年 5 月在吉林农业大学试验站人工防雨棚中进行。本试验共计 6 个处理:黑土、黑土加 wj1、黑土加 wj3、黑土加混合菌[wj1:wj3(v/v)=1:1]、混合盐碱土[黑土:盐碱土(v/v)=3:1]和混合盐碱土加菌[wj1:wj3(v/v)=1:1]。

将种子浸泡在 0.1% 的次氯酸钠溶液中 5 min,灭菌蒸馏水冲洗 3 次,然后把种子放在装有湿润滤纸的培养皿里,30℃ 恒温培养 2 d,待胚根长至 1 cm 左右移入盆中。每盆装土 2.5 kg,移入 5 粒大豆种子,定苗 3 株。播种前施基肥,生长期不施肥。菌液制

备是将 wj1 和 wj3 菌株在 NBRIP 培养基中进行培养,用细菌计数法调节菌体浓度为  $1.0 \times 10^8$  CFU·mL<sup>-1</sup>,播种前,取 1 mL 菌液加入穴中。

### 1.3 测定项目与方法

分别在大豆生长的分枝期(V3)、盛花期(R2)、鼓粒期(R6)和成熟期(R8)测定各项生理指标。光合作用采用 Li-6400XT 光合作用仪进行测定,测定大豆第 4 节叶片的净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )和胞间 CO<sub>2</sub> 浓度( $C_i$ ),测定时间为上午 9:00~11:00。水分利用效率(WUE) =  $P_n/T_r$ ,表观叶肉导度(AMC) =  $P_n/C_i$ 。采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮样品,植株全氮含量采用凯氏定氮法(KN520),植株全磷含量测定采用钒钼黄比色法(760CRT 型双光束紫外可见分光光度计)。可溶性糖含量测定采用蒽酮法,可溶性蛋白含量的测定为考马斯亮兰法,游离氨基酸含量采用茚三酮比色法,均按照张志安等<sup>[16]</sup>的方法进行。

### 1.4 数据分析

采用 DPS 7.5 和 Excel 2013 进行数据处理分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对吉育 406 光合作用的影响

从图 1 可以看出,各处理的  $P_n$  均在 R2 期达到最大。黑土处理的各个时期  $P_n$  都高于盐碱土。接种溶磷菌的黑土与混合盐碱土处理,各时期的  $P_n$  均高于未接菌土壤。黑土加 wj1 的  $P_n$  值各时期都要高于其它处理。随着植株的生长, $G_s$  逐渐下降。 $C_i$  随生育期增加,表现出先增加后减小的趋势,除混合盐碱土外,其它各处理均在 R6 期达到最大值。黑土处理  $C_i$  和  $G_s$  均高于混合盐碱土。黑土加混合菌的  $C_i$  值在整个生育期高于黑土, $G_s$  值在 R2 期后明显低于黑土其它处理。盐碱土加混合菌处理的  $C_i$  和  $G_s$  明显高于混合盐碱土。黑土加 wj1 和 wj3 的  $C_i$  高于未接菌处理,且加 wj1 的增加量高于 wj3。V3 期  $T_r$  值最大,后逐渐降低,黑土处理的  $T_r$  值大于盐碱土,黑土加 wj1 处理的  $T_r$  在整个生育期内均高于黑土。V3~R2 期混合盐碱土加菌处理与未加菌处理的  $T_r$  值差异不明显,后 3 个时期混合盐碱土加菌处理的大豆叶片  $T_r$  值较未加菌处理有不同程度的增加。加 wj3 和混合菌处理各时期  $T_r$  值与黑土相比无明显变化规律。混合盐碱土处理水分利用率(WUE)在 V3~R6 期高于黑土处理。各时期黑土加菌处理 WUE 均高于黑土,且从 R2 期开始,黑土加混合菌处理的 WUE 明显高于所有其它处理。R2 和 R8 期混合盐碱土加菌 WUE 高于未接菌

处理。整个生育期,黑土处理表观叶肉导度(AMC)高于混合盐碱土,略低于各黑土加菌处理。混合盐

碱土加菌处理 AMC 在 R2 ~ R6 期均高于未接菌处理。

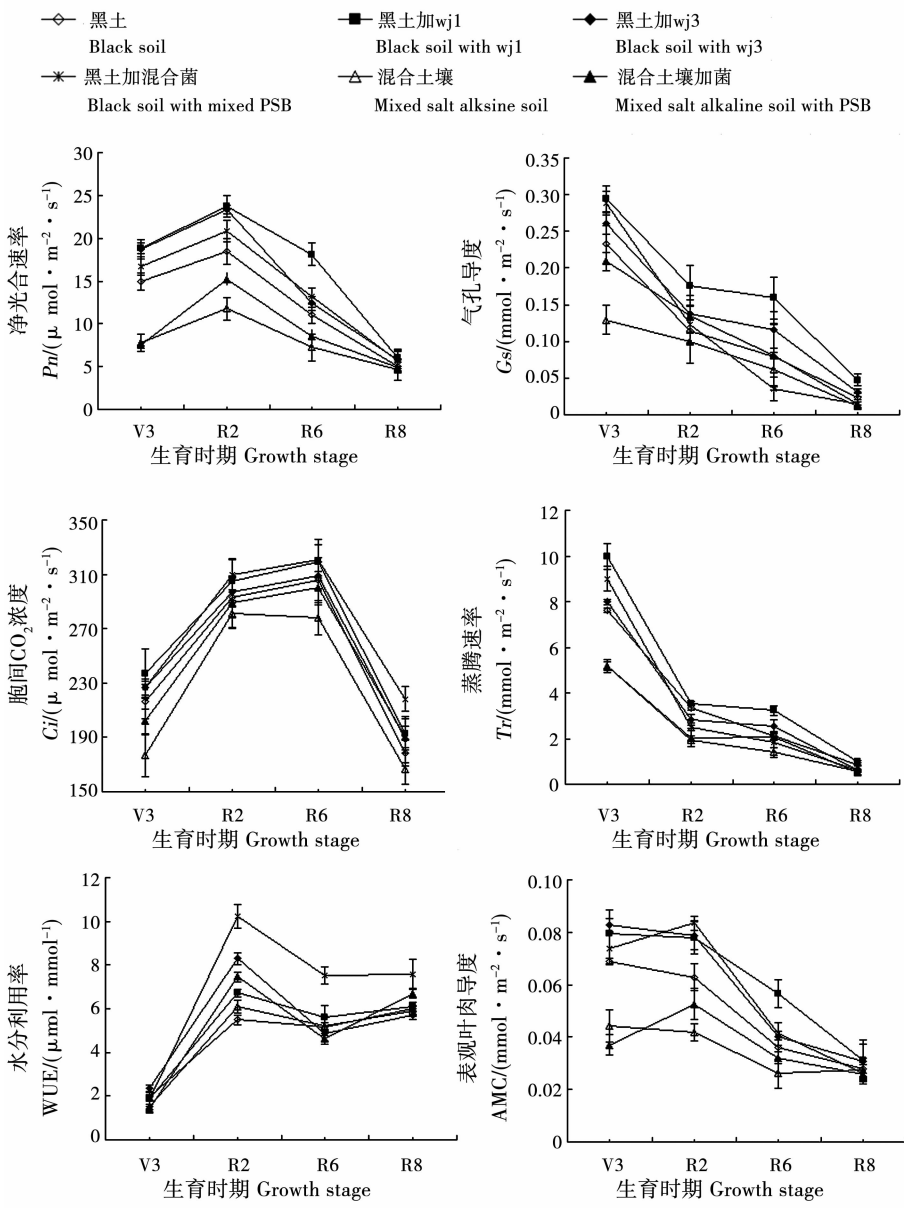


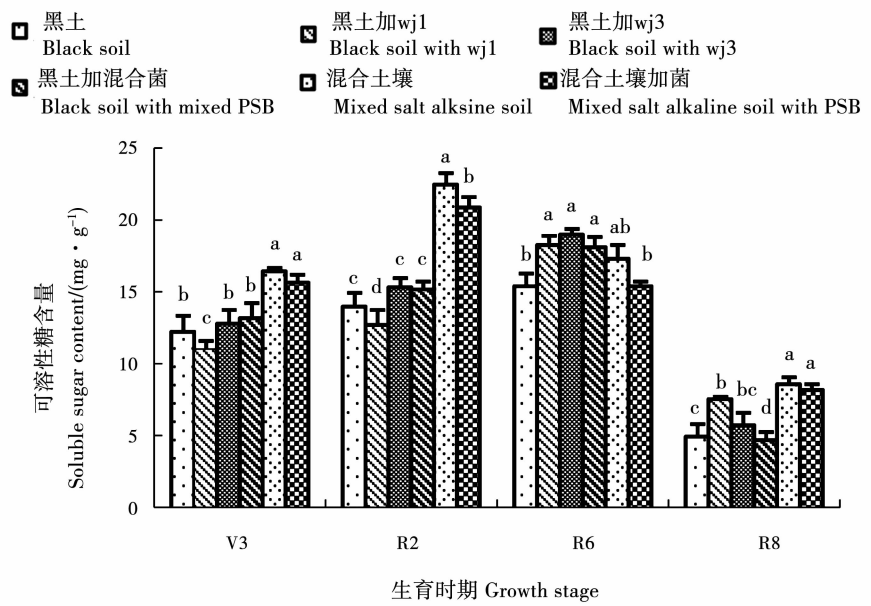
图 1 不同处理对吉育 406 光合作用的影响

Fig.1 Effect of different treatments on photosynthesis of Jiyu 406

2.2 不同处理对吉育 406 渗透调节物质的影响

如图 2 所示, V3 ~ R6 期各处理植株叶片可溶性糖含量均明显高于 R8 期。在整个生育期间黑土处理可溶性糖含量显著低于混合盐碱土。在 R2 混合盐碱土加菌与未接菌混合盐碱土处理相比, 明显降低了植株叶片可溶性糖含量, 其它时期变化不显著。黑土加 wj1 植株叶片中可溶性糖含量在 V3 和 R2 期明显低于黑土, 生长后期显著增加, 黑土加 wj3 在 V3、R2 和 R8 期叶片可溶性糖含量与黑土间差异不显著。V3 ~ R2 期, 黑土加 wj1 或 wj3 处理差异显著, 后期差异不显著, 而黑土加混合菌处理在 V3 ~ R6 期表现出与黑土加 wj3 相同的变化规律。

不同处理对大豆各生长时期叶片可溶性蛋白含量的影响如图 3 所示, V3 ~ R6 期黑土处理的可溶性蛋白含量显著低于混合盐碱土处理。与黑土相比, V3 ~ R2 期黑土加菌处理叶片可溶性蛋白含量无显著差异, R6 期黑土加菌各处理叶片可溶性蛋白含量显著降低, R8 期黑土加 wj3 和混合菌处理显著降低植株叶片可溶性蛋白含量。但 V3 ~ R6 期黑土加菌各处理间大豆叶片可溶性蛋白质含量无明显差异。混合盐碱土加菌与混合盐碱土相比在 R2 和 R6 期显著降低了植株叶片可溶性蛋白含量, 其它时期影响显著。



不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。  
Different lowercase indicate significant difference ( $P < 0.05$ ), the same below.

图 2 不同处理对吉育 406 可溶性糖含量的影响

Fig. 2 The content of soluble suger of different treatments of Jiyu 406

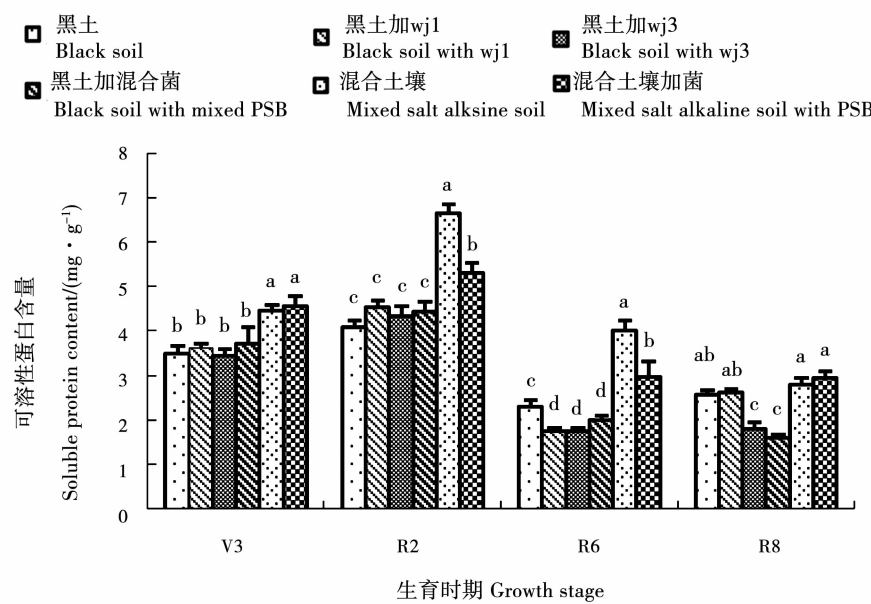


图 3 不同处理对吉育 406 可溶蛋白含量的影响

Fig. 3 The content of soluble protein of different treatments of Jiyu 406

六个处理大豆叶片游离氨基酸含量在 R2 期达到最高,且各处理游离氨基酸含量均显著高于黑土,其中混合盐碱土值最大。R8 期混合盐碱土处理游离氨基酸含量低于黑土,其它时期差异不显著(图 4)。V3 和 R6 期,黑土加 wj1 处理游离氨基酸含量显著低于黑土,而黑土加 wj3 和加混合菌处理与黑土间差异不显著。R8 期黑土加菌处理叶片游离氨基酸含量显著低于黑土。在整个生育期内,黑土加 wj3 与混合菌处理没有明显差异。V3 期,混合盐碱土加菌的游离氨基酸含量显著高于混合盐碱

土,而 R2 期混合盐碱土加菌的游离氨基酸含量显著低于混合盐碱土,其它时期差异不显著。

2.3 不同处理对吉育 406 生长的影响

如图 5 所示,各处理株高均在 R6 期达最大值。V3 与 R2 两时期黑土与盐碱土水稻株高差异不明显,R6 和 R8 期黑土处理显著高于混合盐碱土。在整个生育期内,黑土加 wj1 处理株高显著高于黑土。与黑土处理相比,黑土加 wj3 仅在 R2 期显著增加大豆株高,其他时期无明显变化。R2 ~ R8 时期混合盐碱土加菌处理株高显著高于未加菌处理。

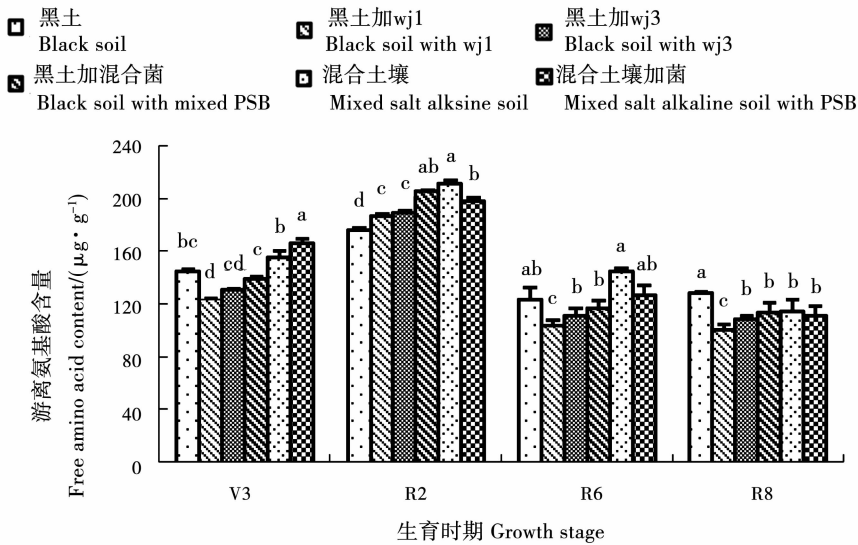


图 4 不同处理对吉育 406 游离氨基酸含量的影响

Fig. 4 The content of free amino acid of different treatments of JiYu 406

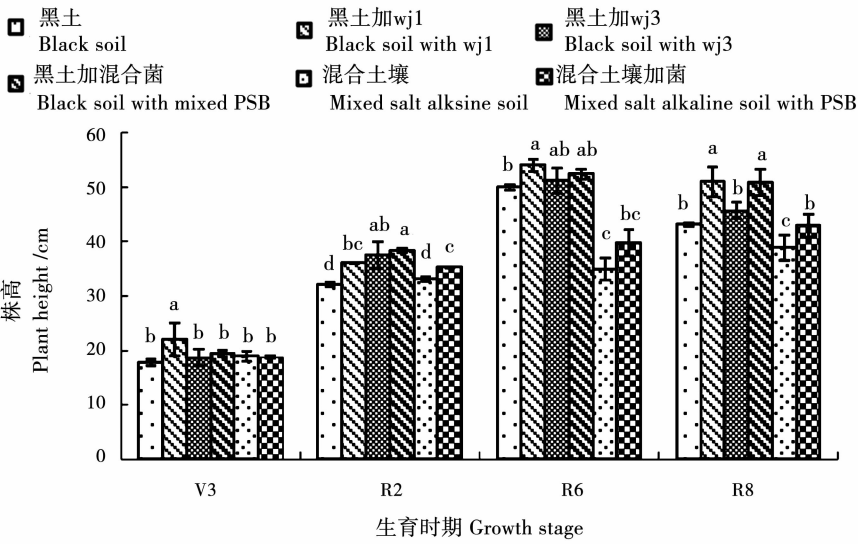


图 5 不同处理对吉育 406 株高的影响

Fig. 5 Effect of different treatment on plant height of JiYu 406

如图 6 所示, V3 ~ R6 期间各处理根干重均随生育期的推进而增加, R8 期略有下降。R2 ~ R8 期, 黑土与混合盐碱土加菌处理植株根干重都显著高于未接菌处理。

如图 7 所示, 在大豆生育期间, 随生育期的增加, 各处理植株干重在 R6 期达到最大值, 且黑土加 wj1 处理植株干重显著高于其他各处理。黑土处理在 V3 ~ R2 期显著低于混合盐碱土, R6 和 R8 期变化规律相反。整个生育期间黑土加 wj1 植株干重显著高于黑土。R2 和 R8 期, 黑土加混合菌处理也显著高于黑土。混合盐碱土加菌在 R2 ~ R8 期, 植株干重显著高于未加菌处理。

2.4 不同处理对吉育 406 各生育时期 N、P 吸收的影响

从表 1 可以看出, 植株氮磷含量的积累随着大豆生长发育逐渐增加, 在 R6 期植株全氮和全磷积累量达到最高, R8 期有所下降。在 V3 期, 黑土加菌处理与黑土相比地上部分全氮和植株全氮均有明显的增加, 黑土加 wj1 或 wj3 可明显增加植株地下部分全氮和植株全磷含量。黑土加菌处理可显著增加植株地上部分全磷、地下部分全磷及植株全磷含量。在 V3 期, 接菌与否对混合盐碱土两处理植株氮磷吸收无显著差异。

在 R2 期, 黑土加菌处理对植株全氮含量、植株

地上部分、地下部分全磷的含量和植株全磷含量均有显著增加。黑土加 wj3 和混合菌显著增加了地上部分全氮含量,黑土加 wj1 和混合菌显著增加了地

下部分全氮含量。与未接菌相比,混合盐碱土加菌显著增加植株地上部分、地下部分全氮含量,植株全氮和全磷含量。

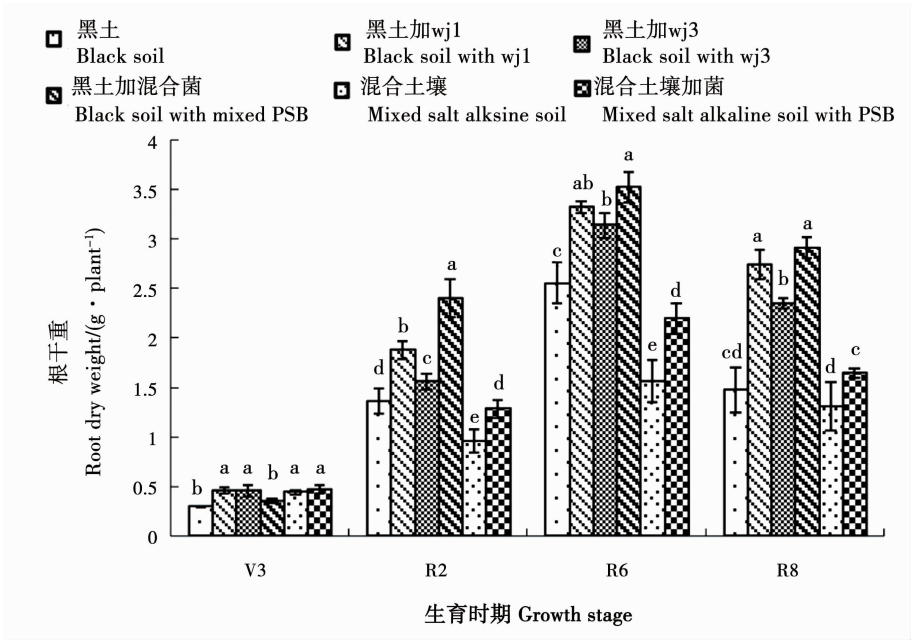


图 6 不同处理对吉育 406 根干重的影响  
Fig. 6 Effect of different treatment on root dry weight of Jiyu 406

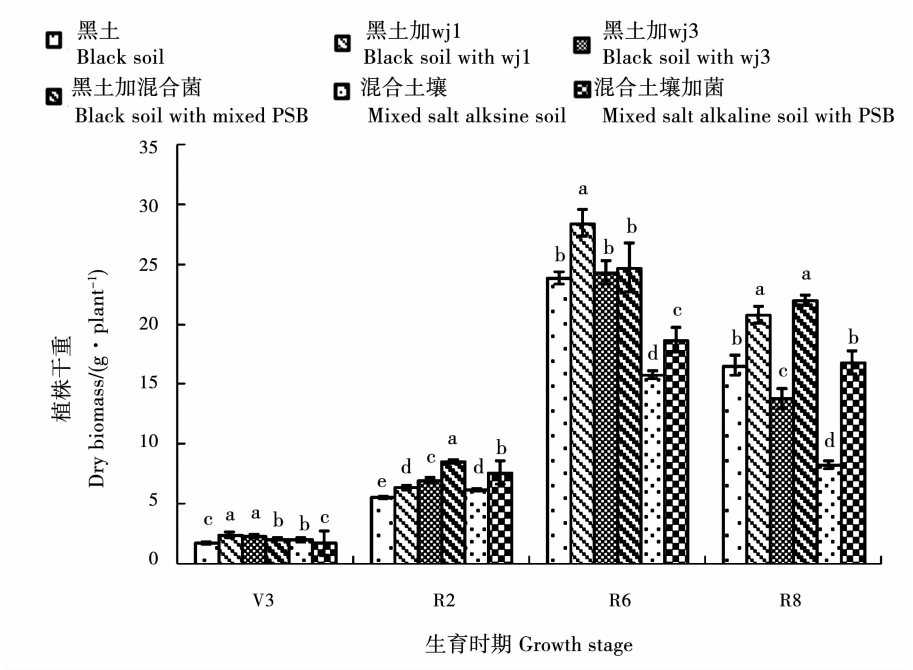


图 7 不同处理对吉育 406 植株干重的影响  
Fig. 7 Effect of different treatment on dry biomass of Jiyu 406

在 R6 期,黑土加 wj1 和混合菌显著增加了地下部分的全氮、地下部分全磷及植株全磷含量。黑土加 wj3 处理对植株对磷的吸收影响不大。混合盐碱土加菌较未接菌土壤植株的地上部分全氮、植株全氮以及地上部分、地下部分全磷、植株全磷含量均显著增高。

在 R8 期,黑土加混合菌处理的植株各部分磷、氮含量均高于黑土,但黑土加 wj1 或 wj3 处理仅植株地下部分全磷、全氮显著增加。混合土壤加菌处理显著增加了植株地上部分全磷、全氮和植株全磷、全氮。

表 1 不同处理对吉育 406 不同时期 N、P 吸收的影响

Table 1 Effect of different treatments on absorption of nitrogen and phosphorus of Jiyu 406 (mg·plant<sup>-1</sup>)

生育时期 Stages	处理 Treatment	地上部分全氮 Total N of shoot	地下部分全氮 Total N of root	植株全氮 Total N of plant	地上部分全磷 Total P of Shoot	地下部分全磷 Total P of root	植株全磷 Total P of plant
V3	CK	2.04 ± 0.07 c	0.20 ± 0.03 c	2.23 ± 0.04 b	0.46 ± 0.03 bc	0.09 ± 0.01 d	0.54 ± 0.03 bc
	黑土加 wj1 Black soil with wj1	3.26 ± 0.74 a	0.51 ± 0.08 a	3.77 ± 0.67 a	0.65 ± 0.09 a	0.13 ± 0.01 ab	0.78 ± 0.08 a
	黑土加 wj3 Black soil with wj3	2.97 ± 0.40 ab	0.44 ± 0.10 ab	3.41 ± 0.49 a	0.60 ± 0.03 ab	0.14 ± 0.02 a	0.74 ± 0.04 a
	黑土加混合菌 Black soil with mixed PSB	3.48 ± 0.14 a	0.18 ± 0.04 c	3.66 ± 0.16 a	0.55 ± 0.01 ab	0.11 ± 0.01 c	0.67 ± 0.01 ab
	混合盐碱土 Mixed salt alkaline soil	2.33 ± 0.32 bc	0.37 ± 0.07 b	2.69 ± 0.38 b	0.30 ± 0.20 cd	0.12 ± 0.01 bc	0.43 ± 0.21 c
	混合盐碱土加菌 Mixed salt alkaline soil with PSB	2.03 ± 0.29 c	0.40 ± 0.03 b	2.43 ± 0.26 b	0.27 ± 0.03 d	0.13 ± 0.01 ab	0.40 ± 0.02 c
	CK	7.03 ± 0.97 d	2.38 ± 0.16 b	9.41 ± 1.13 c	1.12 ± 0.06 e	0.36 ± 0.04 c	1.48 ± 0.07 d
	黑土加 wj1 Black soil with wj1	7.39 ± 0.51 d	3.71 ± 0.51 a	11.11 ± 0.96 b	1.30 ± 0.09 d	0.54 ± 0.02 b	1.85 ± 0.11 bc
	黑土加 wj3 Black soil with wj3	9.10 ± 0.55 c	2.86 ± 0.15 b	11.95 ± 0.40 b	1.40 ± 0.08 cd	0.48 ± 0.03 b	1.88 ± 0.11 bc
R2	黑土加混合菌 Black soil with mixed PSB	10.84 ± 0.77 b	3.60 ± 0.46 a	14.44 ± 0.43 a	1.71 ± 0.83 a	0.73 ± 0.06 a	2.44 ± 0.02 a
	混合盐碱土 Mixed salt alkaline soil	8.19 ± 0.11 cd	1.43 ± 0.16 c	9.62 ± 0.20 c	1.48 ± 0.07 bc	0.34 ± 0.05 c	1.81 ± 0.04 c
	混合盐碱土加菌 Mixed salt alkaline soil with PSB	12.93 ± 1.02 a	2.29 ± 0.29 b	15.22 ± 0.90 a	1.60 ± 0.03 ab	0.36 ± 0.04 c	1.95 ± 0.07 b
	CK	58.07 ± 6.93 a	3.29 ± 0.35 c	61.36 ± 7.25 a	4.47 ± 0.06 b	0.50 ± 0.16 b	4.96 ± 0.19 c
	黑土加 wj1 Black soil with wj1	56.82 ± 8.29 a	4.82 ± 0.56 a	61.64 ± 8.76 a	6.40 ± 0.95 a	0.80 ± 0.02 a	7.20 ± 0.95 a
	黑土加 wj3 Black soil with wj3	59.74 ± 3.86 a	2.04 ± 0.26 de	61.78 ± 3.65 a	4.97 ± 0.11 b	0.57 ± 0.04 b	5.55 ± 0.14 bc
	黑土加混合菌 Black soil with mixed PSB	45.58 ± 7.73 b	4.12 ± 0.17 b	49.70 ± 7.81 b	5.23 ± 0.54 b	0.85 ± 0.07 a	6.08 ± 0.47 b
	混合盐碱土 Mixed salt alkaline soil	32.26 ± 1.53 c	2.21 ± 0.52 d	34.47 ± 1.83 c	3.22 ± 0.26 c	0.28 ± 0.046 c	3.50 ± 0.23 d
	混合盐碱土加菌 Mixed salt alkaline soil with PSB	50.42 ± 4.94 ab	1.51 ± 0.24 e	51.93 ± 4.96 ab	5.16 ± 0.70 b	0.46 ± 0.04 b	5.62 ± 0.66 bc
R6	CK	47.71 ± 2.01 b	1.28 ± 0.11 c	49.00 ± 2.10 bc	4.30 ± 0.30 ab	0.37 ± 0.07 d	4.65 ± 0.36 b
	黑土加 wj1 Black soil with wj1	40.34 ± 3.00 c	4.34 ± 0.12 a	44.68 ± 2.96 c	3.90 ± 0.16 bc	0.60 ± 0.02 c	4.50 ± 0.15 b
	黑土加 wj3 Black soil with wj3	27.30 ± 2.99 d	3.50 ± 0.13 b	30.80 ± 2.87 d	3.40 ± 0.78 c	0.73 ± 0.03 b	4.13 ± 0.79 b
	黑土加混合菌 Black soil with mixed PSB	56.91 ± 6.70 a	3.11 ± 0.58 b	60.02 ± 6.45 a	4.85 ± 0.12 a	0.97 ± 0.06 a	5.82 ± 0.13 a
	混合盐碱土 Mixed salt alkaline soil	16.1 ± 0.76 e	1.74 ± 0.24 c	17.83 ± 0.95 e	1.82 ± 0.15 d	0.25 ± 0.05 e	2.07 ± 0.20 c
	混合盐碱土加菌 Mixed salt alkaline soil with PSB	51.53 ± 5.63 ab	1.45 ± 0.10 c	52.98 ± 5.53 ab	4.42 ± 0.23 ab	0.33 ± 0.01 de	4.75 ± 0.24 b
	CK	47.71 ± 2.01 b	1.28 ± 0.11 c	49.00 ± 2.10 bc	4.30 ± 0.30 ab	0.37 ± 0.07 d	4.65 ± 0.36 b
	黑土加 wj1 Black soil with wj1	40.34 ± 3.00 c	4.34 ± 0.12 a	44.68 ± 2.96 c	3.90 ± 0.16 bc	0.60 ± 0.02 c	4.50 ± 0.15 b
	黑土加 wj3 Black soil with wj3	27.30 ± 2.99 d	3.50 ± 0.13 b	30.80 ± 2.87 d	3.40 ± 0.78 c	0.73 ± 0.03 b	4.13 ± 0.79 b
R8	黑土加混合菌 Black soil with mixed PSB	56.91 ± 6.70 a	3.11 ± 0.58 b	60.02 ± 6.45 a	4.85 ± 0.12 a	0.97 ± 0.06 a	5.82 ± 0.13 a
	混合盐碱土 Mixed salt alkaline soil	16.1 ± 0.76 e	1.74 ± 0.24 c	17.83 ± 0.95 e	1.82 ± 0.15 d	0.25 ± 0.05 e	2.07 ± 0.20 c
	混合盐碱土加菌 Mixed salt alkaline soil with PSB	51.53 ± 5.63 ab	1.45 ± 0.10 c	52.98 ± 5.53 ab	4.42 ± 0.23 ab	0.33 ± 0.01 de	4.75 ± 0.24 b

不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。  
Different lowercase indicate significant difference( $P < 0.05$ ).

2.5 各个处理对吉育 406 产量的影响

黑土加 wj1 与黑土相比大豆产量各指标,株荚数、空荚数、总粒数、单株粒重及百粒重显著增加。黑土加不同菌液的 3 种处理均可提高株荚数,其它

指标变化不显著。混合土壤加菌处理的大豆株荚数、总粒数、单株粒重及百粒重虽高于未加菌处理,但两处理间差异未达到显著水平(表 2)。

表 2 不同处理对吉育 406 产量的影响  
Table 2 Effect of different treatments on yield of Jiyu 406

处理 Treatment	株荚数 Pods per plant	空荚数 Empty pods per plant	总粒数 Seeds per plant	单株粒重 Grain weight /(g·plant <sup>-1</sup> )	百粒重 100-seed weight/g
黑土 Black soil	12.25 ±0.95 bc	1.3 ±0.577 b	30.67 ±2.08 bc	4.51 ±0.35 bc	16.19 ±1.05 bc
黑土加 wj1 Black soil with wj1	19.75 ±4.11 a	2.5 ±0.577 a	39 ±1.15 a	7.17 ±1.72 a	19.44 ±0.85 a
黑土加 wj3 Black soil with wj3	16 ±1.41 ab	1.5 ±0.577 b	31 ±0.57 bc	5.01 ±0.83 bc	15.84 ±0.26 bc
黑土加混合菌 Black soil with mixed PSB	17.25 ±3.30 a	1 ±0.577 b	33 ±2.08 b	5.61 ±0.33 b	17.05 ±2.11 b
混合盐碱土 Mixed salt alkaline soil	10.2 ±1.50 c	2 ±1.73 a	26.34 ±1.00 d	3.32 ±0.41 c	14.66 ±0.62 c
混合盐碱土加菌 Mixed salt alkaline soil with PSB	11.52 ±3.20 bc	1 ±0.00 b	28.71 ±1.52 cd	4.29 ±0.38 bc	15.08 ±0.67 c

3 结论与讨论

溶磷菌大多都具有促进作物生长、提高作物产量的能力<sup>[17]</sup>。但并非所有的溶磷微生物都能够溶解难溶性磷,有的溶磷菌株只有在室内培养的条件下才能溶磷,当接入土壤后则溶磷作用减弱甚至消失<sup>[18]</sup>。因此,明确溶磷菌株在不同土壤条件下的溶磷促生效应,对于改善土壤营养、增加作物产量具有重要意义。本试验中黑土或混合盐碱土接种溶磷菌后各时期的 *Pn* 均高于未接菌土壤,黑土接种 wj1 可增加大豆整个生育期叶片蒸腾速率,wj1:wj3 (1:1)混合菌液可促进 R2 ~ R8 混合盐碱土大豆叶片蒸腾速率的增加。这与毕静静等<sup>[19]</sup>发现增施微生物菌剂能够增加水稻叶片光合作用,促进光合产物的积累的研究结果一致。

冯瑞章等<sup>[20]</sup>研究表明溶磷菌不仅能够促进燕麦生长量的积累,而且可以显著增加植株全磷和全氮含量。Samina 等<sup>[21]</sup>也发现溶磷菌可显著增加植株含磷量和产量。本试验结果表明,溶磷菌 wj1 可使黑土种植大豆株高增加,wj1:wj3 (1:1)混合菌处理可使黑土与混合盐碱土大豆根干重增加。黑土加 wj1 和混合菌可显著增加 R6 期地下部分的全氮、全磷及植株全磷含量。混合菌处理可显著增加混合土壤大豆植株的地上部分全氮、植株全氮以及地上部分、地下部分全磷、植株全磷含量。这说明溶磷菌在不同土壤条件下其促生效应不同,接种溶磷菌可不同程度的增加大豆的生长性能及物质积累

特性。

研究表明,盐碱胁迫条件下枸杞愈伤组织可溶性蛋白含量增加<sup>[22]</sup>,林生山黧豆幼苗中游离氨基酸的含量显著增加<sup>[23]</sup>。本试验加菌后混合盐碱土壤与对照相比,在整个生育期大豆叶片可溶性蛋白、游离氨基酸及可溶性糖含量均表现下降的趋势。说明混合盐碱土接种溶磷菌后,可使大豆植株渗透调节物质的含量降低,减缓细胞代谢速度,从而使植物细胞对盐胁迫的适应能力增强。这可能是因为溶磷菌在生长过程中能够分泌大量有机酸,使土壤中的迟效态氮磷钾不断释放,改善了土壤理化结构和生物结构<sup>[24]</sup>,使土壤疏松,非毛细管孔隙增加,加速淋盐,抑制返盐<sup>[25]</sup>,有利用植物生长的结果。说明本试验中 wj1:wj3 (1:1)混合溶磷菌对盐碱土壤中大豆也具有良好的促生作用。

综上所述,添加外源溶磷菌,可在不同程度上提高各处理大豆植株的光合作用、生物量、氮磷吸收和产量。混合菌对大豆的促生效应较好,单一菌种处理相比 wj1 略优于 wj3。黑土添加溶磷菌处理对大豆具有一定的促生效应,添加外源溶磷菌后可有效提高混合盐碱土种植大豆的可行性。

参考文献

[1] 王光华,周可琴,金剑,等. 不同碳源对三种溶磷真菌溶解磷矿粉能力的影响[J]. 生态学杂志, 2004, 23(2): 32-36.  
(Wang G H, Zhou K Q, Jin J, et al. Effect of different C sources on the solubilization of rock phosphate by three phosphate solubi-



- lizing fungi [J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23 (2): 32-36.
- [2] Chen Y P, Rekha P D, Arun A B, et al. Phosphate solubilizing-bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities[J]. Applied Soil Ecology, 2006, 34: 33-41.
- [3] 冯月红, 姚拓, 龙瑞军. 土壤解磷菌研究进展[J]. 草原与草坪, 2003(1): 3-7. (Feng Y H, Yao T, Long R J. Research progress of soil phosphate solubilizing abilities [J]. Grassland and Turf, 2003(1): 3-7.)
- [4] 林钰珊, 范缙, 蔡邦平, 等. 解磷微生物在重金属污染原位修复中的作用及其机理研究进展[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2016, 55(5): 697-706. (Lin Y Z, Fan J, Cai B P, et al. Reaserch progress on the mechanisms and effects of in-situ remediation of heavy metal pollution with phosphate solubilizing abilities [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science Edition), 2016, 55(5): 697-706.)
- [5] Gontia-Mishra I, Sasidharan S, Tiwari S. Recent developments in use of 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) deaminase for conferring tolerance to biotic and abiotic stress[J]. Biotechnology Letters, 2014, 36(5): 889-898.
- [6] Rajkumar M, Ae N, Prasad M N V, et al. Potential of siderophore-producing bacteria for improving heavy metal phytoextraction[J]. Trends in Biotechnology, 2010, 28(3): 142-149.
- [7] 刘佩印. 黑龙江省大豆重迎茬问题的研究概况[J]. 黑龙江农业科学, 2001(3): 31-35. (Liu P Y. A survey of continuous and every other cropping of soybean in Heilongjiang province[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2001(3): 31-35.)
- [8] 吕晓, 徐慧, 李丽, 等. 盐碱地农业可持续利用及其评价[J]. 土壤, 2012, 44(2): 203-207. (Lyu X, Xu H, Li L, et al. Sustainable utilization of saline alkali soil and evaluation [J]. Soils, 2012, 44(2): 203-207.)
- [9] 赵国杰, 牛世全, 达文燕, 等. 四株无机解磷菌处理碱化土壤的理化性质及质量评价[J]. 土壤通报, 2014, 45(4): 157-163. (Zhao G J, Niu S Q, Da W Y, et al. Assessment of soil quality and physicochemical properties of the alkaline soil amended with four inorganic phosphate-dissolving microbial inoculants[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(4): 157-163.)
- [10] 宋家清, 郑秀社, 张庆国, 等. 活性微生物菌肥对滨海盐碱土改良的影响[J]. 北方园艺, 2010(18): 53-55. (Song J Q, Zheng X S, Zhang Q G, et al. Improving effect of microbial organic fertilizer on coastal saline-alkali soil[J]. Northern Horticulture, 2010(18): 53-55.)
- [11] 刘微, 朱小平, 高书国, 等. 解磷微生物接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, 3(12): 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, 3(12): 153-155.)
- [12] 王芳, 谢庭生. 酸性紫色土施用溶磷菌对大豆的增产效应[J]. 湖南农业科学, 2012(17): 61-63. (Wang F, Xie T S. Effect of applying phosphate-solubilizing bacteria to acid purple soil on yield-increasing of soybean [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2004, 3(12): 153-155.
- [13] 雒鹏飞, 高勇, 宋风斌, 等. 吉林省西部盐碱土资源开发利用中的若干问题[J]. 吉林农业大学学报, 2004, 26(6): 659-663. (Luo P F, Gao Y, Song F B, et al. Some issues in exploitation and utilization of saline-alkaline soil resources in the west of jilin province[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2004, 26(6): 659-663.
- [14] 汤洁, 汪雪格, 李昭阳, 等. 基于 CA-Markov 模型的吉林省西部土地利用景观格局变化趋势预测[J]. 吉林大学学报, 2010, 40(2): 405-410. (Tang J, Wang X G, Li Z Y, et al. The tendency forecast on land use landscape pattern change in western Jilin province based on ca-markov model[J]. Journal of Jilin University, 2010, 40(2): 405-410.)
- [15] 王春红. 大豆根际土壤溶无机磷细菌的溶磷特性研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2015: 25. (Wang C H. Solubilizing properties of the inorganic phosphate-solubilizing bacteria isolated from soybean rhizosphere soil [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2015: 25.)
- [16] 张志安, 张美善, 魏荣海, 等. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004. (Zhang Z A, Zhang M S, Wei R H, et al. Experimental instruction of plant physiology [M]. Beijing: China Agriculture Sciencetech Press, 2004.)
- [17] Hameeda B, Reddy Y, Harish K R. Effect of carbon substrates on rock phosphate solubilization by bacteria from composts and macrofauna[J]. Current Microbiology, 2006, 53(4): 298-302.
- [18] Freitas J R, Banerjee M R, Germida J J. Phosphate-solubilizing rhizobacteria enhance the growth and yield but not phosphorus uptake of canola (*Brassica napus* L.) [J]. Biology and Fertility of Soils, 1997, 24(4): 358-364.
- [19] 毕静静, 郭宪峰, 郭建党. 微生物菌肥对番茄光合效能、产量及品质的影响[J]. 山东农业科学, 2012, 44(7): 61-62, 66. (Bi J J, Guo X F, Guo J D. The effect of microbial fertilizer on photosynthetic efficiency, yield and quality of tomato [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2012, 44(7): 61-62, 66.)
- [20] 冯瑞章, 姚拓, 周万海, 等. 溶磷菌对燕麦生物量及植株氮、磷含量的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 189-193. (Feng R Z, Yao T, Zhou W H, et al. Effects of phosphate-solubilizing bacteria on the vegetation biomass, nitrogen and phosphorus concentration of *Avena sativa* [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(2): 189-193.)
- [21] Samina M, George L. Inoculation effects of *Pseudomonas putida*, *Gluconacetobacter azotocaptans* and *Azospirillum lipoferum* on corn-plant growth under greenhouse conditions[J]. Microbial Ecology, 2006, 51(3): 326-335.
- [22] 毛桂莲, 许兴. 枸杞耐盐突变体的筛选及生理生化分析[J]. 西北植物学报, 2005, 25(2): 275-280. (Mao G L, Xu X. Studies on *in vivo* selection of salt-tolerant mutant of *Lycium barbarum* L. and its physiological and biochemical characteristics [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2005, 25(2): 275-280.)
- [23] 沈黎明, 王舰. 水分胁迫、盐胁迫和热激对林生山豆体内游离氨基酸含量的影响[J]. 中国农业大学学报, 1996, 1(1): 23-27. (Shen L M, Wang J. Influences of water stress, salt stress and heat shock on amino acids contents of *Lathyrus sylvestris* L. [J]. Journal of China Agricultural University, 1996, 1(1): 23-27.)
- [24] Halleleda B, Harish K, Reddy Y, et al. Effect of carbon substrates on rock phosphate solubilization by bacteria from composts and macrohuna[J]. Current Microbiology, 2006, 53(4): 298-302.
- [25] Bossuyt H, Denef K, Six J, et al. Influence of microbial populations and residue quality on aggregate stability [J]. Applied Soil Ecology, 2001, 16: 195-208.