

何宏涛,王玉虎,周洪友,等. 番茄根际产生生长素菌株分离及其对番茄和马铃薯幼苗的促生作用[J]. 江苏农业科学,2022,50(19):219-225.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.19.033

番茄根际产生生长素菌株分离及其对番茄和马铃薯幼苗的促生作用

何宏涛¹,王玉虎¹,周洪友¹,刘颖²,赵明敏¹,郑红丽¹

(1. 内蒙古农业大学园艺与植物保护学院,内蒙古呼和浩特 010019; 2. 鄂尔多斯生态环境职业学院,内蒙古鄂尔多斯 017010)

摘要:采用 Salkowski 比色法测定了从阿须贝培养基中筛选的 64 株番茄根际细菌的生长素分泌特性。结果表明,64 株番茄根际细菌中有 7 株具有生长素分泌特性,占总数的 10.94%。同时,研究了 7 株生长素产生菌对磷的溶解作用,发现有 5 株具有溶解有机磷的特性,其中菌株 FQD47-2 对有机磷的可溶性指数最高,为 1.53,其他菌株均小于 1.5。采用根灌法研究了 7 株生长素产生菌对番茄和马铃薯幼苗的促生长作用。结果表明,菌株 FQD47-2 对番茄和马铃薯幼苗具有明显的促生长作用。接种菌株 FQD47-2 的番茄幼苗株高、地上部分及地下部分鲜质量分别增加了 16.87%、67.14% 和 29.58%;马铃薯幼苗地上部分和地下部分的鲜质量分别增加了 17.64% 和 15.26%,地上部分和地下部分的干质量分别增加了 12.71% 和 15.00%。对优势菌株 FQD47-2 的蛋白酶产量进行了测定,结果表明,菌株 FQD47-2 具有产蛋白酶特性。通过形态鉴定和生理生化鉴定并结合 16S rDNA 分子生物学鉴定分析,证明菌株 FQD47-2 为阿氏芽孢杆菌(*Bacillus aryabhattai*)。

关键词:番茄;根际促生菌;生长素;多功能菌;促生作用

中图分类号:S182;S144 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)19-0219-07

植物根际促生长细菌(PGPR)是存在于植物根际并促进植物生长的细菌。生物菌肥能促进土壤

养分的释放,改善土壤结构,肥沃土壤,在植物根部大量生长繁殖,成为优势菌,产生屏障效应,增强植物的抗病性和抗逆性。同时,这些细菌的一些代谢产物可以促进植物的生长发育。已有研究表明,一些微生物能产生生长素(IAA)和 1-氨基环丙烷-1-羧酸(ACC)脱氨酶,乙烯生物合成的前体是 ACC,ACC 可被 1-氨基环丙烷-1-羧酸脱氨酶降解,从而减少乙烯合成,在提高植物对非生物胁迫方面起到重要作用^[1]。生长素调控着植物生长发育

收稿日期:2021-11-03

基金项目:内蒙古农业大学高层次人才引进科研启动项目(编号:NDGCC2016-23);内蒙古自治区科技成果转化项目(编号:2019CG026);内蒙古自治区科技计划项目(编号:2019GG180)。

作者简介:何宏涛(1997—),男,山西大同人,硕士,主要从事植物内生固氮菌方面的研究。E-mail:627591293@qq.com。

通信作者:郑红丽,副教授,研究方向为植物病害生物防治研究。E-mail:zhlfey66@126.com。

library analyses[J]. The ISME Journal,2009,3(4):442-453.

[36] Lee S H, Ka J O, Cho J C. Members of the phylum Acidobacteria are dominant and metabolically active in rhizosphere soil[J]. FEMS Microbiology Letters,2008,285(2):263-269.

[37] 鲜文东,张潇樵,李文均. 绿弯菌的研究现状及展望[J]. 微生物学报,2020,60(9):1801-1820.

[38] 崔浩然. 黄河三角洲不同树种混交对土壤微生物群落组成及其功能特性的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2021.

[39] Aguirre-von-Wobeser E, Rocha-Estrada J, Shapiro L R, et al. Enrichment of Verrucomicrobia, Actinobacteria and Burkholderiales drives selection of bacterial community from soil by maize roots in a traditional milpa agroecosystem [J]. PLoS One, 2018, 13(12):e0208852.

[40] 李艳玲. 根际微生物群落对挥发性有机物和作物生长的影响[D]. 北京:中国农业科学院,2019.

[41] García-Fraile P, Benada O, Cajthaml T, et al. *Terracidiphilus gabretensis* gen. nov., sp. nov., an abundant and active forest soil *Acidobacterium* important in organic matter transformation [J]. Applied and Environmental Microbiology,2016,82(2):560-569.

[42] Guo L J, Zheng S X, Cao C G, et al. Tillage practices and straw-returning methods affect topsoil bacterial community and organic C under a rice-wheat cropping system in central China[J]. Scientific Reports,2016,6:33155.

[43] Stone B W, Li J H, Koch B J, et al. Nutrients cause consolidation of soil carbon flux to small proportion of bacterial community [J]. Nature Communications,2021,12:3381.

[44] Banerjee S, Kirkby C A, Schmutter D, et al. Network analysis reveals functional redundancy and keystone taxa amongst bacterial and fungal communities during organic matter decomposition in an arable soil[J]. Soil Biology and Biochemistry,2016,97:188-198.

的各个方面,可以促进植物生长发育,调节光合作用等^[2]。还有一类微生物可以将土壤中的难溶性磷分解,转化为植物可以吸收利用的可溶性磷^[3],即解磷菌。

细菌产生生长素功能于1979年首次被发现^[4],后出现大量的关于生长素产生菌的报道,已有研究中发现,有多个菌属具有产生生长素的特性^[5]。近年来,为了提高作物产量和品质,生产者在生产过程中大量使用化肥和农药,破坏土壤结构,降低土壤肥力,破坏生态环境。生物菌肥越来越受到人们的关注。植物根际促生菌对多种植物具有促生作用^[6-8]。刘涛等研究发现,从番茄组织及根际分离的细菌能促进番茄植株的生长^[9-10]。

本研究用不同培养基从番茄根际土壤中分离得到番茄优势细菌,从中筛选能高效分泌生长素、具有解磷作用、对番茄和马铃薯具有促生作用的细菌,以期为研制生物菌肥提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 土壤样品 土壤样品于2021年4月21日采自内蒙古自治区呼和浩特市贺新草莓园(40.663 199°N,111.775 257°E)的番茄大田。采用五点式取样法,将番茄植株整株拔起,轻轻抖动根际土壤,并用毛刷刷轻轻刷下根表土壤,装袋、标号,带回实验室进行菌株分离。

1.1.2 培养基配制 LB培养基、阿须贝培养基、蒙金娜无机磷培养基、有机磷卵磷脂培养基、Salkowski显色液、产蛋白酶培养基等的配制详情可见参考文献^[11-13]。

1.2 试验方法

1.2.1 根际土壤细菌的分离 根际土壤细菌的分离纯化^[14-15]:称取5g土样置于装有玻璃珠的三角瓶中,加入45mL水,在28℃160r/min条件下摇动30min,静置10min,得土悬液母液,分别稀释成 10^{-1} 、 10^{-2} 、 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} 、 10^{-6} 、 10^{-7} 倍液,选择 10^{-4} 、 10^{-5} 、 10^{-6} 、 10^{-7} 倍液,涂在LB培养基上,每盘50 μ L,每个梯度重复3次,根据外观、形态在28℃培养2~3d后,挑出具有明显特征的菌落,纯化并在LB培养基中培养,将分离得到的所有来自番茄土壤中的细菌置于50%甘油中,于-80℃储存备用。

用无菌牙签挑取平板菌落在阿须贝无氮培养

基上划线培养,28℃培养5d观察有无菌落生长。

1.2.2 番茄根际土壤产生生长素菌株的筛选 采用Salkowski比色法^[16],将纯化后的细菌接种于含有L-色氨酸(100mg/L)的LB液体培养基中,在摇床上以28℃、180r/min培养2d,取50 μ L菌液滴于96孔板上,并添加50 μ L Salkowski比色液。同时加入L-色氨酸培养基和无细菌比色液作为空白对照,加入含生长素的蒸馏水作为阳性对照,在黑暗中静置30min。变红的菌株是产生生长素的菌株。

对具有产生生长素功能的菌株进行定量测定。36h后,通过分光光度法测定上清液在450nm处的吸光度,并通过标准曲线确定上清液中生长素的含量。采用分析纯的生长素绘制标准曲线。

1.2.3 番茄根际土壤细菌溶磷能力测定 分别在无机磷和有机磷卵磷脂培养基中接种产生生长素的菌株。每株菌在28℃培养5d,观察菌株周围是否有1个透明的圆圈,以判断其是否具有解磷的能力。并测量透明环直径(D)和菌落的直径(d),并计算溶磷指数(D/d)。

1.2.4 产生生长素菌株对番茄和马铃薯幼苗的促生作用 IAA产生菌对番茄幼苗促生作用测定方法:挑选饱满的种子浸种30min,将滤纸片浸湿,放入干净的培养皿中,28℃放置1~2d,挑选出芽的种子进行播种。播种后1周,挑选生长均匀的植株采用灌根法^[17-18]接种产生生长素的7株菌(FQD13、FQD16、FQD32、FQD42、FQD47-2、FQD58-1、FQD59),每组处理6次重复,以清水处理为空白对照,不产生生长素的菌株4FQD6#为阴性对照。将菌株接种于LB培养基,28℃、180r/min振荡培养2d,进行灌根。每株番茄每10d灌菌液10mL,共3次。30d后观察番茄植株生长情况,分别测定其株高、地上部分干质量以及鲜质量,分析不同产生生长素菌株对番茄生长的影响。

IAA产生菌对马铃薯幼苗的促生作用测定方法:以产生生长素浓度高的菌株FQD47-2及FQD13为供试菌株,研究其对马铃薯幼苗的促生作用。马铃薯播种于基质土中,出苗后7d,挑选长势均匀的马铃薯采用灌根法接种菌液300mL(菌液制备与番茄促生研究方法一致),以清水处理为空白对照,LB培养基处理为阴性对照,每个处理6次重复,25d后测量不同处理组植株的各项指标。

1.2.5 菌株FQD47-2产蛋白酶能力的测定 挑取少许菌落接种于蛋白酶筛选培养基,28℃培养

1 d 观察能否产生透明圈。

1.2.6 菌株 FQD47-2 的形态观察及生理生化鉴定 参照《常见细菌系统鉴定手册》^[19] 及已鉴定完成的菌株^[20-21],对菌株进行生理生化鉴定,包括革兰氏染色、V—P 试验、柠檬酸盐利用试验、丙酸盐利用试验、D—木糖利用试验、L—阿拉伯糖利用试验、D—甘露醇利用试验、明胶液化、硝酸盐还原、淀粉水解等生理生化测定。

1.2.7 菌株 FQD47-2 的 16S rDNA 基因序列测定及系统发育树构建 细菌全基因组序列提取试剂盒提取细菌 DNA 后,采用细菌通用引物 7F-1540R 进行 PCR 扩增,反应体系 (25 μ L) 为: r-Taq 0.125 μ L、dNTP 2 μ L、10 \times buffer 2.5 μ L、引物各 1 μ L、DNA 模板 1 μ L、ddH₂O 补足,反应程序:98 $^{\circ}$ C 3 min,98 $^{\circ}$ C 10 s,52 $^{\circ}$ C 30 s,72 $^{\circ}$ C 1 min 40 s,34 个循环,72 $^{\circ}$ C 10 min。对 PCR 产物进行电泳检测后,送去北京六合华大基因科技有限公司测序后得到拼接序列,通过与 BLAST 数据库中的所有序列进行核苷酸同源性比较,用 MEGA 7.0 构建系统发育树。

1.2.8 数据处理 采用 SPSS 20.0 进行单因素方差分析 ($\alpha=0.05$),GraphPad Prism 8 对数据进行分析 and 作图。显著性差异采用不同字母表示。

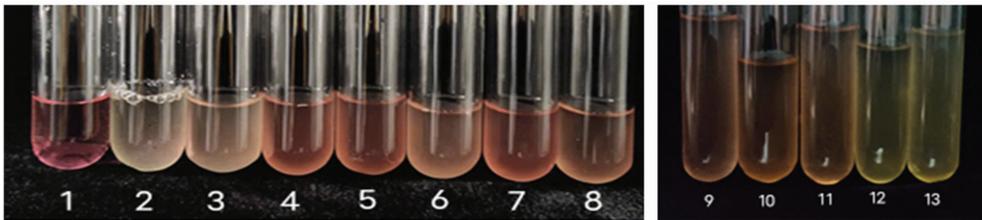
2 结果与分析

2.1 番茄根际细菌的分离

采用间接分离法从番茄品种金妃根际土壤中分离得到 79 株细菌。在无氮培养基中划线培养,64 株菌株能生长正常。

2.2 番茄根际细菌产生生长素研究

采用 Salkowski 比色法测定 64 株在阿须贝培养基上能正常生长的细菌分泌的生长素含量。结果表明,64 株细菌中有 7 株具有分泌生长素的能力,占总数的 10.9% (图 1)。由图 2 可知,不同菌株分泌的生长素含量不同。供试菌株产生生长素含量在 (2.55 \pm 0.08) ~ (15.64 \pm 0.14) μ g/mL 之间。菌株 FQD47-2 分泌生长素的能力最强,为 (15.64 \pm 0.14) μ g/mL; 菌株 FQD58-1 分泌生长素的能力最弱,为 (2.55 \pm 0.08) μ g/mL。



1—生长素溶液; 2—不产生生长素细菌的空白对照; 3—FQD58-1; 4—FQD47-2; 5—FQD13; 6—FQD42; 7—FQD59; 8—FQD16; 9、10、11—FQD32; 12、13—不产生生长素细菌的空白对照

图1 番茄根际细菌产生生长素定性测定结果

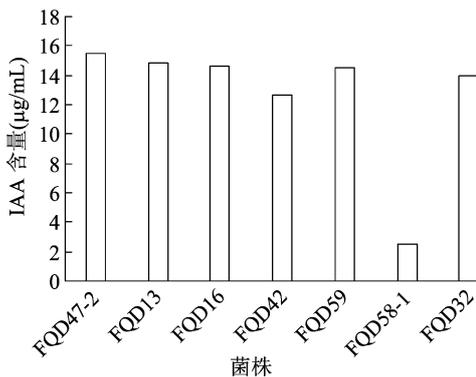


图2 菌株产生生长素含量测定结果

2.3 番茄根际菌株溶磷能力研究

为进一步研究番茄根际菌株的溶磷能力,将 7 株番茄根际细菌用牙签点接于有机磷及无机磷培养基上,观察有无透明圈产生。结果表明,7 株产生生长素菌株在无机磷培养基上均无透明圈产生,5 株菌株 (FQD47-2、FQD13、FQD42、FQD16、FQD59) 具有解有机磷能力 (图 3 和表 1)。

2.4 番茄根际细菌对番茄及马铃薯幼苗的促生作用

以分泌生长素的 7 株番茄根际细菌为供试菌



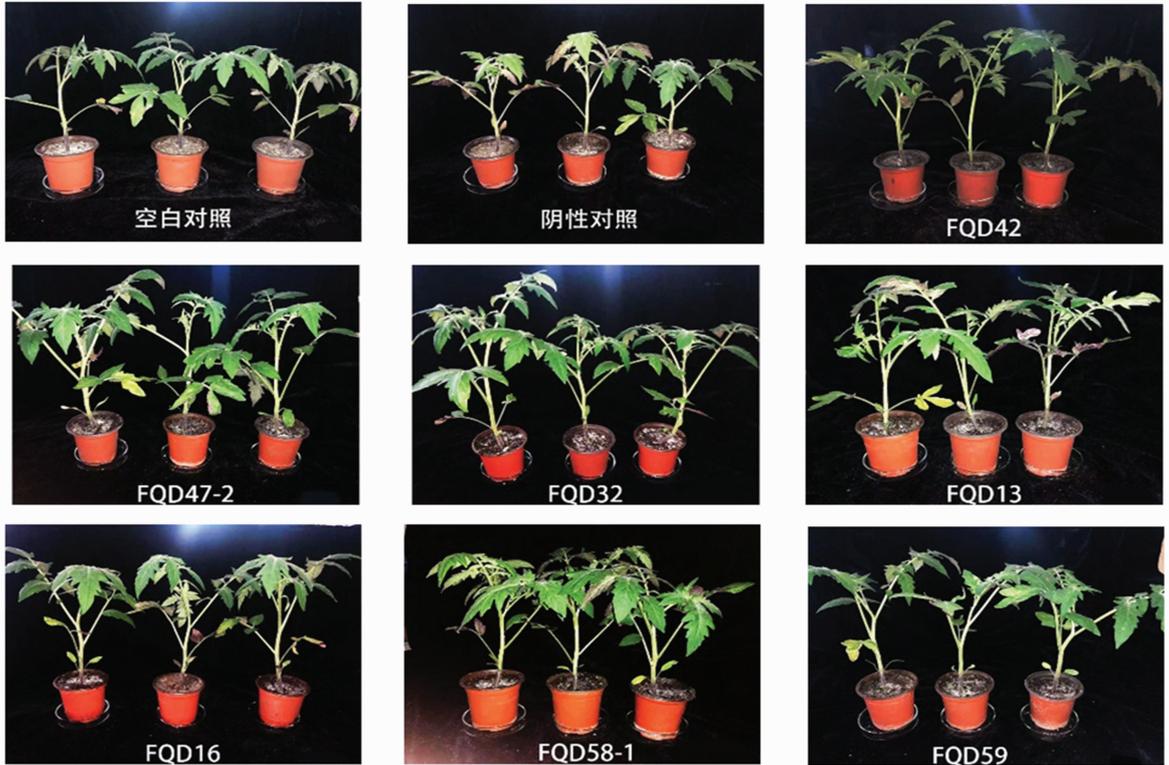
图3 番茄根际菌株溶解有机磷能力测定结果

表1 各菌株溶磷能力测定结果

菌株	溶磷圈直径 (cm)	菌落直径 (cm)	可溶性指数 (D/d)
FQD47-2	0.96 ± 0.03	0.63 ± 0.03	1.53 ± 0.07
FQD13	1.06 ± 0.03	0.86 ± 0.03	1.23 ± 0.09
FQD42	1.06 ± 0.03	0.80 ± 0.00	1.33 ± 0.41
FQD16	1.16 ± 0.03	0.86 ± 0.03	1.35 ± 0.08
FQD59	1.16 ± 0.03	0.83 ± 0.03	1.40 ± 0.09

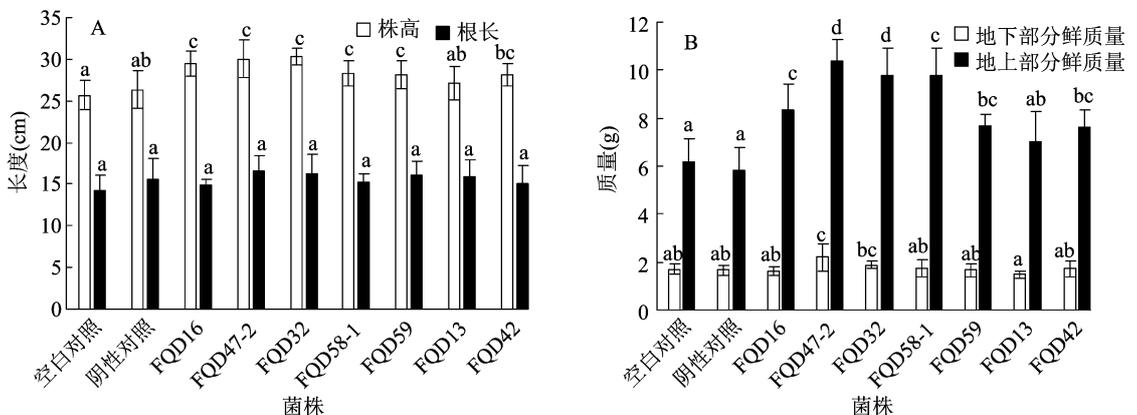
株,采用温室盆栽方式,研究其对番茄幼苗的促生作用。从图4和图5可以看出,供试菌株对番茄幼

苗有不同程度的促生作用。与空白对照相比,处理组 FQD16、FQD47-2、FQD32、FQD58-1、FQD59、FQD42 的番茄幼苗植株长势较好,显著高于空白对照 ($P < 0.05$),其增长率分别为 14.92%、16.87%、18.23%、10.05%、9.74%、9.39%。植株鲜质量统计结果表明,7株处理植株都高于对空白对照,地上部分鲜质量增幅最高的为 FQD47-2,达到了 67.14%,菌株 FQD32、FQD42 的增幅分别为 57.44%、23.00%,地下部分鲜质量仅有 FQD47-2 菌株显著高于空白对照,增幅为 29.58%。



空白对照为清水处理;阴性对照为不产生素菌株 4FQD6#

图4 番茄根际产生素细菌对番茄幼苗的促生作用



同种颜色柱上标有不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

图5 番茄根际产生素细菌处理后番茄幼苗株高、根长和鲜质量

以分泌生长素含量高的菌株 FQD47-2 和 FQD13 为供试菌株,采用温室盆栽灌根法研究其对马铃薯幼苗的促生作用。从图 6 和表 2 可以看出,与空白对照相比,FQD47-2 和 FQD13 菌株处理对马铃薯幼苗均具有促生作用,地上部分长度差异达到显著水平,分别增长了 21.26%、22.77%。地上部分及地下部分鲜质量结果表明,FQD47-2 和

FQD13 菌株处理均高于空白对照,地上部分鲜质量分别增加 17.64%、16.15%,地下部分鲜质量分别增加 15.26%、5.72%。地上、地下部分干质量统计结果表明,菌株 FQD47-2 处理马铃薯幼苗都高于空白对照组,地上部分干质量增加了 12.71%,地下部分干质量增加了 15.00%,菌株 FQD13 处理马铃薯幼苗干质量与对照相比没有明显变化。



图6 番茄根际产生素细菌对马铃薯幼苗的促生作用

表2 番茄根际产生素细菌对马铃薯幼苗的促生作用

处理	株高 (cm)	根长 (cm)	地上部分鲜质量 (g)	地下部分鲜质量 (g)	地上部分干质量 (g)	地下部分干质量 (g)
空白对照	16.56 ± 0.46b	25.08 ± 1.00a	19.44 ± 1.81a	8.91 ± 0.49a	1.81 ± 0.17a	0.60 ± 0.09a
阴性对照	13.46 ± 0.71a	24.33 ± 1.56a	17.23 ± 2.11a	7.50 ± 0.62a	1.73 ± 0.25a	0.65 ± 0.06a
FQD47-2	20.08 ± 1.14c	24.50 ± 1.28a	22.87 ± 1.97a	10.27 ± 0.96b	2.04 ± 0.25a	0.69 ± 0.50a
FQD13	20.33 ± 1.11c	24.00 ± 2.75a	22.58 ± 1.96a	9.42 ± 0.87a	1.79 ± 0.17a	0.61 ± 0.41a

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.5 菌株 FQD47-2 产蛋白酶能力测定

把菌株 FQD47-2 接种于蛋白酶筛选培养基上,结果显示,28℃培养 24 h 后有透明圈产生,证明菌株 FQD47-2 具有产蛋白酶能力(图 7)。

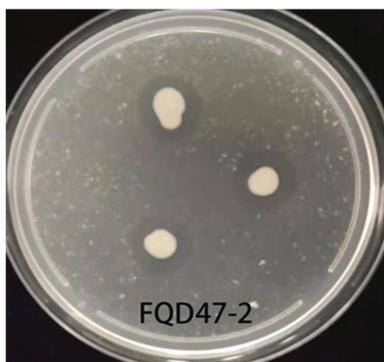


图7 菌株 FQD47-2 的产蛋白酶能力测定结果

2.6 菌株 FQD47-2 的形态特征及生理生化鉴定

菌株 FQD47-2 的菌落形态特征为表面光滑、湿润、乳白色、边缘整齐(图 8)。参照《常见细菌系统鉴定手册》及已鉴定完成的菌株,选取部分生理

生化指标对菌株 FQD47-2 进行测定,结果见表 3。



图8 菌株 FQD47-2 的菌落形态

表3 菌株 FQD47-2 的生理生化鉴定结果

检测项目	检测结果	检测项目	检测结果
V-P 试验	+	D-甘露醇糖利用试验	+
柠檬酸盐利用试验	+	明胶液化	+
丙酸盐利用试验	-	硝酸盐还原	+
D-木糖利用试验	+	L-阿拉伯糖利用试验	+
淀粉水解	+	革兰氏染色	+

注:“+”代表阳性,“-”代表阴性。

2.7 菌株 FQD47-2 的 16S rDNA 基因序列鉴定与系统发育树构建

为进一步明确菌株 FQD47-2 的分类地位,通过 7F 和 1540R 引物对其 16S rDNA 序列进行 PCR 扩增,获得的片段大小符合预期(图 9)。通过测序进行序列比对,构建系统发育树,发现菌株 FQD47-2 与阿氏芽孢杆菌(*Bacillus aryabhatai*)的亲缘关系较近并聚为一支(图 10),结合形态鉴定及生理生化鉴定结果,确定菌株 FQD47-2 是阿氏芽孢杆菌。

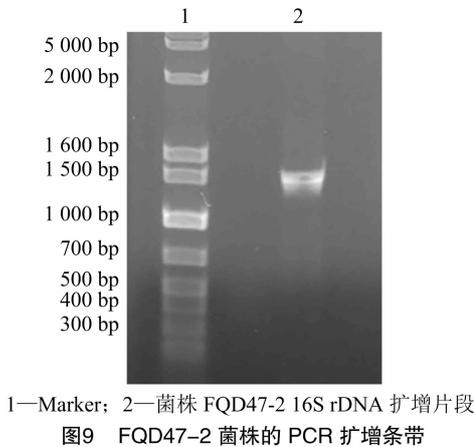


图9 FQD47-2 菌株的 PCR 扩增条带

3 结论与讨论

土壤微生物的丰度和种类反映了土壤状况的好坏,而自生固氮菌的数量可以反映土壤肥沃程度。氮素是植物生长发育必不可少的营养元素之一^[22],固氮菌能够产生固氮酶^[23],可以固定空气中的分子态氮,还原转化为植物可以吸收利用的形态,从而促进植物生长发育。促生菌种类有很多,根据其来源分为根际促生菌和植物内生促生菌,本试验通过选择性培养基,从番茄根际土壤中通过阿须贝培养基初步筛选得到 64 株细菌,已有研究表明,一种促生菌同时具有多种功能作用。陈阳从水稻根系分离得到 23 株内生固氮细菌,5 株扩增出 *nifH* 基因,平板筛选得到 1 株具有抑制多种病原菌活性的菌株^[24]。

现已有大量关于固氮菌的分离报道,研究表明,植物促生菌对植物的促生效用是多方面的^[25-27],如固氮、溶磷、分泌生长素。解磷菌是指能将植物难以吸收利用的磷转化为可吸收利用磷的土壤微生物。崔伟国等从马铃薯根际土壤及叶片

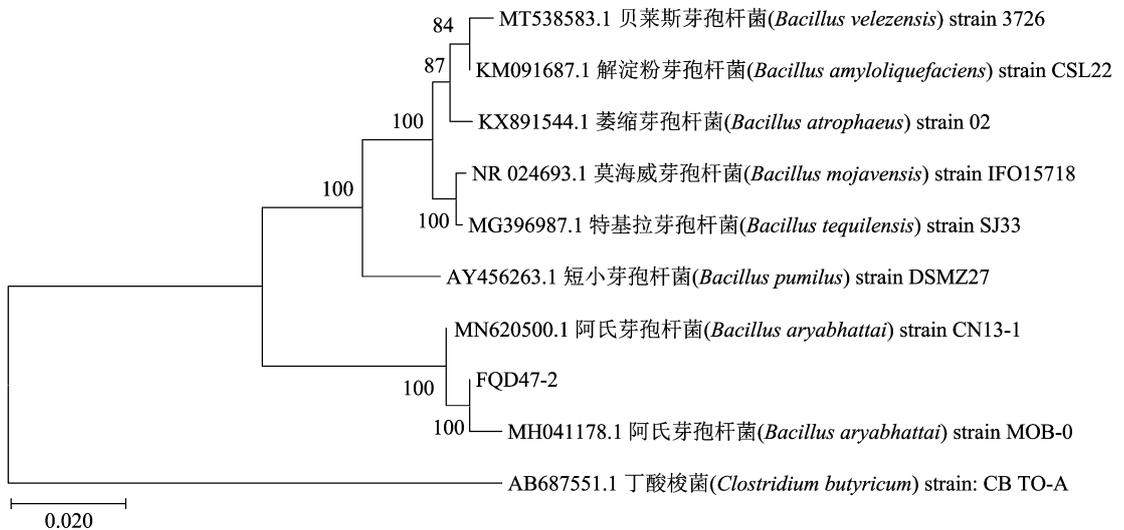


图10 基于 16S rDNA 序列构建的菌株 FQD47-2 的系统发育树

中分离得到 78 株细菌,采用 Salkowski 比色液显色法筛选得到 58 株产生生长素菌株,其分泌量在 0.80 ~ 40.2 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 之间^[28]。本研究从 64 株细菌中筛选得到 7 株分泌生长素的细菌,36 h 后分泌量在 (2.55 \pm 0.08) ~ (15.64 \pm 0.14) $\mu\text{g}/\text{mL}$ 之间,低于其他文献报道的菌株分泌量。7 株分泌生长素菌株中的 5 株具有降解有机磷的能力。根际促生菌分泌生长素能够促进植物生长发育,提高植物生物产

量。邢芳芳等从番茄根际土壤中分离得到 12 株产生生长素菌株,复筛得到 1 株高产生生长素菌株,通过发酵液盆栽灌根,结果表明,HB-1 处理组的叶绿素含量和叶片数均高于清水对照组,鲜质量和干质量均比空白对照增加,鲜质量增幅达 1.16% 和 13.55%,差异达到显著水平,干质量增幅达到 2.97% 和 14.92%^[29]。本试验通过盆栽灌根法研究菌株 FQD47-2 对番茄和马铃薯幼苗的促生效果,

结果表明,菌株 FQD47-2 对番茄和马铃薯的株高、根长、地下部分鲜质量和地上部分鲜质量具有显著的促生长作用。说明菌株 FQD47-2 具有良好的促生潜力,本试验结果可为生物肥料的研制提供参考。

参考文献:

- [1] Misra S, Chauhan P S. ACC deaminase - producing rhizosphere competent *Bacillus* spp. mitigate salt stress and promote *Zea mays* growth by modulating ethylene metabolism[J]. 3 Biotech, 2020, 10(3):119.
- [2] Mir A R, Siddiqui H, Alam P, et al. Foliar spray of Auxin/IAA modulates photosynthesis, elemental composition, ROS localization and antioxidant machinery to promote growth of *Brassica juncea*[J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2020, 26(12):2503-2520.
- [3] 张艺灿,刘凤之,王海波. 根际溶磷微生物促生机制研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2020(2):1-9.
- [4] Tien T M, Gaskins M H, Hubbell D H. Plant growth substances produced by *Azospirillum brasilense* and their effect on the growth of pearl millet (*Pennisetum americanum* L.) [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1979, 37(5):1016-1024.
- [5] Patten C L, Glick B R. Bacterial biosynthesis of indole-3-acetic acid[J]. Canadian Journal of Microbiology, 1996, 42(3):207-220.
- [6] Fan X H, Zhang S A, Mo X D, et al. Effects of plant growth - promoting rhizobacteria and N source on plant growth and N and P uptake by tomato grown on calcareous soils[J]. Pedosphere, 2017, 27(6):1027-1036.
- [7] 万兵兵,刘 晔,吴 越,等. 一株玉米根际多功能促生菌的筛选鉴定及效应研究[J]. 生物技术通报, 2016, 32(8):169-176.
- [8] Kesaulya H, Baharuddin, Zakaria B, et al. Isolation and physiological characterization of PGPR from potato plant rhizosphere in medium land of buru island[J]. Procedia Food Science, 2015, 3:190-199.
- [9] 刘 涛. 西宁地区番茄内生芽孢杆菌定殖规律及促生效应的研究[D]. 西宁:青海师范大学, 2010:55-65.
- [10] 贺字典,高玉峰,王 燕,等. 植物根际促生菌(PGPR)解磷菌的筛选及其对番茄促生作用的研究[J]. 西南农业学报, 2020, 33(12):2891-2896.
- [11] 林标声,汪丽芳,宋昭昭,等. 巨菌草根内生固氮菌 *Klebsiella variicola* 的分离、鉴定及培养条件的优化[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2019, 48(1):116-122.
- [12] 陈岩岩,叶项宇,常肖锐,等. 板栗根际高效解磷菌的筛选[J]. 经济林研究, 2021, 39(2):132-139.
- [13] 张 妮,张红岩,杨梦莹,等. 一株海洋来源高效产角蛋白酶菌株的筛选、鉴定及其酶学性质研究[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(18):98-104.
- [14] 张 鹏,刘 婷,苗莉云,等. 滇重楼茎组织内生细菌的分离、鉴定及促生菌筛选[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2021, 40(2):153-157.
- [15] 孙正祥,龙欣钰,孟祥佳,等. 枯草芽孢杆菌 YZU-S149 的分离鉴定及对西瓜枯萎病的生防作用[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2021, 18(4):114-120.
- [16] Gang S, Sharma S, Saraf M, et al. Analysis of indole-3-acetic acid (IAA) production in *Klebsiella* by LC-MS/MS and the salkowski method[J]. Bio-protocol, 2019, 9(9):e3230.
- [17] 漫 静,唐 波,邓 波,等. 羊草根际促生菌的分离筛选及促生作用研究[J]. 草业学报, 2021, 30(1):59-71.
- [18] 赵卫松,郭庆港,于稳欠,等. 解淀粉芽孢杆菌 PHODB35 的溶磷特性及其对番茄的促生作用[J]. 微生物学报, 2020, 60(7):1370-1383.
- [19] 东秀珠,蔡妙英. 常见细菌系统鉴定手册[M]. 北京:科学出版社, 2001.
- [20] 赵柏霞,刘浩强,孙丽娜,等. 甜樱桃根际 IAA 产生菌的筛选、鉴定及最佳产素条件优化[J]. 中国南方果树, 2017, 46(3):23-28.
- [21] 李培根,要雅倩,宋吉祥,等. 马铃薯根际产 IAA 芽孢杆菌的分离鉴定及促生效果研究[J]. 生物技术通报, 2020, 36(9):109-116.
- [22] Htwe A Z, Moh S M, Moe K, et al. Effects of co-inoculation of *Bradyrhizobium japonicum* SAY3-7 and *Streptomyces griseoflavus* P4 on plant growth, nodulation, nitrogen fixation, nutrient uptake, and yield of soybean in a field condition[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2018, 64(2):222-229.
- [23] Shinjo R, Tanaka A, Sugiura D, et al. Comprehensive analysis of the mechanisms underlying enhanced growth and root N acquisition in rice by the endophytic diazotroph, *Burkholderia vietnamiensis* RS1 [J]. Plant and Soil, 2020, 450(1/2):537-555.
- [24] 陈 阳. 水稻内生固氮菌的分离鉴定及菌株 BV6 抑真菌机制研究[D]. 南京:南京农业大学, 2019.
- [25] 陈 腊,米国华,李可可,等. 多功能植物根际促生菌对东北黑土区玉米的促生效果[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8):2759-2766.
- [26] 张 亮,盛 浩,谭 丽,等. 复合促生菌株筛选及其对油菜、黄瓜幼苗的促生效果[J]. 蔬菜, 2020(6):15-19.
- [27] 李德全,汪宝华,曹云英,等. 生防菌 NH-8 及其高效突变体诱导番茄抗性的比较[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(7):111-114.
- [28] 崔伟国,尹彦舒,张方博,等. 马铃薯细菌多样性解析及促生高产 IAA 菌株的筛选[J]. 中国土壤与肥料, 2020(1):223-231.
- [29] 邢芳芳,高明夫,胡兆平,等. 1 株高产 IAA 菌株的筛选、鉴定及对白菜的促生作用[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(10):458-460.