



2 株野生大豆根际促生菌抑菌促生作用研究

张丹雨, 曲甜甜, 刘莹莹, 郭 英, 卜 宁

(沈阳师范大学 生命科学学院, 辽宁 沈阳 110034)

摘 要:为进一步阐明野生大豆根际促生菌(PGPR)的生物学活性作用,分别采用滤纸片法、水培、沙培或盆栽的方法,测定植物幼苗的生长量(株高、根长、地上部分和地下部分干重)、叶绿素的含量及大豆的结瘤情况。探究 2 株 PGPR(DB17、DB58)的生防作用及对水稻、大豆幼苗生长的影响。结果表明:DB17 对 6 种植物病原真菌具有抑菌活性,其中对甜瓜枯萎菌的抑菌率可达 37. 10%;2 株野生大豆 PGPR 菌株对水稻幼苗有显著的促生长作用,可使幼苗总叶绿素含量提高 29% ~ 79%;2 株野生大豆 PGPR 菌株可以提高大豆根瘤质量;DB58 和混菌(DB17 + DB58)可显著促进大豆幼苗的生长。

关键词:野生大豆;根际促生菌;抑菌;促生

Antibacterial Function and Promoting Effect of Two Plant Growth Promoting Rhizobium from *Glycine soja*

ZHANG Dan-yu, QU Tian-tian, LIU Ying-ying, GUO Ying, BU Ning

(College of Life Science, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China)

Abstract: To explore the biological activity of wild soybean rhizosphere-promoting bacteria (PGPR), two PGPR (DB17, DB58) strains were investigated the effects on biocontrol and growth influence of rice and soybean seedlings by filter paper method, hydroponic, sand and pot cultures. Growth characteristics of plant seedlings including plant height, root length, dried weight of ground and underground parts, chlorophyll content and soybean nodulation were measured. The results indicated that DB17 could inhibit the growth of six plant pathogenic fungus. The inhibition efficiency of *Fusarium oxysporum* f. sp. reached 37. 10%; two strains could significantly promote the growth of rice seedlings and increase the total chlorophyll content about 29% – 79%. The quality of soybean nodule could also be enhanced by above two strains. The DB58 and mixed bacteria (DB17 + DB58) could dramatically promote the growth of soybean seedlings.

Keywords: Wild soybean; Rhizosphere-promoting bacteria; Bacteriostasis; Growth promotion

植物根际促生菌(plant growth promoting rhizobia, PGPR)指自由生活于土壤或定植在植物体内具有固氮、解磷、解钾、产生植物激素、分泌抗生素和促进植物生长的一类有益微生物^[1]。自 1978 年 Burr 等首先在马铃薯上报道 PGPR 以来,国内外学者对大豆根际、甘蔗、沿海滩涂等植物的 PGPR 进行了广泛深入的研究^[2-4],发现假单胞菌属(*Pseudomonas*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)、沙雷氏菌属(*Serratia*)、伯克霍尔德氏菌属(*Burkholderia*)等 20 多个种属的根际微生物具有防病促生潜能,并对其固氮、溶磷、产生植物激素、抑病机理以及作为新型肥料菌源在农业生产中的开发利用前景等方面进行了深入探索^[5]。据报道,健康树木根际土中分离得到的 1 株伯克霍尔德菌(*Burkholderia* sp.)对油菜菌核病原菌(*Sclerotinia sclerotiorum*)、黑松叶斑病原菌(*Pestalotiopsis* sp.)、香蕉枯萎病原菌(*Fusarium*

oxysporum f. sp. *cubense*)、白蝴蝶炭疽病原菌(*Colletotrichum* sp.)和美人蕉瘟病原菌(*Pyricularia cannaecola hashioka*)等植物病原真菌具有明显的抑制作用^[6];PGPR – 绿脓假单胞菌 SLC-2 和枯草芽孢杆菌 YJ20 对尖孢镰刀菌等 9 种病原真菌具有拮抗作用^[7],从而有效防治尖孢镰刀菌引起的苜蓿根腐病的发生;水稻根际土壤中筛选得到以芽孢杆菌为主的 PGPR,具有解磷、溶磷、解钾能力,可显著促进水稻生长^[8];园林植物根际土壤的 PGPR – 鞘氨醇单胞菌(*Sphingomonas* sp.)可显著提高西瓜幼苗根系分布和生长,有效缓解西瓜连作障碍^[9]。近年来对微生物菌肥的研究主要集中在对促进植物根、茎、叶生长以及促进豆科植物结瘤情况等方面和抑制病原微生物等方面^[10],因此 PGPR 菌株的促生长作用以及与病原微生物的拮抗作用使得其在生物菌肥方面具有广泛的应用前景。PGPR 可作为生物

收稿日期:2018-12-27

基金项目:国家重点研发计划子课题(2016YFC0500707);辽宁省科学技术计划(2017208001)。

第一作者简介:张丹雨(1994 –),女,硕士,主要从事资源微生物与应用研究。E-mail:1219044743@qq. com。

通讯作者:卜宁(1960 –),女,博士,教授,主要从事资源微生物与应用研究。E-mail:buning@synu. edu. cn。

肥料、生物农药、生物修复剂在资源的综合利用和环境保护方面有巨大潜力。

野生大豆 (*Glycine soja*) 是一年生草本植物, 为栽培大豆近缘祖先种, 具有高蛋白、抗逆性强、繁殖系数大、适应性广等优点, 因其为栽培大豆种质创制的重要物质基础和栽培大豆生产可持续发展的战略资源而成为关注和研究的热点^[11]。自然环境条件下生长的野生大豆植株不仅具有栽培大豆所不含的丰富遗传物质和功能基因, 而且其原始生境复杂, 种群多样性丰富, 其根际促生菌的丰富度和多样性都较其它物种更为优越。自番茄根际筛选出的 PGPR 生防菌不仅对番茄灰霉病菌有明显的拮抗作用, 而且能显著增加番茄株高、根长、茎叶干重、根干重, 促进番茄植株的生长发育^[12]; 拟南芥 PGPR - 粘质沙雷氏菌可以通过茉莉酸、乙烯和水杨酸等多种信号通路促进植物根系发育^[13]。然而从野生大豆根际分离出 PGPR 菌株的相关研究却鲜有报道。对野生大豆根瘤及根际土壤微生物进行筛选研究, 极有可能挖掘到具有潜在应用价值的多功能根际促生菌株。本实验室前期从沈阳沈北新区蒲河沿岸生长的野生大豆根瘤及根际土壤中分离得到的 2 株野生大豆 PGPR 菌株 (DB17、DB58), 经鉴定, DB17 为伯克霍尔德菌属 (*Burkholderia*), DB58 为鞘氨醇单胞菌属 (*Sphingomonas*)。对于伯克霍尔德菌属的研究主要集中在解磷、抑菌、降解多环芳烃、促生长等方面^[14-16]; 对于鞘氨醇单胞菌属, 则主要关注其促进植物生长以及降解农药等方面^[17-19]。本试验研究这 2 株野生大豆 PGPR 菌株的生防作用和促进植物生长作用, 旨在进一步探明其功能作用, 为野生大豆根际促生菌种质资源的开发和充分利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 菌种 野生大豆 PGPRDB17 菌株: 伯克霍尔德菌属 (*Burkholderia*); 野生大豆 PGPRDB58 菌株: 鞘氨醇单胞菌属 (*Sphingomonas*)。17 种植物病原菌均由沈阳师范大学生命科学学院微生物实验室提供。

1.1.2 供试品种 水稻 (辽星 1 号) 和大豆 (沈农 17) 分别由辽宁省稻作研究所和沈阳农业大学大豆研究所提供。

1.2 试验设计

1.2.1 抑菌能力 为明确 DB17 的抑菌能力测定 DB17 的抑菌谱。经过文献的调研发现, DB58 为鞘氨醇单胞菌属 (*Sphingomonas*), 该属菌种主要生物

学作用为促进生长和农药降解, 因此本研究暂且对 DB58 的抑菌谱不予研究。

1.2.2 对水稻幼苗的促生作用 选择大小相近并且籽粒饱满的水稻种子, 反复洗涤, 淘汰不合格的种子。避光浸泡 24 h 后将种子平铺于带有双层湿润滤纸的白瓷盘上, 用双层纱布覆盖, 保持湿润。待催芽 36 h 后将萌发幼芽的种子平铺于装有 Hogland 的营养液并且覆盖纱网的 750 mL 的塑料杯上, 待幼苗长至 2 ~ 3 cm 时进行处理。对照组加 3% 的牛肉膏蛋白胨空培养基; 设置 3 个试验组, 分别为 DB17、DB58 和 DB17 + DB58, 均加入 3% 的供试 PGPR 对数期的发酵液。对照组和处理组每天相同时间浇 50 mL 的清水。将水培水稻幼苗分别培养 7, 9, 11 和 13 d, 分别采集每组样本各 30 株, 测量株高、根长及干重。

1.2.3 对大豆结瘤作用的影响 选择大小相近并且籽粒饱满的大豆种子, 浸泡 3 h 后将种子平铺于带有双层湿润滤纸的白瓷盘上, 用双层纱布覆盖, 保持湿润。待催芽 3 d 后将萌发幼芽的种子种植到装有细沙的塑料杯中, 每杯种 2 粒种子, 杯底打孔穿纱布条, 再将塑料杯置于装有自来水的罐头瓶中, 待幼苗长至 3 ~ 5 cm 时进行处理, 试验处理设置和处理方法同水稻幼苗。各处理每天相同时间浇 50 mL 的清水。测量结瘤数、根瘤干重和根瘤直径。

1.2.4 对大豆幼苗的促生作用 将大豆进行催芽处理, 将催好芽的大豆种子种植到装有 1:2 蛭石和草炭的混合基质中, 试验处理设置和处理方法同水稻幼苗。培养至 33 d 后测定其促生指标。对比根长、株高、根干重和地上部分干重。

1.3 方法

1.3.1 菌株的活化与培养 取冰箱斜面保存菌种 (供试野生大豆 PGPR 菌株, 供试植物病原真菌) 接种于新制的牛肉膏蛋白胨或 PDA 斜面培养基上于 37℃ 或 26℃ 培养 36 h 或 5 d, 备用。

1.3.2 抑菌作用测定 用无菌水将已活化的植物病原真菌的孢子洗脱制备孢子悬液, 再用孢子悬液制备 PDA 平板, 待培养基凝固后, 于培养基的中心放置浸有 DB17 菌悬液的滤纸片, 对照组放置浸有无菌水的滤纸片, 于 26℃ 培养 5 d, 观察并测量抑菌圈直径、记录数据、计算抑菌率。抑菌率计算公式: 抑制率 (%) = $(r_0 - r_1) / r_0 \times 100\%$, r_0 : 对照半径; r_1 : 对峙培养病原真菌菌落半径。

1.3.3 叶绿素含量测定 取新鲜叶片剪碎, 称取 0.2 g 鲜样, 放入研钵中, 加入纯丙酮 5 mL, 少许 CaCO₃ 和石英砂, 研磨成匀浆, 再加入 80% 丙酮 5 mL, 继续研磨至组织变白, 在暗处静置 3 ~ 5 min 后, 用

一层干滤纸过滤到 25 mL 容量瓶中,用滴管吸取 80% 丙酮,将洗净研钵和滤纸的周围色素过滤到容量瓶中,待滤纸和残渣全部变白之后,用 80% 丙酮定容至 25 mL 刻度。取上述色素提取液 1 mL,加 80% 丙酮 4 mL 稀释后转入比色杯中,以 80% 丙酮为空白,分别测定 OD₆₆₃、OD₆₄₅ 和 OD₆₅₂ 值。分别计算色素提取液中叶绿素 a、b 含量及叶绿素总含量,计算公式:Ca = 12.7 × OD₆₆₃ - 2.69 × OD₆₄₅; Cb = 22.9 × OD₆₄₅ - 4.68 × OD₆₆₃; CT = Ca + Cb。

1.3.4 干物质测定

将地上部分或者地下部分于 80℃ 下烘至恒重后称重。

1.4 数据分析

使用统计学软件 SPSS 19.0 对试验数据进行单因素分析,并使用 Excel 2016 进行图表的制作。

表 1 DB17 菌株对 17 种植物病原真菌的抑菌效果
Table 1 Bacteriostatic effect of strain DB17 on 17 plant pathogenic fungus

植物病原菌 Plant pathogen	抑菌率 Bacteriostatic rate /%	植物病原菌 Plant pathogen	抑菌率 Bacteriostatic rate /%
CK	0	甜瓜枯萎 <i>Fusarium oxysporum f Cucumis melo</i>	37.1
玉米黑束 <i>Seminibus frumenti atri manipulum</i>	—	辣椒疫病 <i>Clostridium vento urente, piperis</i>	0
玉米穗腐 <i>Squalent abductis ARISTA</i>	—	玉米灰斑 <i>Frumento Turcico griseo laminam</i>	0
玉米腐霉 <i>Botrytis cinerea Pers. ex Fr</i>	—	玉米弯孢叶 <i>Frumentum Curvularialunat</i>	0
玉米灰顶 <i>Frumentum summo putrescat</i>	—	玉米圆斑 <i>Per macula frumentum India</i>	—
玉米大斑 <i>Helminthosporium turcicum Pass.</i>	20.6	向日葵核盘菌 <i>Helianthus sclerotinia</i>	0
稻瘟病菌 <i>Rice, semina, fungus inspiratione</i>	27.6	黄瓜花径 <i>Cucumis semina culmis</i>	—
苹果霉心 <i>Core malum in aurugine multitudinem</i>	34.0	番茄灰霉 <i>Botrytis cinerea</i>	17.6
高粱靶斑 <i>Planta target India folium macula</i>	26.3	玉米顶腐层出 <i>Frumentum summo putrescat</i>	—

“—”表示无明显抑菌圈,但菌体周围无病原菌生长;“0”表示没有抑菌效果。
‘—’ indicates that there is no obvious inhibition zone, but no pathogens grow around the cells; ‘0’ means no bacteriostatic effect.

2.2 DB17 和 DB58 对水稻幼苗的影响

2.2.1 对水稻幼苗生长量的影响 野生大豆 PG-PR 菌株对水稻幼苗生长量的影响如表 2 所示:未加菌处理的水稻幼苗叶片颜色明显泛黄,植株相对矮小;而加菌处理的水稻幼苗叶片颜色则明显偏深

2 结果与分析

2.1 DB17 菌株对植物病原真菌的抑菌作用

DB17 菌株的抑菌谱结果如表 1 所示:DB17 菌株对玉米大斑(*Helminthosporium turcicum Pass.*)、稻瘟病菌(*Rice, semina, fungus inspiratione*)、苹果霉心(*Cor malum in aurugine multitudinem*)、高粱靶斑(*Planta target India folium macula*)、甜瓜枯萎(*Fusarium oxysporum f Cucumis melo*)和番茄灰霉(*Botrytis cinerea*)具有显著的抑菌活性,出现明显的抑菌圈。尤其是对甜瓜枯萎病原菌的抑菌率达到了 37.1%,对番茄灰霉、玉米黑束等病原菌的抑菌效果也较好。抑菌试验表明,DB17 菌株在抑制植物病原菌方面有着良好的作用效果。

绿,植株相对较高,且由 DB17、DB58 单菌与 DB17 + DB58 混菌处理的影响效果明显不同,3 个试验组对水稻幼苗的影响依次是:DB17 + DB58 > DB58 > DB17。

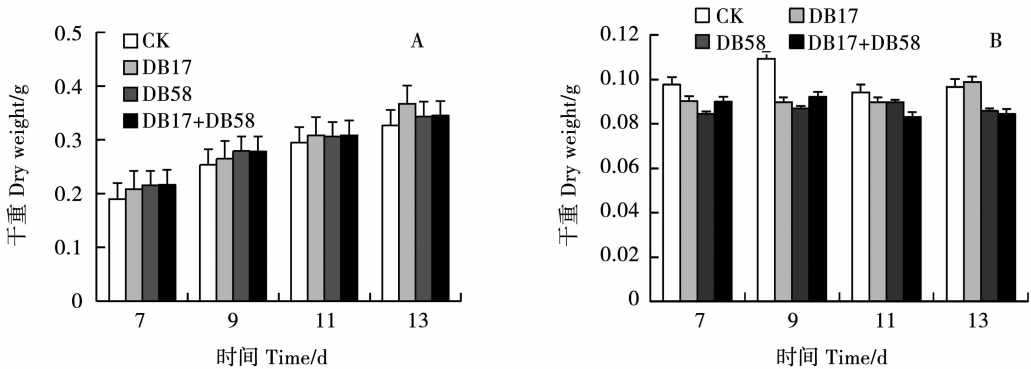
表2 不同培养时间 PGPR 菌株对水稻幼苗生长的影响
Table 2 Effect of PGPR strain on the growth of rice seedlings at different processing time

处理 Treatment	株高 Height/cm				根长 Length/cm			
	7 d	9 d	11 d	13 d	7 d	9 d	11 d	13 d
CK	10.42 b	13.25 b	13.96 b	14.40 b	7.62 b	8.54 b	8.17 b	8.39 b
DB17	11.19 b	14.62 a	15.33 a	16.17 a	8.57 a	9.83 a	9.17 a	9.24 b
DB58	12.27 a	14.79 a	15.37 a	15.57 a	8.64 a	8.93 a	9.60 a	10.20 a
DB17 + DB58	12.49 a	14.90 a	16.23 a	16.38 a	8.54 a	9.17 a	8.84 a	9.60 a

不同小写字母表示不同处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同。
Different lowercase indicate significant differences between treatments at $P < 0.05$ level. The same below.

野生大豆 PGPR 菌株对水稻幼苗地上及地下部分干重的影响如图 1 所示:水稻幼苗的地上部分干重随培养时间的延长而增加,加菌处理的水稻幼苗地上部分干重与未加菌处理的对照相比均有增加;

而地下部分干重与培养时间并未显示出一定的相关性,且加菌处理的水稻幼苗地下部分干重与未加菌处理的对照相比均呈现一定的下降趋势。



A:水稻幼苗地上部分;B:水稻幼苗地下部分。
A:The aboveground part of rice seedling; B:The underground part of rice seedling.

图1 PGPR 菌株对水稻幼苗地上及地下部分干重的影响

Fig. 1 Effects of PGPR strain on dry weight of above-ground and underground parts of rice seedling

2.2.2 对水稻幼苗叶绿素含量的影响 如图 2 所示:DB17 和 DB58 处理的水稻幼苗的叶片叶绿素含量均有所增加,其中叶绿素 A 的含量变化幅度不大,且 3 个试验组含量基本相同,而叶绿素 B 的含量则明显增加,从而导致总叶绿素总含量提升 29%~79%。3 个处理叶绿素含量的总体趋势为:DB17 + DB58 > DB58 > DB17,混菌组的叶绿素含量最高。由此可见,DB17 和 DB58 发挥协同作用,促使植物中叶绿素含量提高。

2.3 DB17 和 DB58 对大豆幼苗的影响

2.3.1 对大豆幼苗结瘤的影响 野大豆 PGPR 菌株对水稻幼苗结瘤的影响如表 3 所示:加菌处理后的大豆根瘤数量并没有增加,反而稍有减少,但根瘤干重和直径却有增加,尤其是根瘤直径明显高于对照组,且由 DB17、DB58 和 DB17 + DB58 处理的影响未显示出明显的差别。说明加菌处理后的大豆根瘤平均直径明显大于对照组,体积增大,质量有

所增加,但其根瘤质量的增加与固氮作用间是否呈正相关有待后续研究。加菌后根瘤的平均直径明显大于对照组,由此可见,PGPR 菌株对大豆根瘤的生长具有促进作用。

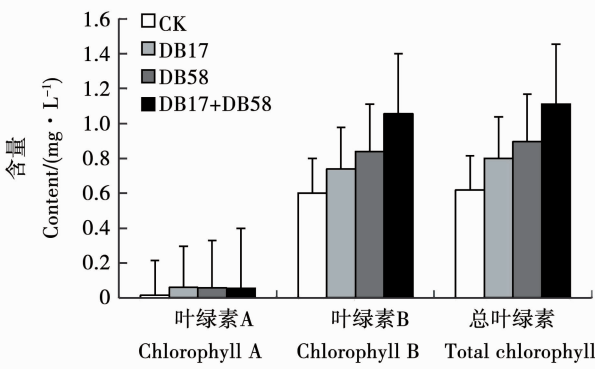


图2 PGPR 菌株对水稻幼苗叶片叶绿素含量影响
Fig. 2 Effect of PGPR on chlorophyll content of rice seedlings leaves

表 3 PGPR 菌株对大豆根瘤的影响

Table 3 Effect of PGPR strain on soybean nodules

处理 Treatment	根瘤个数 Number of nodules/个	根瘤干重 Root nodule dry weight/g	根瘤直径 Diameter of nodules/mm
CK	19 a	0.0150 a	2.2591 a
DB17	18 a	0.0202 a	2.5511 b
DB58	16 b	0.0197 a	2.5929 b
DB17 + DB58	18 a	0.0225 a	2.5539 b

2.3.2 对大豆幼苗生长的影响 2 株野生大豆 PG-PR 菌株对大豆幼苗生长影响的结果如表 4 所示: DB17 处理后的大豆幼苗与对照组相比并没有优势,呈现负相关;而经 DB58 和 DB17 + DB58 处理的大豆幼苗与对照组相比,根长缩短,干重增加,株高

增加,且存在显著差异,即 DB58 和 DB17 + DB58 处理与大豆幼苗生长呈正相关。由此说明,DB58 和 DB17 + DB58 处理所分泌的某些物质有利于大豆幼苗的生长,具有显著的促进生长作用。

表 4 PGPR 菌株对盆栽大豆幼苗生长的影响

Table 4 Effect of PGPR strain on the growth of potted soybean seedlings

处理 Treatment	根长 Root length/cm	根干重 Dry weight of root/g	株高 Plant height/cm	地上部干重 Dry weight up-ground/g
CK	160.0 a	0.1542 a	624.2 b	1.1078 b
DB17	99.8 b	0.0803 b	567.0 c	0.8694 c
DB58	140.8 a	0.1607 a	659.2 a	1.2047 a
DB17 + DB58	154.5 a	0.1630 a	690.8 a	1.2561 a

3 讨 论

PGPR 菌株通过直接产生促进植物生长的植物生长调节剂如吲哚乙酸等以及自身的固氮作用,溶磷作用、解钾作用促进植物生长,通过抑制拮抗根际的病原菌和有害根际微生物,产生抗生素等物质,从而促进植物的生长发育^[20-22]。陈姗姗^[23]从重庆市北碚区的紫色土中筛选出 10 株 PGPR 菌株,采用漂浮育苗的方式给 K326 烟草接种 PGPR 菌株,探究其促生长情况,处理过的植株长势明显优于对照组,株高、茎长、叶片数虽与对照相比差异不显著,但是均优于对照。其中有 3 株 PGPR 菌株处理过的根长显著高于对照,分别达 59.05%、71.29% 和 97.88%。在本研究中,两株 PGPR 菌株处理过的水稻幼苗,其株高和干重明显高于对照组,根长虽不明显,却也优于对照组,由此可见,PGPR 菌株是否针对不同植物的部位促生作用不同值得进一步研究。在李冰^[24]研究显示目的菌株(PGPR)对于水稻幼苗的促生试验中可以发现,目的菌株(PGPR)对水稻株高、干重促生效果显著,对主根数量有显著促进作用,对根长却并未提及。但是,PGPR 菌株的明显促生作用已被证实。

植物根际促生菌(PGPR)在对植物的病害防治中也发挥着很重要的作用,其主要的防治机制是由

于 PGPR 菌株可产生 ACC 脱氨酶、抗生素和分泌铁蛋白^[25-27],从而起到抑制病原菌的作用。王晓强^[28]从山东省不同地区采集的烟草根际土壤中分离出 1 株 PGPR 菌株 Lyc2,其抑菌试验结果表明,菌株 Lyc2 对病原真菌玉米黄曲霉菌等 8 株植物病原菌均具有显著的拮抗活性,且对玉米叶枯菌拮抗活性最强。本研究中也证实 PGPR 菌株 DB17 对 6 种植物病原真菌具有抑菌活性,其中对甜瓜枯萎病原菌的抑菌活性最强,抑菌率可达 37.10%。蔡三山等^[29]证实 PGPR 菌株的叶绿素含量与抗病原菌的抗性呈现正相关,叶绿素含量高时,光合作用随之增强,植物叶片积累的有机物质也增多,进而抗性增强。本研究亦证实目的 PGPR 菌株 DB17、DB58 可以使水稻幼苗总叶绿素含量提高 29%~79%。

4 结 论

2 株野生大豆 PGPR 菌株具有一定的生物学活性作用。DB17 对 6 种植物病原真菌具有抑菌活性,其中对甜瓜枯萎菌的抑菌活性最强,抑菌率可达 37.10%;2 株野生大豆 PGPR 菌株对水稻幼苗有显著的促生长作用,可使幼苗总叶绿素含量提高 29%~79%;2 株野生大豆 PGPR 菌株可以提高大豆根瘤重量;DB58 和混菌对大豆幼苗的生长有显著的促进作用。野生大豆 PGPR 菌株在生物菌肥、生物

农药的研制上具有潜在的应用价值。

参考文献

[1] 刘莹莹,王继雯,岳丹丹,等.一株固氮芽孢杆菌的分离与鉴定[J].中国农学通报,2015,31(26):60-65. (Liu Y Y, Wang J W, Yue D D, et al. Isolation and identification of a strain of *Bacillus nitrogenophilus*[J]. China Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(26):60-65.)

[2] 曾庆飞,王茜,陆瑞霞,等.大豆根际促生菌的分离筛选及其对大豆和百脉根生长与品质的影响[J].草业学报,2017,26(1):99-111. (Zeng Q F, Wang Q, Lu R X, et al. Isolation and screening of soybean rhizosphere probiotics and their effects on growth and quality of soybean and lotus roots[J]. Journal of Herbology, 2017, 26(1):99-111.)

[3] 张洪彬.甘蔗及其根际土壤固氮菌的分离和特性研究[D].广东:华南农业大学,2016. (Zhang H B. Separation and characteristics of nitrogen-fixing bacteria in sugarcane and its rhizosphere soil [D]. Guangdong: South China Agricultural University, 2016.)

[4] 王小兵,叶赛克,汪晓丽,等.江苏沿海滩涂植物根际促生菌的筛选鉴定及其耐盐促生特性[J].扬州大学学报(农业与生命科学版),2016,37(2):81-86. (Wang X B, Ye S K, Wang X L, et al. Screening and identification of rhizosphere-promoting bacteria in coastal plants along the beach in Jiangsu province and their salt-tolerant growth characteristics[J]. Journal of Yangzhou University(Agriculture & Life Sciences), 2016, 37(2):81-86.)

[5] 闫洪雪,刘露,李丽,等. PGPR 的研究进展及其在农业上的应用[J].黑龙江农业科学,2016(6):148-151. (Yan H X, Liu L, Li L, et al. Research progress of PGPR and its application in agriculture [J]. Heilongjiang Agricultural Science, 2016 (6): 148-151.)

[6] 毕可可.一株拮抗树木褐根病菌的伯克霍尔德菌的分离及鉴定[J].林业与环境科学,2016,32(4):7-11. (Bi K K. Isolation and identification of a *Burkholderia* strain that antagonizes rhizoctonia solani [J]. Journal of Forestry and Environmental Sciences, 2016, 32(4):7-11.)

[7] 刘艳玲. PGPR 抑制紫花苜蓿根腐病的作用研究[D].哈尔滨:哈尔滨师范大学,2017. (Liu Y L. Study on the effect of PGPR on the inhibition of alfalfa root rot [D]. Harbin: Harbin Normal University, 2017.)

[8] 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.)

[9] 王志刚,胡云龙,徐伟慧,等.鞘氨醇单胞菌菌株 CL01 的分离鉴定及其对连作西瓜的促生效应[J].农业生物技术学报,2015,23(10):1360-1367. (Wang Z G, Hu Y L, Xu W H, et al. Isolation and identification of *Sphingomonas* strain CL01 and its promoting effect on continuous cropping watermelon [J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2015, 23(10):1360-1367.)

[10] 沈其荣,乔策策,李荣,等.一株具解磷能力伯克霍尔德菌属细菌 NJAUB8 及其研制的微生物肥料:CN106754463A [P]. 2017. (Shen Q R, Qiao C Z, Li R, et al. A microbial fertilizer

with the ability to dissolve phosphorus, *Burkholderia* bacteria NJAUB8 and its development: CN106754463A [P]. 2017-05-31.)

[11] 蒋永梅.四种植物根际促生菌筛选及生物菌肥效果研究[D].兰州:甘肃农业大学,2017. (Jiang Y M. Screening of four plant rhizosphere-promoting bacteria and effects of biological fertilizers [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2017.)

[12] 杨亚男.番茄根际促生菌的筛选及其培养基优化[D].山东:山东农业大学,2017. (Yang Y N. Screening and medium optimization of PGPR from tomato rhizosphere [D]. Shandong: Shandong Agricultural University, 2017.)

[13] Shi C L, Park H B, Lee J S, et al. Inhibition of primary roots and stimulation of lateral root development in *Arabidopsis thaliana* by the rhizobacterium *Serratia marcescens* 90-166 is through both auxin-dependent and independent signaling pathways[J]. Molecules & Cells, 2010, 29(3):251-258.

[14] 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 promotion of multi-rise rhizosphere-promoting bacteria in wild soybeans [J]. Biotechnology Bulletin, 2018, 34(10):108-115.)

[15] 李晓斌,孙寓姣,王红旗,等.焦化厂污染土壤中多环芳烃降解菌群解析[J].化工学报,2010,61(2):477-483. (Li X B, Sun Y X, Wang H Q, et al. Analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons degrading bacteria in polluted soils of coking plants [J]. CIESC Journal, 2010, 61(2):477-483.)

[16] 韩超,刘爱新.吡咯伯克霍尔德氏菌 A12 发酵培养基的优化及抑菌物质理化性质研究[J].鲁东大学学报(自然科学版),2012,28(4):335-339. (Han C, Liu A X. Optimization of fermentation medium for *B. Burgdorferi* A12 and physicochemical properties of antibacterial substances [J]. Journal of Ludong University(Natural Science Edition), 2012, 28(4):335-339.)

[17] 王志刚,张于光,徐伟慧,等.一株经分离获得的鞘氨醇单胞菌属细菌及其在促进连作西瓜生长中的应用:CN105176855A [P]. 2015-12-23. (Wang Z G, Zhang Y G, Xu W H, et al. A strain of *Sphingomonas* spp. and its application in promoting continuous cropping of watermelon: CN105176855A [P]. 2015-12-23.)

[18] 苟敏,曲媛媛,杨桦,等.鞘氨醇单胞菌:降解芳香化合物的新型微生物资源[J].应用与环境生物学报,2008,14(2):276-282. (Geng M, Qu Y Y, Yang H, et al. *Sphingomonas*: A novel microbial resource for degradation of aromatic compounds [J]. Journal of Applied and Environmental Biology, 2008, 14(2):276-282.)

[19] 台喜生,冯佳丽,李梅,等.鞘氨醇单胞菌在生物降解方面的研究进展[J].湖南农业科学,2011(4):21-25. (Tai X S, Feng J L, Li M, et al. Research progress of *Sphingomonas* in biodegradation [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2011(4):21-25.)

[20] 沈耀耀.西北部分地区野大豆根瘤菌遗传多样性及系统发育的研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2011. (Shen Y Y. Study on genetic diversity and phylogeny of wild soybean rhizobium in parts of Northwest China [D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2011.)

[21] 麦靖雯,黎瑞君,张巨明.植物根际促生菌研究综述[J].现代

农业科技, 2018(12): 179-180,183. (Mai J W, Li R J, Zhang J M. Review of research on plant rhizosphere probiotics[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2018(12): 179-180, 183.)

[22] 胡江春,薛德林,马成新,等. 植物根际促生菌(PGPR)的研究与应用前景[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1963-1966. (Hu J C, Xue D L, Ma C X, et al. Research and application prospects of plant rhizosphere-promoting bacteria (PGPR) [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(10):1963-1966.)

[23] 陈姗姗. 植物根际促生菌(PGPR)的鉴定及其对植物生长的影响[D]. 重庆:重庆师范大学,2018. (Chen S S. Identification of plant rhizosphere-promoting bacteria (PGPR) and its effects on plant growth [D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2018.)

[24] 李冰. 不同植物根际促生菌对小麦、水稻、棉花的促生效果评价[D]. 合肥:安徽农业大学, 2014. (Li B. Evaluation of the promoting effect of different plant rhizosphere-promoting bacteria on wheat, rice and cotton[D]. Hefei:Anhui Agricultural University, 2014.)

[25] 贺字典,闫立英,石延霞,等. 产生 ACC 脱氨酶的 PGPR 种衣剂对黄瓜细菌性茎软腐病的防治效果[J]. 中国生物防治学报, 2017(6):817-825. (He Z D, Yan L Y, Shi Y X, et al. Control effect of PGPR seed coating agent producing ACC deaminase on cucumber bacterial stem soft rot[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2017(6): 817-825.)

[26] Brotman Y, Landau U, Cuadros-Inostroza á, et al. Trichoderma-Plant root acolonization: Escaping early plant defense responses and activation of the antioxidant machinery for saline stress tolerance[J]. PLoS Pathogens, 2013, 9(3):130-139.

[27] 席先梅,刘正坪. 促进小麦生长的根围细菌的筛选及初步鉴定[J]. 北京农学院学报, 2006, 21(2):47-50. (Xi X M, Liu Z P. Screening and preliminary identification of root-bacterial bacteria for promoting wheat growth[J]. Journal of Beijing Agricultural University, 2006, 21(2): 47-50.)

[28] 王晓强. 植物根际促生菌 Lyc2 和 XW10 的鉴定及抑菌机理研究[D]. 泰安:山东农业大学,2016. (Wang X Q. Identification and antibacterial mechanism of plant rhizosphere-promotingbacteria Lyc2 and XW10 [D]. Taian: Shandong Agricultural University,2016.)

[29] 蔡三山,陈京元,胡承辉,等. 不同 PGPR 菌株对松针叶绿素含量的影响[J]. 湖北林业科技, 2015(4):21-23. (Cai S S, Chen J Y, Hu C H, et al. Effects of different PGPR strains on chlorophyll content of pine needles[J]. Hubei Forestry Science and Technology, 2015(4): 21-23.)