

郑喜清, 胡静一, 邱娜. 3 株有机磷降解菌的促生特性及其对番茄种子萌发的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(5): 170–177.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.05.026

## 3 株有机磷降解菌的促生特性 及其对番茄种子萌发的影响

郑喜清, 胡静一, 邱娜

(河套学院农学系, 内蒙古巴彦淖尔 015000)

**摘要:**为了探讨有机磷降解菌的促生特性, 选择 3 种不同有机磷降解菌 P33、P53、P9, 对其产生生长素能力、产脱氨酶能力、固氮能力、产精氨酸脱羧酶能力等指标进行测定, 并通过种子萌发试验筛选对番茄种子萌发有高效促生作用的有机磷降解菌。结果表明, 供试菌株 P33、P53、P9 具有产植物生长素能力、产 1-氨基羧酰-1-环丙烷羧酸(ACC)脱氨酶能力、产铁载体能力、固氮能力、产精氨酸脱羧酶能力、对不同磷矿物质的溶解作用、解无机磷能力和拮抗植物病原菌能力, 且对番茄种子萌发具有一定的促生效果, 是 3 株具有潜在价值的有机磷降解菌, 其中 100% P33 处理可使番茄种子发芽势提高 13.00 百分点, 发芽率提高 10.00 百分点, 发芽指数提高 2.18, 活力指数提高 0.71; 100% P53 可使番茄种子发芽势提高 8.00 百分点, 发芽率提高 3.00 百分点, 发芽指数提高 0.76, 活力指数提高 0.05; 100% P9 可使番茄种子发芽势提高 1.00 百分点, 发芽率提高 1.00 百分点, 发芽指数提高 0.70, 活力指数提高 0.01。

**关键词:**有机磷降解菌; 番茄; 种子萌发; 促生特性

**中图分类号:**S641.204; S182 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)05-0170-08

磷是植物生长和代谢必需的元素之一, 直接参与核酸、蛋白质、腺嘌呤核苷三磷酸(ATP)及磷脂等生物大分子的合成, 在转化、合成、植物呼吸和细胞分裂等过程中起着重要影响<sup>[1]</sup>。土壤中富含的磷资源, 是植物生长发育过程中必需磷元素的重要来源, 而土壤中 95% 以上的磷以无效态形式存在, 植物不能直接吸收利用, 并且在土壤中的移动性较弱, 其中大部分磷元素被土壤中的钙、铝等金属离子固定, 导致植物能够直接吸收利用的有效磷含量不足, 降低了磷肥利用率<sup>[2-4]</sup>。人们为了追求更大的经济效益, 通常施用大量化学肥料来补充磷素营养。但是, 长期施用化肥带来了一系列问题, 如磷素资源耗竭、土壤板结、环境污染等, 制约了农业的可持续发展<sup>[5]</sup>。因此, 如何转化土壤中被固定的磷, 并把无效态的磷转化为有效态磷, 是解决磷素营养缺乏问题的关键。

解磷微生物可以将土壤中难溶性的磷酸盐溶解、释放出来, 其中包括解磷细菌、解磷真菌和解磷

放线菌等。解磷微生物不仅具有解磷效果, 同时可能对植物存在一定的促生效果, 并对大量使用化学肥料带来的环境问题有所改善。微生物在自然界物质循环中起着至关重要的作用, 其中解磷细菌是土壤磷循环的一个重要组成部分, 占土壤可培养细菌的 40% 以上, 能将土壤中不溶的磷酸盐转化为植物可吸收利用的形式<sup>[6]</sup>。溶磷细菌在促进土壤磷有效化过程中具有重要作用, 因此, 关于解磷微生物的研究是土壤磷研究的热点方向。

解磷菌有 2 类, 一类是解无机磷的细菌, 另一类是有机磷的降解细菌, 有机磷降解菌的作用是分解有机磷化合物, 其作用机制主要是借助于细菌生命活动中产生的酶降解有机磷, 具有固氮能力、解磷能力、分泌植物生长素能力等, 进而对植物的生长产生促进作用。迄今, 已有许多学者对解磷菌的促生特性做了大量研究, 姜瑛等对解磷能力进行测定后, 筛选出 1 株固氮解磷菌<sup>[7]</sup>。王欢等对降解菌进行铁载体和产生生长素能力的测定, 筛选出 1 株对黄瓜具有促生作用的有机磷降解菌<sup>[8]</sup>。本研究通过对有机磷降解菌产生生长素(吲哚乙酸)能力、固氮能力、产 1-氨基羧酰-1-环丙烷羧酸(ACC)脱氨酶能力、产铁载体能力、对不同磷矿物质的溶解作用、解无机磷的能力、对病原菌拮抗能力和对种子萌发

收稿日期: 2023-09-22

基金项目: 内蒙古高校科研重点项目(编号: NJZZ22258)。

作者简介: 郑喜清(1979—), 女, 内蒙古扎赉特旗人, 硕士, 副教授, 从事植物病害综合防控。E-mail: 413703219@qq.com。

试验的影响进行测定,目的是筛选出具有高效促生特性的有机磷降解菌,降低化学肥料的使用量,提高作物品质,调节植物生长,提高农作物产量,为微生物肥料提供充足的菌种准备,从而促进微生物肥料的蓬勃发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验时间和地点

本试验于 2022 年在河套学院微生物实验室完成。

### 1.2 试验菌株

解磷细菌 P9、P33、P53 保存于河套学院农业微生物室内,分离于内蒙古巴彦淖尔市临河区周边农田土壤中,初步试验发现具有一定解磷能力。

### 1.3 供试番茄种子

番茄品种为精选的亚心 87-5,购于当地蔬菜种子市场。

### 1.4 供试培养基

活化培养基配方:3.0 g 牛肉膏,10.0 g 蛋白胨,5.0 g NaCl,1 000 mL 蒸馏水,pH 值 7.2~7.4。有机磷培养基配方:10.0 g 蔗糖,0.3 g NaCl,0.5 g  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,0.03 g  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,0.3 g NaCl,0.03 g  $\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,5.0 g  $\text{CaCO}_3$ ,0.3 g  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,1.0 g 卵磷脂,1.0 L 蒸馏水,18~20 g 琼脂,pH 值 7.2~7.4<sup>[9]</sup>。无机磷培养基配方:10.0 g 葡萄糖,5.0 g  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,0.25 g  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,0.2 g KCl,0.1 g  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,5.0 g  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ,20.0 g 琼脂(液体培养基不加),1 000 mL 蒸馏水,pH 值 6.8~7.0<sup>[10]</sup>。

King 培养基配方:20.0 g 蛋白胨,15 mL 甘油,1.5 g  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,1.5 g  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ,0.1 g 色氨酸,pH 值 7.2<sup>[11]</sup>。DF 培养基配方:2.0 g 葡萄糖,2.0 g 柠檬酸,2.0 g 葡糖酸,0.2 g  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,2.0 g  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,6.0 g  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ,4.0 g  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ,1 000 mL 蒸馏水<sup>[12]</sup>。ADF 培养基配方:将 DF 培养基中的  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  替换成 ACC。铬天青 S(CAS)培养基配方:1 mL 20% 蔗糖,2 mL 1 mmol/L  $\text{MgSO}_4$ ,3 mL 10% 酸水解酪素,100  $\mu\text{L}$  1 mmol/L  $\text{CaCl}_2$ ,5 mL 0.1 mol/L 磷酸盐缓冲液,5 mL CAS 染液,1.8 g 琼脂,100 mL 蒸馏水<sup>[13]</sup>。马铃薯葡萄糖培养基(PDA)配方:200.0 g 马铃薯(去皮),15 g 葡萄糖,20.0 g 琼脂,1 000 mL 蒸馏水,pH 值自然条件。

## 1.5 试验方法

1.5.1 解磷菌株种子液的制备 采用划线法将菌株接种在活化固体平板培养基上,37 ℃ 培养 48 h。再将菌株转接到液体培养基中,37 ℃ 摇床培养 48 h。将发酵液低温高速离心后用无菌水洗涤、重悬菌体,将  $D_{600\text{ nm}}$  调节为 1,即为种子液<sup>[14]</sup>。

1.5.2 供试菌株对不同磷源的溶解作用 配制有机磷培养基,并将磷矿物分别设为卵磷脂、磷酸三钙、磷酸铝、磷酸铁、植酸钙的 5 个变量配制培养基,于 28 ℃ 培养 5~6 d 后观察有机磷降解菌对含有不同磷矿物的有机磷培养基的溶解作用。

1.5.3 供试菌株产生长素能力的定量测定 将供试菌株菌落接种到 King 培养基中,30 ℃、2 000 r/min 摇床培养 24 h。取 3 mL 菌液,12 000 r/min 摇床培养 24 h,离心 15 min,取 1 mL 上清液加入 2 mL Salkowski's 反应液,混匀,放置于暗处反应 30 min 后,在紫外分光光度计上选择 530 nm 的波长,测吸光度<sup>[15]</sup>。

1.5.4 供试菌株产 ACC 脱氨酶能力的测定 在 DF 液体培养基中分别接种 3 株供试菌,避光培养,将低温离心的菌体转接于 ADF 液体培养基中,摇床培养 1 d,诱导脱氨酶活性,以无菌水作空白对照。测定  $D_{540\text{ nm}}$ ,计算  $\alpha$ -丁酮酸含量,1 min 形成 1  $\mu\text{mol}$   $\alpha$ -丁酮酸的活性即为 ACC 脱氨酶活性<sup>[16]</sup>。

1.5.5 供试菌株产铁载体能力的测定 挑取供试菌株的菌落接种在活化液体培养基中,摇床振荡培养,1 d 后将菌液点接于 CAS 平板上,静置培养 3 d,观察菌落周围是否出现橙色铁螯合圈,若产生晕圈,表明细菌能分泌铁载体<sup>[11]</sup>。

1.5.6 供试菌株固氮能力的测定 在固氮培养基上接种供试菌,设置对照、重复,30 ℃ 培养 7 d,出现菌落为阳性。

1.5.7 供试菌株产精氨酸脱羧酶的测定 反应系统体积为 1.5 mL,包括 Tris-HCl 缓冲液(pH 值 7.5)、0.3 mL 铬天青 S(ADC)提取液,于 37 ℃ 水浴中放置 2 min 后,加入精氨酸。37 ℃ 反应 60 min 后,加入 PCA(高氯酸),离心后取上清液加入 NaOH,混合后加入苯甲酰氯,反应 60 min 后,加入 2 mL 饱和 NaCl,混合后加入乙醚,搅匀充分反应,1 500 r/min 离心 5 min,收集 1 mL 醚相,于 50 ℃ 蒸发至干,再溶于 3 mL 重蒸甲醇中,用紫外分光光度计测定  $D_{254\text{ nm}}$ 。酶活性以  $\text{mol}(\text{Agm})/(\text{g} \cdot \text{h})$ (以鲜重计,下同)表示<sup>[16]</sup>。

1.5.8 供试菌株解无机磷能力的测定 将筛选的供试菌株点接到无机磷培养基上,设置 3 组重复,并放置在培养箱中,于 28 ℃ 培养 5 d 后,观测其透明溶磷圈的有无及其大小,根据溶磷圈直径衡量有机磷降解菌的解磷能力。

1.5.9 供试菌株对植物病原菌拮抗能力的测定 挑取供试菌分别点接在 PDA 平板边缘,将植物病原菌的菌饼放置在 PDA 平板中央,设置 3 组重复,30 ℃ 培养 3 ~ 5 d,观察是否有抑菌圈产生<sup>[17]</sup>。

1.5.10 供试菌株对番茄种子萌发的影响 准备规格相同的培养皿,将大小一致的滤纸分别铺在培养皿中,用无菌水喷洒浸湿,对番茄种子进行温汤浸种,将浸好的番茄种子放在喷湿的滤纸上,每皿放 100 粒番茄种子,再分别覆盖 1 层滤纸用无菌水喷湿,定期喷洒不同浓度菌液,设置重复、对照,连续

观察 7 d 种子萌发情况,并测定发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数<sup>[18]</sup>。

1.6 数据处理

试验数据用 Excel、SPSS 19.0 进行统计处理分析。

2 结果与分析

2.1 供试菌株对不同磷源的溶解情况

为了解菌株溶磷的特性,测定菌株 P33、P53、P9 对磷酸钙、磷酸铝、卵磷脂、磷酸铁和植酸钙的溶磷能力。由图 1 可知,供试菌株 P33、P53、P9 对磷酸三钙的溶解作用直径均为 1.40 cm,3 株菌株对磷酸三钙均具有溶解作用,效果都很明显,且作用效果相同。

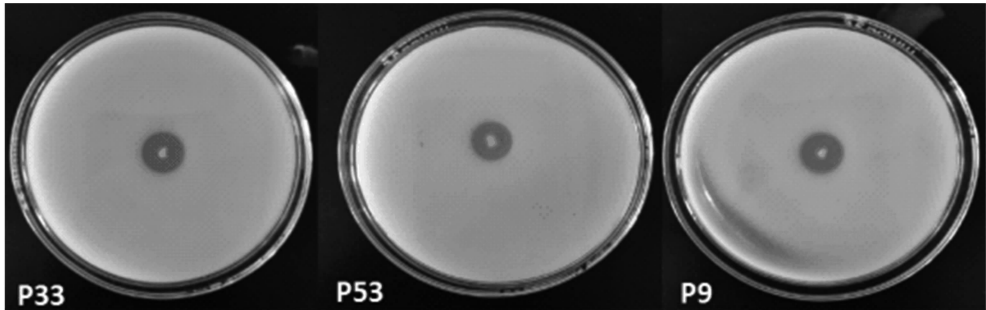


图1 供试菌株对磷酸三钙的溶解作用

由图 2 可知,供试菌株 P33、P53、P9 对磷酸铝的溶解作用直径分别为 1.60、1.50、1.40 cm,3 株菌株对磷酸铝均具有溶解作用,但 P33 菌株对磷酸铝

的溶解作用较强,其次为 P53 菌株,对磷酸铝的溶解作用较低的为 P9 菌株。

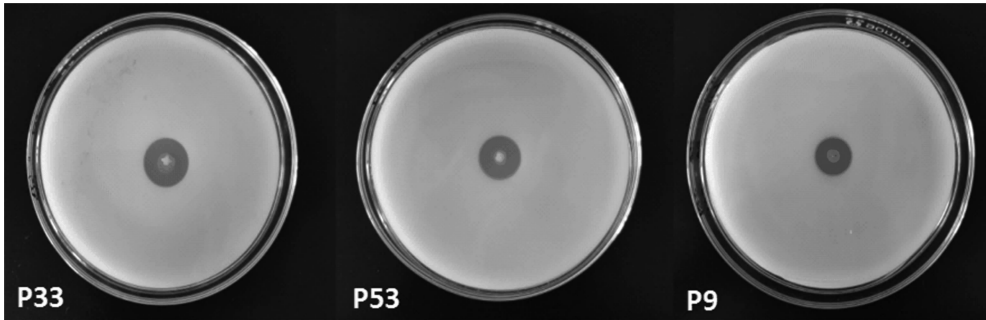


图2 供试菌株对磷酸铝的溶解作用

由图 3 可知,供试菌株 P33、P53、P9 对卵磷脂的溶解作用直径分别为 1.20、1.20、1.01 cm,3 株菌株对卵磷脂均具有溶解作用,但 P33 菌株、P53 菌株对磷酸铝的溶解作用较高且相同,其次为 P9 菌株。

由图 4 可知,供试菌株 P33、P53、P9 对卵磷脂的溶解作用直径分别为 0.6、0.5、0.6 cm,3 株菌株对磷酸铁均具有溶解作用,其中 P33 菌株、P9 菌株

对磷酸铝的溶解作用较强且相同,其次为 P53 菌株。

由图 5 可知,供试菌株 P33、P53、P9 对植酸钙的溶解作用直径分别为 0.5、0.5、0.4 cm,3 株菌株对磷酸铁均具有溶解作用,其中 P33 菌株、P53 菌株对植酸钙的溶解作用较高且相同,其次为 P9 菌株。

2.2 生长素 (IAA) 标准曲线

通过 3 组重复试验,得到供试菌株 P33、P53、P9

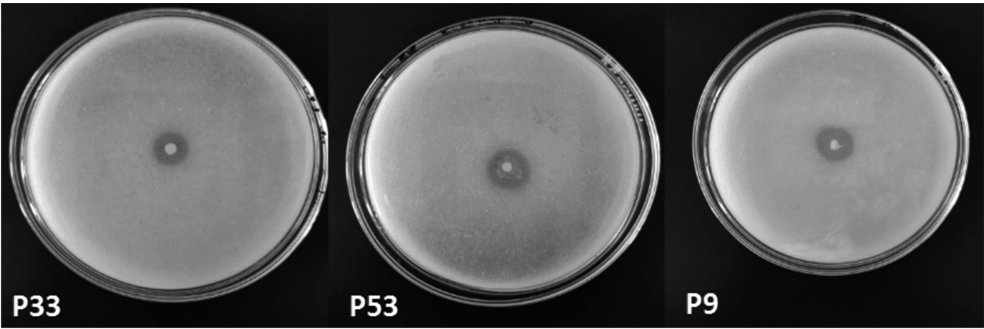


图3 供试菌株对卵磷脂的溶解作用

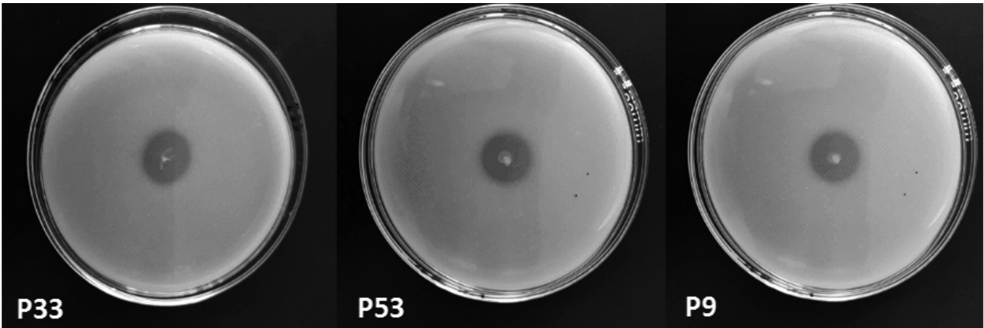


图4 供试菌株对磷酸铁的溶解作用

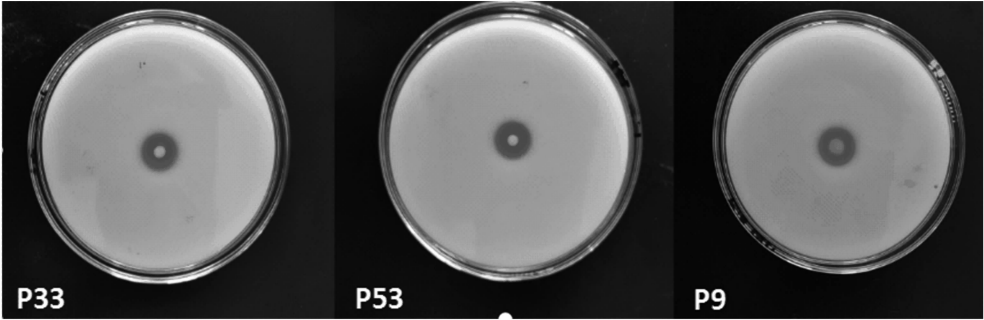


图5 供试菌株对植酸钙的溶解作用

的 3 组平均  $D_{530\text{ nm}}$ , 绘制了生长素标准曲线(图 6)。标准曲线方程: $y = 0.022\ 6x + 0.040\ 2$ , 式中: $x$  为生长素浓度,  $\text{mg/L}$ ;  $y$  为  $530\text{ nm}$  波长下的吸光度,  $r^2 = 0.992$ 。

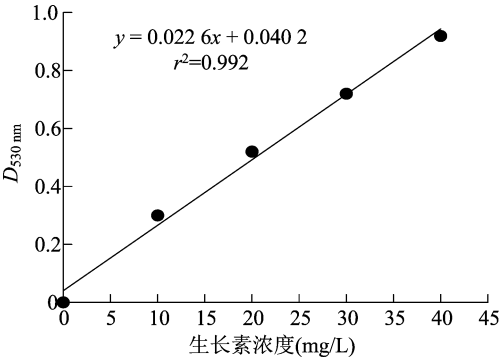


图6 生长素标准曲线

2.3 供试菌株产生长素能力的定量

用分光光度计对 3 株供试菌株分泌植物生长素的特性进行测定, 结果(表 1)表明, 供试的 3 个菌株均有一定的分泌生长素的能力, 分泌量为  $10.56 \sim 10.90\text{ mg/L}$ 。其中 P33 产生长素能力最强, 为  $10.90\text{ mg/L}$ , P9 产生长素能力最弱, 为  $10.56\text{ mg/L}$ 。

表 1 3 株供试菌株产生长素的能力

供试菌株	$D_{530\text{ nm}}$	生长素含量 ( $\text{mg/L}$ )
P33	0.278	10.90
P53	0.275	10.77
P9	0.271	10.56

2.4 供试菌株产 ACC 脱氨酶的能力

当植株处于胁迫条件下时, 能够产生 ACC 脱氨

酶的解磷菌,可以帮助植物应对逆境,进而促进植物生长。由表 2 可知,供试菌株 P33、P53、P9 均具有产 ACC 脱氨酶的能力,其  $\alpha$ -丁酮酸产量为 0.12 ~ 1.26 U/mg。产 ACC 脱氨酶能力最大的为供试菌株 P33(1.26 U/mg),其次为供试菌株 P53(1.12 U/mg),产 ACC 脱氨酶能力最弱的为供试菌株 P9,其  $\alpha$ -丁酮酸产量为 0.12 U/mg。

表 2 供试菌株产  $\alpha$ -丁酮酸的量

组别	$\alpha$ -丁酮酸的产量(U/mg)		
	P33	P53	P9
1	1.26	1.12	0.12
2	1.26	1.11	0.12
3	1.26	1.12	0.11
平均	1.26	1.12	0.12

2.5 供试菌株产铁载体能力

在 CAS 平板培养基上接种供试菌,培养后观察产铁载体能力,发现供试菌菌落周围均出现橘黄色

晕圈,说明供试菌株 P33、P53、P9 均具有产铁载体能力,其中 P33 的晕圈直径最大,在相同条件下,晕圈直径越大的菌株产生铁载体能力越强(表 3)。

表 3 供试菌株产铁载体能力

组别	晕圈直径(cm)		
	P33	P53	P9
1	0.42	0.39	0.24
2	0.42	0.38	0.24
3	0.40	0.38	0.26
平均	0.41	0.38	0.25

2.6 供试菌株的固氮能力

在固氮培养基上接种供试菌株,培养 5 d 后进行观察。由图 7 可知,3 株供试菌株在固氮培养基上均生长,菌落周边出现了透明圈,说明 3 株菌株均具有一定的固氮能力,其中供试菌株 P33 的固氮能力最好,菌落较大,直径为 0.17 cm;供试菌株 P53、P9 的固氮能力良好,菌落直径均为 0.15 cm。

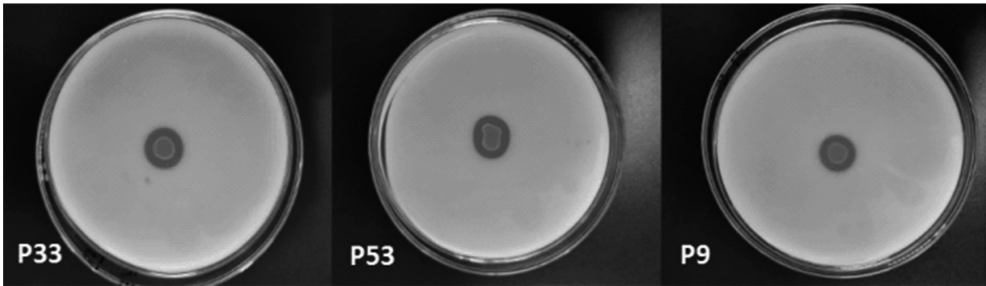


图 7 供试菌株的固氮能力

2.7 供试菌株产精氨酸脱羧酶的能力

由表 4 可知,供试菌株 P33、P53、P9 均具有产精氨酸脱羧酶的能力,其产量为 62.39 ~ 68.35 mol/(g·h)。其中,产精氨酸脱羧酶的能力最大的菌株为 P33,其次为 P53 菌株,产精氨酸脱羧酶能力最小的为 P9 菌株。

表 4 供试菌株产精氨酸脱羧酶能力测定

组别	产精氨酸脱羧酶能力[ mol/(g·h) ]		
	P33	P53	P9
1	68.37	65.53	62.47
2	68.34	65.49	62.36
3	68.35	65.50	62.35
平均	68.35	65.50	62.39

2.8 供试菌株解无机磷的能力

由图 8 可知,P33、P53、P9 菌株解无机磷能力作用的直径分别为 1.15、1.12、1.13 cm,其中 P33 解

无机磷能力较强,其次是 P9 菌株,而 P53 菌株解无机磷能力较弱。

2.9 供试菌株拮抗植物病原菌的能力

解磷菌具有一定的拮抗病原菌能力,通过测量供试菌株 P33、P53、P9 的抑菌圈直径和菌落直径比值,其值越大,表明有机磷降解效果越好。由图 9 可知,3 株菌株都具有拮抗荞麦立枯病的能力,P33 菌株拮抗荞麦立枯病的能力相对较强,D/d 值最大(1.55),其次为 P53 菌株(1.12),P9 菌株拮抗荞麦立枯病能力最弱(0.15)。

由图 10 可见,3 株菌株拮抗早疫病的能力都很明显,P33 菌株拮抗早疫病的能力相对较强,D/d 值最大(2.75),P53 菌株、P9 菌株拮抗早疫病的能力几乎相同(D/d=2.55)。

由图 11、图 12、图 13 可知,3 株菌株对 OF1、晚疫病、灰霉病不具有拮抗能力或拮抗能力不明显,菌株 D/d 值接近于 0。

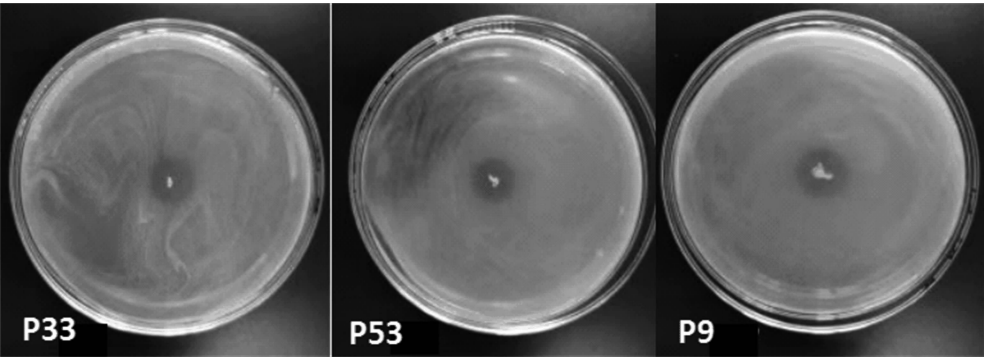


图8 供试菌株解无机磷的能力

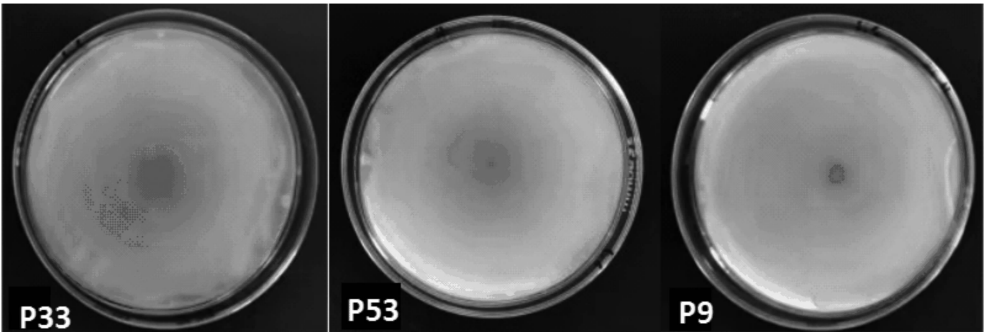


图9 供试菌株拮抗萎蔫立枯病的能力

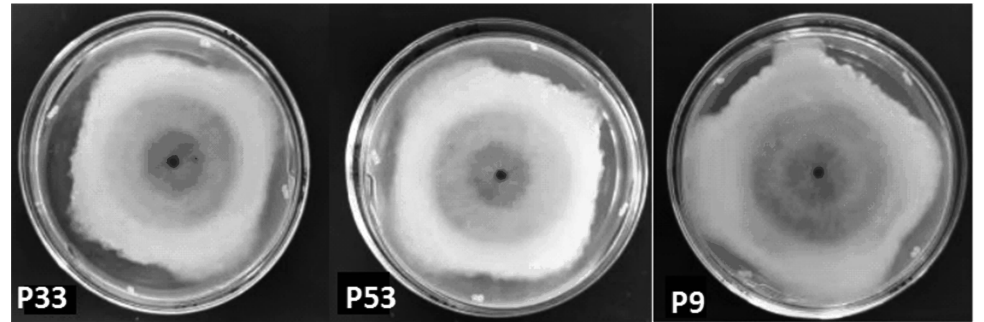


图10 供试菌株拮抗早疫病的能力

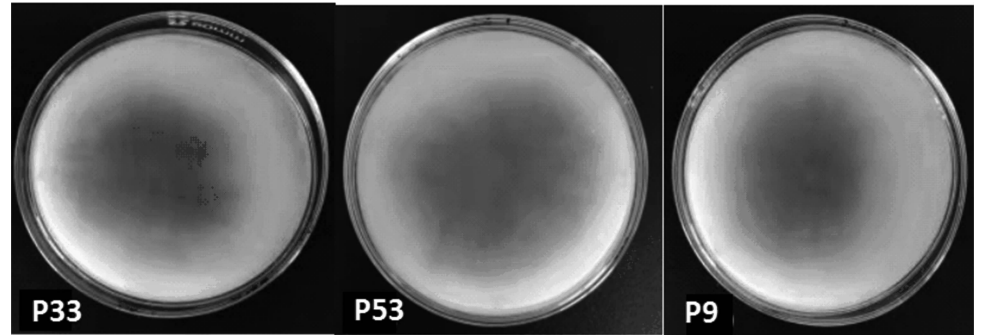


图11 供试菌株拮抗 OF1 的能力

2.10 供试菌株对种子萌发的影响

为了研究供试菌株 (P33、P53、P9) 是否具有促生作用,进行了番茄种子萌发试验。在试验中,供

试菌株 P33 的浓度越高,对番茄种子萌发的影响越大。当供试菌株 P33 浓度为 100% 时,发芽势比空白组高 13.00 百分点,发芽率比空白组高 10.00 百

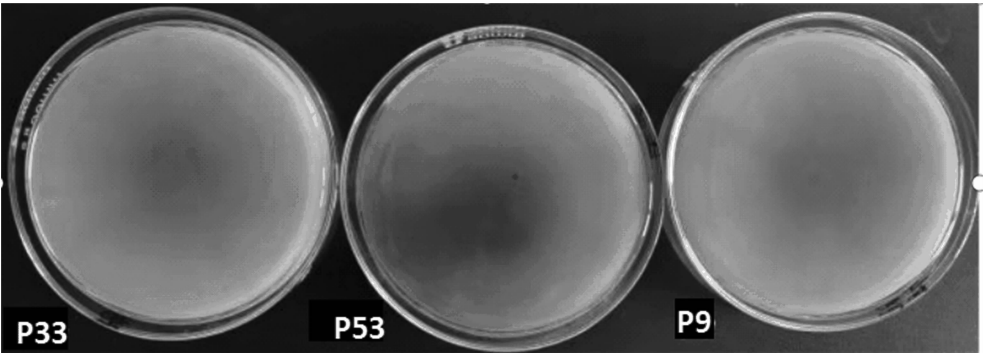


图12 供试菌株拮抗晚疫病的能力

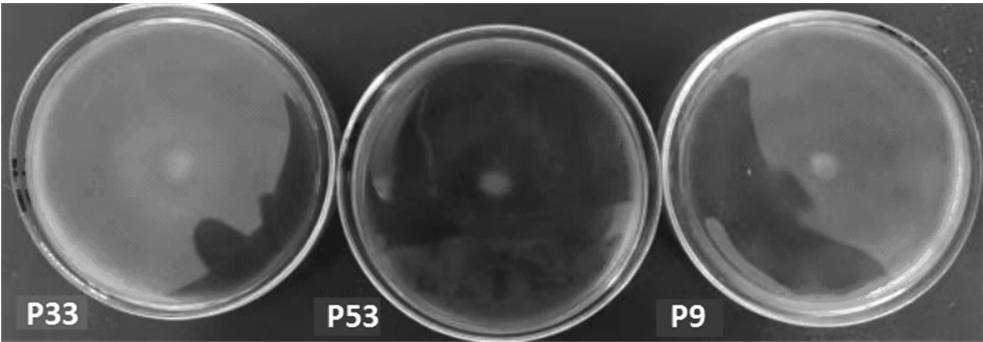


图13 供试菌株拮抗灰霉病的能力

分点,发芽指数比空白组高 2.18,活力指数比空白组高 0.71。供试菌株 P53 浓度为 100% 时,发芽势比空白组高 8.00 百分点,发芽率比空白组高 3.00 百分点,发芽指数比空白组高 0.76,活力指数比空白组高 0.05。供试菌株 P9 浓度为 100%,发芽势比空白组高 1.00 百分点,发芽率对比空白组高 1.00 百分点,发芽指数比空白组指数高 0.70,活力指数比空白组高 0.01。其中供试菌株 P33、P53、P9 浓度越高,对番茄种子的萌发越有影响,但供试菌株 P53、P9 的促生效果没有供试菌株 P33 明显(表 5),可见 P33 菌株浓度越高,对种子萌发的促进效应越明显。

3 结论与讨论

为了解决土壤磷利用率低的问题,传统农业大多采用施用化学磷肥的方法,然而,植物对磷肥当季利用率仅为 10% ~ 25%,大部分磷被铁、铝氧化物、氢氧化物吸附固定或通过淋溶方式进入环境,导致环境污染、资源浪费。因此,通过解磷微生物增加土壤中难溶性磷的利用,不仅可以提高肥力,而且对植物产量和品质有一定的改善<sup>[19]</sup>。

解磷微生物可以通过解磷作用提高作物对磷的吸收,也可以通过分泌一些代谢产物,提高作物生长速度。研究发现,解磷微生物提高植物对磷吸

表 5 供试菌株不同浓度对番茄种子萌发的影响

处理	发芽势 (%)	发芽率 (%)	发芽指数	活力指数
空白(水)	32	80	16.10	14.97
20% P33	15	28	7.16	6.25
40% P33	20	30	8.29	8.72
60% P33	25	40	9.71	10.96
80% P33	35	60	12.64	12.51
100% P33	45	90	18.28	15.68
20% P53	9	18	5.62	6.22
40% P53	14	28	6.56	8.71
60% P53	18	36	8.56	10.88
80% P53	28	48	10.21	12.40
100% P53	40	83	16.86	15.02
20% P9	9	18	5.26	6.20
40% P9	13	26	6.22	8.53
60% P9	17	34	8.21	10.46
80% P9	24	44	9.90	12.21
100% P9	33	81	16.80	14.98

收的有效性,是因为植物根系被解磷微生物分泌的代谢产物所刺激而不断伸长,从而促进了植物对磷的吸收<sup>[20]</sup>。

一些研究发现,解磷微生物具有分泌生长素、



赤霉素、铁载体、细胞分裂素和 ACC 脱氨酶等物质的能力,同时具有一定的固氮作用<sup>[21-22]</sup>。李蓉等筛选到 7 株具有产生生长素的功能有机磷降解菌<sup>[23]</sup>。徐爱芳等筛选到 13 株具有解磷能力、产生生长素能力和产铁载体功能的有机磷降解菌<sup>[24]</sup>。冀小草等从根际土壤中筛选的芽孢杆菌,具有分泌生长素、产嗜铁素和固氮作用,在较高盐浓度下可以良好生长,并具有促生的可能性<sup>[25]</sup>。Bhise 等从盐碱土中筛选出的阴沟肠杆菌,在盐胁迫下具有一定的解磷特性、ACC 脱氨酶活性,且可产吡啶乙酸、嗜铁素等其他促生物质的潜力<sup>[26]</sup>。能力测定的结果表明,本研究筛选到的 3 株有机磷降解菌 P33、P53、P9 均具有产生生长素能力、产脱氨酶能力、固氮能力、铁载体能力、解无机磷能力、溶解不同磷矿物能力、拮抗早疫病能力、拮抗茅麦立枯病能力。

在种子萌发试验中,与空白对照相比,P33 菌液浓度为 100% 时,可将番茄种子发芽势提高 13.00 百分点,发芽率提高 10.00 百分点,发芽指数提高 2.18,活力指数提高 0.71;P53 菌液浓度为 100% 时,可将番茄种子发芽势提高 8.00 百分点,发芽率提高 3.00 百分点,发芽指数提高 0.76,活力指数提高 0.05;P9 菌液浓度为 100% 时,可将番茄种子发芽势提高 1.00 百分点,发芽率提高 1.00 百分点,发芽指数提高 0.70,活力指数提高 0.01。种子萌发试验结果表明,菌株 P33、P53、P9 对番茄种子萌发均具有促生效果,其中菌株 P33 的效果最为明显,因此供试菌株 P33、P53、P9 在改良土壤、对植物促生及微生物肥料等方面具有一定的潜在价值。

#### 参考文献:

- [1] Alewell C, Ringeval B, Ballabio C, et al. Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 45–46.
- [2] 王誉瑶, 韦 中, 徐阳春, 等. 溶磷菌株组合的溶磷效应及对玉米生长的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 262–268.
- [3] 路 亚, 李晓亮, 于天一, 等. 持绿和早衰花生品种根系形态、叶片生理及产量对叶面喷施磷肥的响应 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(31): 532–540.
- [4] 李廷轩, 叶代桦, 张锡洲, 等. 植物对不同形态磷响应特征研究进展 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(6): 1536–1546.
- [5] 阳 洁, 江 院, 王晓甜, 等. 几株高效溶磷解钾药用稻内生固氮菌的筛选与鉴定 [J]. *农业生物技术学报*, 2016, 24(2): 186–195.
- [6] 刘英杰, 张丽红, 张 宏, 等. 溶磷微生物在土壤磷循环中的作用研究进展 [J]. *微生物学通报*, 2023, 50(8): 3671–3687.
- [7] 姜 瑛, 吴 越, 王国文, 等. 一株固氮解磷菌的筛选鉴定及其对花生的促生作用研究 [J]. *土壤*, 2019, 47(4): 698–703.
- [8] 王 欢, 王敬敬, 徐 松, 等. 有机磷降解菌的筛选及其促生特性 [J]. *微生物学报*, 2019, 57(5): 667–680.
- [9] 胡百文. 解磷菌的筛选及生态特性研究 [D]. 大连: 大连海洋大学, 2014: 16.
- [10] 刘晓婷, 姚 拓. 高寒草地耐低温植物根际促生菌的筛选鉴定及特性研究 [J]. *草业学报*, 2022, 31(8): 178–187.
- [11] 葛宜和, 陈丽娟, 王 磊, 等. *gacS* 基因插入失活对绿针假单胞菌 G-05 的两种胞外次生代谢物合成的影响 [J]. *微生物学报*, 2020, 48(12): 1595–1601.
- [12] 郑 鹏. ACC 脱氨酶根际促生菌的分离鉴定及其对干旱胁迫下玉米甜菜碱代谢的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018: 9–10.
- [13] 荣良燕, 姚 拓, 赵桂琴, 等. 产铁载体 PGPR 菌筛选及其对病原菌的拮抗作用 [J]. *植物保护*, 2021, 37(1): 59–64.
- [14] 魏喜喜, 杨智鹏, 马路婷, 等. 枣树根际解磷菌 P7 的溶磷特性 [J]. *经济林研究*, 2021, 39(3): 122–133.
- [15] 王 欢, 王敬敬, 徐 松, 等. 有机磷降解菌的筛选及其促生特性 [J]. *微生物学报*, 2019, 57(5): 667–680.
- [16] 赵福庚, 刘友良. 精氨酸脱羧酶和谷酰胺转移酶活性的测定方法 [J]. *植物生理学通讯*, 2020(5): 442–445.
- [17] 肖咪云, 孙孟龙, 阮楚晋, 等. 生防细菌 2016NX1 对病原真菌的抑制及发酵条件优化 [J]. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 37(2): 168–178.
- [18] 陈蕾太, 孙爱清, 杨 敏, 等. 逆境条件下小麦种子活力与种子萌发相关酶活性及其基因表达的关系 [J]. *应用生态学报*, 2020, 28(2): 609–619.
- [19] 李东坡, 武志杰. 化学肥料的土壤生态环境效应 [J]. *应用生态学报*, 2008(5): 1158–1165.
- [20] Khan M A, Asaf S, Khan A L, et al. Plant growth – promoting endophytic bacteria augment growth and salinity tolerance in rice plants [J]. *Plant Biology*, 2020, 22(5): 850–862.
- [21] Khan M A, Asaf S, Khan A L, et al. Thermotolerance effect of plant growth – promoting *Bacillus cereus* SAL on soybean during heat stress [J]. *BMC Microbiology*, 2020, 20(1): 175.
- [22] 方明棵, 罗心诚, 王 麒, 等. 菌剂浸种对大豆的促生增产作用及土壤理化特性与解磷菌群落组成的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(2): 190–198.
- [23] 李 蓉, 周德明, 吴 毅, 等. 杉木根际溶磷菌筛选及其部分特性的初步研究 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2022, 32(4): 95–99.
- [24] 徐爱芳, 武永秀, 刘 莹. 春兰根内生解有机磷细菌的筛选 [J]. *安徽农业科学*, 2018, 41(4): 1515–1516, 1529.
- [25] 冀小草, 钱兰华, 张 羽, 等. 互花米草根际耐盐促生菌的筛选及功能研究 [J]. *浙江农业科学*, 2021, 62(12): 2457–2461.
- [26] Bhise K K, Bhagwat P K, Dandge P B. Plant growth – promoting characteristics of salt tolerant enterobacter cloacae strain KBPD and its efficacy in amelioration of salt stress in *Vigna radiata* L. [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2016, 36(1): 1–12.