

高产 IAA 芽孢杆菌的筛选、鉴定及其对番茄的促生效应

赵蕊¹, 施雨希¹, 李文豪¹, 刘友军¹, 杨佩菁², 杨震³, 琚淑明¹

(1. 徐州工程学院环境工程学院 江苏徐州 221008; 2. 南京农业大学植物保护学院 南京 210095;
3. 中国农业科学院研究生院 北京 100081)

摘要: 本研究旨在筛选大樱桃根际高产吲哚-3-乙酸(IAA)芽孢杆菌, 明确其铁载体分泌、溶磷、解钾、固氮的促生特性及促生效应, 为后续微生物菌肥开发提供依据。采用分光光度法测定植物根际促生菌 IAA 产量; 采用形态学及 16S rRNA 序列分析法鉴定菌株, 并定性检测菌株溶磷、解钾、固氮等促生特性; 通过模式植物番茄种子发芽试验验证其对植物的促生作用。结果表明, 筛选获得 4 株高产 IAA 芽孢杆菌, 产量为 14.79~20.71 mg·L⁻¹, 经鉴定分别是贝莱斯芽孢杆菌(A81)、太平洋芽孢杆菌(E2)、花椒芽孢杆菌(S151)、白芽孢杆菌(R42); 所有菌株生长量在 0.61~0.77 cm 且均有产酸、铁载体分泌、溶有机磷、解钾和固氮能力。所有菌株对番茄幼苗均有显著的促生效应, 促生效果依次为 R42>S151>A81>E2, 其中 R42、S151 与不加菌液的 CK 相比, 株高分别显著增长 26.39% 和 20.00%, 根长分别显著增长 17.51% 和 16.61%。综上, 大樱桃根际定殖有高产 IAA 的多功能促生芽孢杆菌, 研究结果为功能菌肥的开发与应用提供了重要的菌种资源。

关键词: 番茄; 根际芽孢杆菌; 生长素; 促生效应

中图分类号: S641.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)12-171-07

Screening, identification, and growth-promoting effects on tomato of high-yield IAA-producing *Bacillus*

ZHAO Rui¹, SHI Yuxi¹, LI Wenhao¹, LIU Youjun¹, YANG Peijing², YANG Zhen³, JU Shuming¹

(1. College of Environmental Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu, China; 2. College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, Jiangsu, China; 3. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: To screen *Bacillus* strain with high Indole-3-acetic acid(IAA) production from the rhizosphere of sweet cherries, clarify their growth-promoting characteristics such as siderophore secretion, phosphate solubilization, potassium solubilization, and nitrogen fixation as well as their growth-promoting effects, so as to provide a basis for the subsequent development of microbial fertilizers for sweet cherry. Spectrophotometry was used to determine the IAA production of plant rhizosphere growth-promoting bacteria (PGPR). Strain identification was conducted through morphological and 16S rRNA sequence analysis. Qualitative detection was performed on the growth-promoting characteristics of the strains including phosphate solubilization, potassium solubilization, and nitrogen fixation. Through the germination experiment of the model plant, tomato, the growth-promoting effect of strains on plants was verified. The results showed that four high IAA-producing *Bacillus* strains were screened out, with IAA production ranging from 14.79 to 20.71 mg·L⁻¹. They were identified as *Bacillus velezensis* (A81), *Bacillus pacificus* (E2), *Bacillus zanthoxyli* (S151), and *Bacillus albus* (R42), respectively. The growth diameter of all strains ranged from 0.61 to 0.77 cm, and all had the abilities of acid production, siderophore secretion, organic phosphate solubilization, potassium solubilization, and nitrogen fixation. All strains had significant growth-promoting effects on tomato seedlings, with the growth-promoting effects in the order of R42>S151>A81>E2. Compared with the control (CK), R42 and S151 significantly increased the plant height by 26.39% and 20.00%, respectively, while their root length significantly increased by 17.51% and 16.61%, respectively. In conclusion, the rhizosphere of sweet cherry harbors multifunctional growth-promoting *Bacillus* with high IAA production, and the results of this study provide important bacterial resources for the development and application of functional microbial fertilizers.

Key words: Tomato; Rhizosphere bacillus; IAA; Growth-promoting effect

收稿日期: 2025-02-22; 修回日期: 2025-07-17

基金项目: 国家自然科学基金(32201477); 徐州市科技计划项目(重点农业)(KC21123); 国家大学生创新创业项目(xcx2023032, xcx2024163); 徐州工程学院大学生创新创业基金项目(202301)

作者简介: 赵蕊, 女, 在读本科生, 研究方向为环境微生物。E-mail: 547609149@qq.com

通信作者: 琚淑明, 女, 教授, 研究方向为环境微生物。E-mail: qusm2010@163.com

植物根际促生菌(PGPR)是指生活在根际土壤或依附于植物根系的一类有益微生物,能促进植株养分吸收及生长,抵御不良环境,提高植物适应性^[1-2]。PGPR通过产生吲哚-3-乙酸(IAA)等直接促生机制和产生铁载体等间接促生机制来促进植株生长^[3-4]。IAA能够促进植株的生长发育,同时,植株根系对IAA浓度的需求最为敏感^[5]。除植物自身产生的IAA能被利用外,菌株产生的IAA也能为植物所用,从而促进植株生长,提高植物对胁迫环境的响应能力^[5-6]。土壤中80%的根际细菌具有产生IAA的能力,如醋杆菌属(*Acetobacter*)、不动杆菌属(*Acinetobacter*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)等,其中,芽孢杆菌属PGPR的应用较为广泛^[4,7]。陈国杰^[8]研究表明,接种IAA产量为 $12.95\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的芽孢杆菌F菌的樱桃幼苗,与不施F菌的对照相比,显著提高了根系活力,影响了根系构型。因此,合理使用高产IAA的PGPR是促进植株生长的一种重要途径。

芽孢杆菌作为菌肥生产中的优势菌种,广泛存在于自然界中,在调节土壤微生态、促进植株生长等方面具有显著功效^[9]。戴美松等^[10]在2022年统计的菌肥登记商品中,芽孢杆菌属(*Bacillus*)的应用占比为13.7%,22个有效菌种应用率高达92.7%。Wei等^[11]研究表明,芽孢杆菌和微藻生物肥料的施用能提高丹参的品质和生物量,尤其是丹参的地下药用部分,同时根际微生物群落和土壤肥力也得到改善。

大樱桃(*Prunus avium* L.)为蔷薇科落叶果树,在碱性地区的栽培易因土壤质地限制根系发展并影响植株生长和生产^[12-13],也易因黄化病的大量发生致使树体生长势衰弱和死亡^[14]。然而,大樱桃PGPR的菌种资源的筛选与应用研究在国内外报道较少,因此,大樱桃根际IAA产生菌资源的挖掘及应用研究具有重要意义。鉴于此,笔者在本研究中对碱性土壤下大樱桃根际分离获得的164株细菌以生物量和IAA产量进行筛选,并对筛选出的4株优势高产IAA的促生芽孢杆菌A81、E2、R42和S151进行促生特性分析,通过种子发芽试验研究目的菌株对番茄的促生效应,以期研发微生物肥料提供菌种资源。

1 材料与方法

1.1 材料

供试菌株:2023年9月从徐州沛县大樱桃种植基地大樱桃美早/马哈利根际分离的164株菌株。种植基地为石灰质土壤,pH为8.32~8.64,其中Ca

含量(w,后同)为 $3\,276.13\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterium*, JD1):购买于广东环凯微生物科技有限公司,保藏号为FSCC11502232(AS1.217)。

番茄种子:白果强丰,购买于天津市津科力丰种苗有限公司。

TSB培养基:胰蛋白胨15 g,大豆蛋白胨5 g,氯化钠5 g,蒸馏水1000 mL;TSA培养基:在TSB液体培养基中添加 $20\text{ g}\cdot\text{1000 mL}^{-1}$ 琼脂。

1.2 方法

1.2.1 菌株产生生长素(IAA)能力测定 菌液培养,统一 $OD_{600}\approx 0.8$ 。菌液按2%接种量接种于含L-Trp($100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的TSB溶液中,对照为不接种菌液的TSB溶液,在 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下摇床培养48 h, $6500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心10 min,取上清液与Salkowski进行显色反应,3次重复,进行初筛,采用分光光度计测定 OD_{530} ,定量测定IAA含量^[15]。

1.2.2 宏观表征观察及菌株生长量测定 菌株于TSA固体培养基平板上划线分离单菌落。在 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下培养48 h,记录菌落宏观表征,参考《常见细菌系统鉴定手册》^[16-17],测定单菌落直径,每个菌株3次重复^[18]。

1.2.3 16S rRNA序列测定与系统发育分析 根据Babu等^[19]的方法进行序列测定,通过Blast检索,对基因组序列进行对比后将结果导入MEGA-X中构建系统进化树^[20]。

1.2.4 促生功能测定 菌液培养,调 $OD_{600}\approx 0.8$ 。溶磷、固氮、解钾能力测定:取 $5\text{ }\mu\text{L}$ 菌液分别点接到阿须贝无氮培养基^[21]、PKO培养基^[22]、蒙金娜培养基^[22]和解钾筛选培养基^[23]上,3次重复, $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 培养4~7 d,观察菌落周围是否有透明圈生成,若有则说明菌株依次具有固氮、溶解无机磷、溶解有机磷、解钾能力。利用十字交叉法测量并计算可溶性指数大小(可溶性指数 $D/d=\text{水解圈直径}D/\text{菌落直径}d$)^[23]。

菌株发酵对菌液pH调节测定:菌液按2%接种量接种至TSB液体培养基,对照为不接种菌液的TSB液体培养基,3次重复,在 $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $170\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下振荡培养24 h,采用pH仪测定菌液pH^[24]。

产铁载体功能测定:接种2%菌液于MKB液体培养基^[1],对照为不接种菌液的MKB液体培养基,3次重复。 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 培养48 h后,在 $8000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下离心10 min,获得上清液。将上清液与CAS溶液^[15]等比例混合,在室温下静置2 h后使用分光光度计测定 OD_{630} ,铁载体浓度按照公式 $SU/\%=(Ar-As)/Ar\times 100$ 计算,其中As为待测液的

OD_{630} , Ar 为蒸馏水与 CAS 溶液等比例混合物的 OD_{630} ^[1]。

1.2.5 根际芽孢杆菌促生试验 采用完全随机单因素试验,共设置 6 个处理,以不加菌液为对照(CK),以 5 个不同菌株菌液为处理。选成熟饱满的番茄种子,用 10% NaClO 溶液浸泡 5 min 以作消毒处理,无菌水洗净。菌液处理:将消毒后的种子放置在待测菌菌悬液($OD_{600} \approx 0.8$, TSB 培养基)中浸泡 6 h,对照为不加菌液的 TSB 液体培养基,然后将种子置于含无菌滤纸的玻璃瓶中,利用人工气候箱培养,每瓶 10 粒,各处理 3 次重复,发芽条件为 28 °C/22 °C,16 h/8 h(光照/黑暗),光照强度为 3300 lx,湿度为 40%,7 d 后统计番茄幼苗的株高、根长及其地上、地下部分干鲜质量^[1,25]。

1.3 数据分析

采用 SPSS 26.0 进行数据分析,采用 Microsoft Excel 2021 绘制图表,采用 MEGA-X 构建系统发育树。

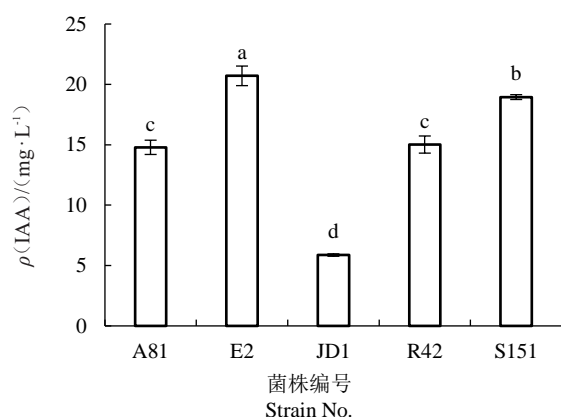
2 结果与分析

2.1 高产 IAA 根际芽孢杆菌筛选

对大樱桃根际分离获得的 164 个菌株进行显色反应,初筛获得 54 株产 IAA 菌株,采用分光光度法定量测定,获得 4 株高产 IAA 的芽孢杆菌菌株,产量为 14.79~20.71 mg·L⁻¹(图 1),其中,菌株 E2、S151 的产量显著高于其他菌株。JD1 为巨大芽孢杆菌,在菌肥中有良好且广泛的应用,因此选为对照菌株。5 株芽孢杆菌 48 h 菌落直径为 0.61~0.77 cm,依次为 JD1<A81<S151<R42<E2(图 2),菌株 E2、R42、S151 的生长量无显著差异,但均显著高于菌株 A81 和 JD1。

2.2 宏观表征观察及 16S rRNA 基因序列相似性与系统发育分析

目的菌株的表型特征存在差异(表 1),单菌落颜色及表面特征差异较大,形状为圆形或不规则,边缘整齐或不规则,透明度为不透明或半透明。通过基因测序进行 Nucleotide BLAST 比对和系统发育树分析(图 3),菌株 A81 与 *Bacillus velezensis* strain CR-502(GenBank 登录号: OQ876683.1)同源性为 100%,鉴定为贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*);菌株 E2 与 *Bacillus pacificus* strain MCCC 1A06182(GenBank 登录号: KJ812450.2)同源性为 99.93%,鉴定为太平洋芽孢杆菌(*Bacillus pacificus*);菌株 S151 与 *Bacillus zanthoxyli* strain



注:不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

图 1 不同菌株的 IAA 产量

Fig. 1 IAA production of different strains

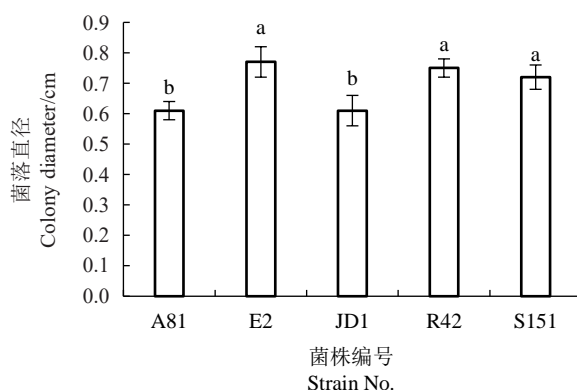


图 2 不同菌株 48 h 的菌落直径

Fig. 2 Colony diameter of 48 h of different strains

1433(GenBank 登录号: OQ876680.1)同源性为 99.38%,鉴定为花椒芽孢杆菌(*Bacillus zanthoxyli*);菌株 R42 与 *Bacillus albus* strain N35-10-2(GenBank 登录号: OQ876685.1)同源性为 99.86%,鉴定为白芽孢杆菌(*Bacillus albus*)。

2.3 产 IAA 根际促生细菌的其他促生特性

由表 2 可知,5 株芽孢杆菌均具有解钾、溶有机磷、固氮能力,仅 JD1 具有溶无机磷能力;其中 A81、JD1、S151 溶有机磷和解钾能力较强,D/d 在 0.4~0.6 之间。所有菌株均有产酸能力,其中 A81、JD1、R42、E2 的产酸能力均显著高于菌株 S151 及对照,pH 分别为 6.62、6.62、6.63、6.69。

5 株芽孢杆菌均可产铁载体(图 4),铁载体活性单位在 23.23%~52.57%之间,依次为 R42<JD1<S151<E2<A81。其中,菌株 A81 铁载体分泌能力显著高于其他菌株,菌株 R42 与 JD1 无显著差异。

表 1 菌株表型特征
Table 1 Colony morphologies of strains

菌株 Strain	形状 Shape	颜色 Color	边缘 Edge	表面 Surface	透明度 Transparency
A81	不规则 Irregular	淡黄色 Light yellow	不规则 Irregular	有褶皱,部分平滑 Folded, partially smooth	不透明 Opaque
E2	圆形 Round	白色 White	整齐 Neat	平滑 Smooth	不透明 Opaque
JD1	圆形 Round	淡黄色 Light yellow	隆起、整齐 Raised, neat	稍微有褶皱 Slightly folded	不透明 Opaque
R42	圆形 Round	乳白色 Milky white	整齐 Neat	平滑湿润 Smooth and moist	不透明 Opaque
S151	圆形 Round	乳白色 Milky white	整齐 Neat	平滑 Smooth	半透明 Translucent

表 2 菌株特性
Table 2 Strain characteristics

菌株 Strain	pH	有机磷溶解 指数 Organic phosphorus solubility index	无机磷溶解 指数 Inorganic phosphorus solubility index	固氮指数 Nitrogen fixing solubility index	解钾指数 Potassium solubility index
CK	8.05±0.02 a				
A81	6.62±0.03 c	+++		+	++
E2	6.69±0.03 c	+++		++	+
JD1	6.62±0.03 c	+++	+	+	+++
R42	6.63±0.04 c	+		++	+
S151	6.80±0.12 b	+++		++	++

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。溶磷、解钾、固氮特征指数:“+”按 D/d 的比值范围(0.0~1.0),以 0.2 为一个间隔,每增加 0.2 增加 1 个“+”。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference between different treatments ($P<0.05$). The same below. Characteristic index for phosphorus solubilization, potassium solubilization, and nitrogen fixation: “+” is assigned based on the range of D/d ratio(0.0-1.0), with an interval of 0.2. One “+” is added for every 0.2 increase in the ratio.

生效果明显。其中,R42、S151、A81 处理的番茄地上部分促生效果较好,株高较 CK 分别显著提高 26.39%、20.00%、18.33%,菌株 S151 和 A81 无显著差异且均显著低于 R42。R42、S151、A81 的地上部分鲜质量无显著差异,较 CK 分别显著提高 35.63%、35.46%、32.21%;R42 菌株的地上部分干质量显著高于菌株 S151 和 A81,三者较 CK 分别显著提高 493.33%、336.67%、306.67%。

接种菌株 R42、S151、JD1 对番茄的地下部分促生效果较好,根长与 CK 相比分别显著提高了 17.51%、16.61%、11.91%;地下鲜质量和干质量与

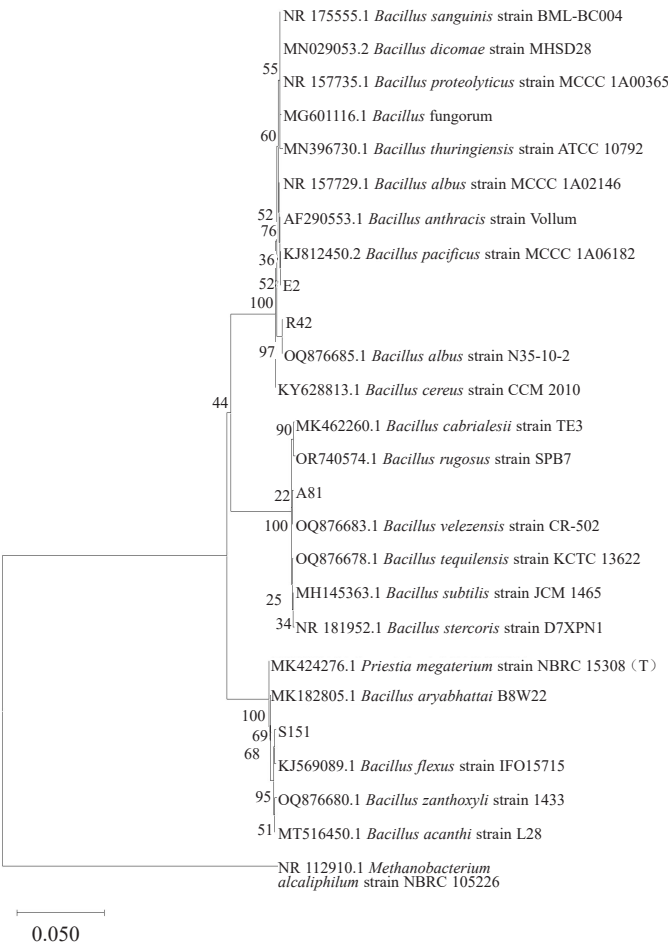


图 3 菌株 A81、E2、S151 和 R42 基于 16S rRNA 基因序列构建的系统发育树
Fig. 3 Phylogenetic tree constructed based on 16S rRNA gene sequences of strains A81, E2, S151 and R42

2.4 根际芽孢杆菌对番茄种子发芽的影响

由表 3 和图 5 可知,5 个菌株处理的番茄幼苗株高、根长、地上和地下部分干鲜质量与 CK 相比均呈显著差异(菌株 JD1 的地上部分鲜质量除外),促

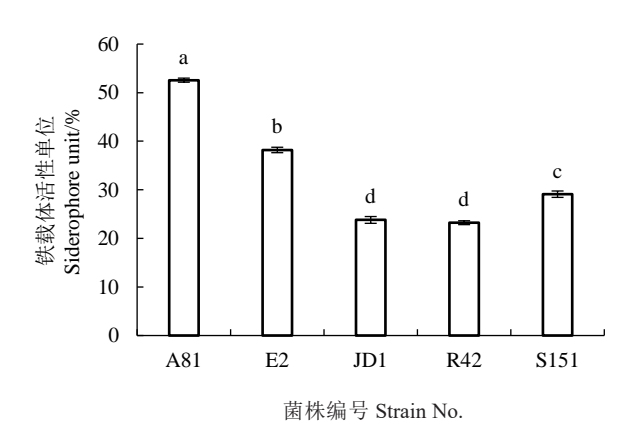


图 4 菌株分泌铁载体定量检测

Fig. 4 The quantitative test of siderophore produced by strains

CK 相比分别显著提高了 319.26%、313.46%、206.50%和 355.56%、305.56%、238.89%。以上数据表明,菌株 R42 和 S151 对番茄幼苗的促生效果较好,优于生产上的常用菌株 JD1。

3 讨论与结论

PGPR 在改土、促生方面发挥着重要作用,IAA 分泌、固氮、解磷及抗病是 PGPR 的直接或间接促生机制,也是其筛选及开发应用的重要依据^[10, 26], IAA 作为生长素,在微量条件下能显著促进植物生长。研究表明,植物根际微生物中能分泌 IAA 的菌株占 80%^[7],且微生物分泌的 IAA 能为植物所利用,促进植物生长^[6],芽孢杆菌常作为植物促生防病菌

表 3 根际细菌对番茄幼苗生长的影响						
Table 3 Effects of PGPB on the growth of tomato seedlings						
菌株 Strain	株高 Plant height/cm	根长 Root length/cm	鲜质量 Fresh mass/g		干质量 Dry mass/g	
			地上部分 Aboveground parts	地下部分 Underground parts	地上部分 Aboveground parts	地下部分 Underground parts
CK	3.60±0.19 e	5.54±0.50 d	0.172 6±0.053 9 b	0.043 1±0.000 9 d	0.003 0±0.000 3 d	0.001 8±0.000 3 e
A81	4.26±0.21 b	5.81±0.24 c	0.228 2±0.003 5 a	0.072 0±0.002 1 c	0.012 2±0.003 3 b	0.004 0±0.000 3 d
E2	4.01±0.16 c	5.93±0.32 c	0.216 4±0.000 5 a	0.073 6±0.000 9 c	0.010 3±0.001 5 bc	0.004 1±0.000 4 d
JD1	3.88±0.13 d	6.20±0.37 b	0.204 9±0.014 0 ab	0.132 1±0.000 7 b	0.008 7±0.000 5 c	0.006 1±0.000 6 c
R42	4.55±0.18 a	6.51±0.33 a	0.234 1±0.007 6 a	0.180 7±0.000 9 a	0.017 8±0.000 9 a	0.008 2±0.000 3 a
S151	4.32±0.18 b	6.46±0.31 ab	0.233 8±0.017 3 a	0.178 2±0.000 9 ab	0.013 1±0.002 6 b	0.007 3±0.000 6 b



图 5 根际细菌对番茄幼苗生长的影响

Fig. 5 Effects of PGPR on the growth of tomato seedlings

研究并在实际生产中广泛应用^[10],国内筛选出的大樱桃根际促生芽孢杆菌有蜡样芽孢杆菌(*Bacillus cereus*)、阿氏芽孢杆菌(*Bacillus aryabhattai*)、钻特省芽孢杆菌(*Bacillus drentensis*)和巨大芽胞杆菌(*Bacillus megaterium*)等^[27-29]。笔者自大樱桃根际筛选出的菌株近 83%都有产 IAA 能力,其中 4 株为高产 IAA 的优势促生菌,IAA 产量为 14.79~20.71 mg·L⁻¹,依次为 E2> S151> R42> A81,经鉴定

分别为贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*)、太平洋芽孢杆菌(*Bacillus pacificus*)、花椒芽孢杆菌(*Bacillus zanthoxyli*)、白芽孢杆菌(*Bacillus albus*),这些芽孢杆菌属在国外已报道的促生菌中均有发现^[30-33],均为本试验首次从大樱桃根际分离并检测到具高产 IAA 能力的菌株。赵柏霞等^[27]对砂蜜豆/马哈利樱桃根际产 IAA 细菌进行了筛选,结果表明,芽孢杆菌属(*Bacilus*)为最优势菌属,与本研究

结果相似。

笔者对筛选出的4株大樱桃根际高产IAA芽孢杆菌及JD1的促生效果进行研究,并对其IAA分泌能力进行测定。番茄作为模式植物,是果实相关研究的理想材料,笔者通过番茄浸种试验初步检测目的菌株的促生作用。结果表明,5株菌株均表现出对番茄根长、株高、苗鲜质量、苗干质量的显著提升效果,刘静洋^[34]筛选出29株IAA产量为0.15~26.87 mg·L⁻¹的PGPR,对棉花具有一定的促生作用,IAA产量范围与本研究相似。笔者在本研究发现接种5株PGPR后,番茄根系构型差异较大,除菌株IAA产量影响外,这一现象可能与PGPR对根系呼吸的影响不同有关^[35],根系的呼吸作用是构成植物地下部代谢的中心^[29]。同时,PGPR存在不影响甚至抑制根系生长的效应,种子发芽试验中接种A81和E2对番茄根系较JD1促生作用弱,这可能与番茄对PGPR的选择差异性 or 植物种类有关^[36]。在本研究中,菌株S151和R42对番茄整体的促生效果较好,可能与该PGPR生长量和IAA产量较高、固氮能力较强有关。由于IAA产生与不同PGPR的促生长活性呈正相关^[37],使菌株S151和R42在接种期间保持了良好的促生活性。而种子发芽试验中,空气是最大的氮贮存库和来源,固氮菌可将氮气转化为植物可直接利用的无机氮化合物。此外,IAA水平与固氮能力呈正相关,固氮菌也会产生相关植物激素来刺激根系结构,从而提高植物吸收养分和水分的整体能力^[38-39]。本研究IAA产量较低的菌株JD1在种子发芽试验中对番茄地下部分具有一定的促生效果,可能与IAA的浓度依赖性有关,植物根系对IAA浓度需求最为敏感,细菌分泌的IAA在低浓度下会刺激植物初生根的伸长^[40-41],也可能与植物内源IAA水平有关,这对确定细菌产生的IAA抑制或刺激植物生长十分重要^[42]。本研究中不同菌株的促生效果与IAA分泌能力排序不一致,说明除IAA外,还有多种因素会影响植物生长,这与黄臣等^[1]的研究结果相似。

PGPR促进植物生长的前提是要成功定殖于宿主植物根际,PGPR的定殖受其IAA产量和根系分泌物、根系伸长速率、含水量、含氧量等生物与非生物因素的影响^[43],这可能解释了本研究部分处理中植物根系促生效果存在差异的原因,即多种外界因素共同影响根际菌竞争能力的发挥。因此,PGPR根系定殖情况对促生效应的影响还需进一步验证。

综上所述,笔者筛选的4株根际芽孢杆菌为高

产IAA促生菌,产IAA能力依次是E2>S151>R42>A81,生长量依次是E2>R42>S151>A81,铁载体分泌能力依次是A81>E2>S151>R42;所有菌株均有产酸、溶有机磷、解钾和固氮能力。所有菌株对番茄幼苗的促生效应均显著高于对照,其中菌株S151(*Bacillus zanthoxyli*)和R42(*Bacillus albus*)的促生效果优于生产上的常用菌株JD1。研究结果不仅为丰富菌种资源提供了理论基础和科学依据,而且对生物改良制剂的研发具有重要意义。

参考文献

- [1] 黄臣,韩玲娟,梁银萍,等.达乌里胡枝子四株耐盐碱根际促生菌的鉴定及其促生作用[J].草地学报,2023,31(4):1036-1047.
- [2] 薛璐,杨倩,郭慧,等.黄瓜耐盐根际促生菌的筛选及评价[J].中国瓜菜,2021,34(9):26-32.
- [3] GAVANDE S S, MAURYA A, SHARMA S. Isolation and characterization of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) from rhizosphere of major crops grown in Marathwada region of Maharashtra India[J]. Vegetos, 2024, 37(2): 637-648.
- [4] 马凯,杨凡,段亚魁,等.植物根际促生菌在瓜菜工厂化育苗中的应用技术研究进展[J].中国瓜菜,2019,32(1):1-5.
- [5] GLICK B R. Plant growth-promoting bacteria: Mechanisms and applications[J]. Scientifica (Cairo), 2012, 2012: 963401.
- [6] 崔筱,孔维丽.生长素IAA对食用菌生长发育影响的研究进展[J].中国瓜菜,2024,37(8):8-14.
- [7] 徐科玉.高产吡啶乙酸微生物菌株的筛选、发酵及其促生效果[D].石家庄:河北科技大学,2022.
- [8] 陈国杰.根际促生菌对樱桃幼苗的促生效果研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2024.
- [9] 史慧芳,张鹏,王亚文,等.微生物菌肥对果树的应用研究综述[J].现代园艺,2024,47(7):50-54.
- [10] 戴美松,王月志,蔡丹英,等.我国微生物菌肥登记现状及其在果树减肥增效中的应用[J].浙江农业科学,2021,62(2):241-246.
- [11] WEI X M, BAI X J, CAO P, et al. *Bacillus* and microalgae bio-fertilizers improved quality and biomass of *Salvia miltiorrhiza* by altering microbial communities[J]. Chinese Herbal Medicines, 2022, 15(1): 45-46.
- [12] 侯东梅,戴桂林,聂国伟.大樱桃栽植对土壤的选择[J].山西果树,2017(5):26-27.
- [13] KEHRI H K, KHARE V, AKHTAR O, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi; potential inoculants for cultivation of aromatic plant *Vetiveria zizanioides* in alkaline soil[J]. Journal of the Indian Botanical Society, 2016, 95(1/2): 125-134.
- [14] ZHU Z Y, JU S M, LI P G, et al. Study on the synergistic effects of siderophore bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi on the improvement of iron nutrition in *Cinnamomum camphor*[J]. Journal of Plant Nutrition, 2024, 48(5): 773-785.
- [15] 李俊,彭启超,张志鹏,等.一株热带芽孢杆菌的分离鉴定及促生作用研究[J].中国土壤与肥料,2024(2):193-200.
- [16] MILOSZ R, LIDIA K, GOHAR K, et al. Biodegradable silver

- nanoparticles gel and its impact on tomato seed germination rate *in vitro* cultures[J]. Applied Sciences, 2022, 12(5): 2722.
- [17] 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.
- [18] 刘叶高, 陈新淇. 一株野生茶树菇菌株鉴定及菌丝生物学特性初探[J]. 食用菌, 2024, 46(2): 18-21.
- [19] BABU P M, PANDA N Y, NAYAK R K, et al. Isolation, characterization and screening of phosphate (P) solubilizing actinomycetes and exploring its potency in finger millet (*Eleusine coracana* L.) [J]. BMC Plant Biology, 2025, 25(1): 362.
- [20] GOUD M S, SHARMA S K, KHARBIKAR L L, et al. *Bacillus* species consortium with tryptophan-dependent and -independent pathways mediated production of IAA and its derivatives modulates soil biological properties, growth and yield of wheat[J]. Plant Soil, 2024, 508(1): 71-97.
- [21] LI Z L, LIU S, WANG Y Y, et al. Screening and identification of 5 salt alkali tolerant and growth promoting bacteria and their promoting effects on adzuki bean[J]. Microbiology Bulletin, 2021, 48(5): 1580-1592.
- [22] 田宏, 李凤霞, 张德昱, 等. 草坪草溶磷菌筛选及溶磷能力的初步研究[J]. 草业科学, 2005(10): 92-96.
- [23] 陈腊, 李可可, 米国华, 等. 解钾促生菌的筛选鉴定及对东北黑土区玉米的促生效应[J]. 微生物学通报, 2021, 48(5): 1560-1570.
- [24] 唐倩, 刘斌杰. 碳、氮营养对2株茶菌核心菌株生长和产酸的影响[J]. 现代食品, 2023, 29(21): 218-224.
- [25] FENG Y X, WANG T, LIU L T. An efficient clearing protocol for the study of seed development in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) [J]. Journal of Visualized Experiments: JoVE, 2022, 7(187): e64445.
- [26] 杨倩, 薛璐, 郭慧, 等. 植物根际促生菌防治黄瓜枯萎病的研究进展[J]. 中国瓜菜, 2022, 35(1): 1-8.
- [27] 赵柏霞, 闫建芳, 夏国芳, 等. 马哈利樱桃根际产吡啶乙酸细菌多样性及产素能力研究[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(20): 169-172.
- [28] 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.
- [29] 吕德国, 杨丹丹, 秦嗣军, 等. 根际促生细菌混合接种对甜樱桃/东北山樱根际微生物区系及根系呼吸的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2012, 34(5): 531-535.
- [30] RAJKUMAR M, NARAYANASAMY S, UTHANDI S. A root-associated *Bacillus albus* LRS2 and its metabolites for plant growth promotion and drought stress tolerance in little millet (*Panicum sumatrense* L.) [J]. Plant Stress, 2024, 12: 100446.
- [31] 骆恒斌, 马肖静, 韩亚伟, 等. 贝莱斯芽孢杆菌 BV-HR6-1 对甜瓜生长及生理特性的影响[J]. 中国瓜菜, 2025, 38(5): 132-140.
- [32] KABIRAJ A, HALDER U, PANJA A S, et al. Detailed genomic and biochemical characterization and plant growth promoting properties of an arsenic-tolerant isolate of *Bacillus pacificus* from contaminated groundwater of West Bengal, India[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2023, 52: 102825.
- [33] USMONOV A, YOO S J, KIM S T, et al. The *Bacillus zanthoxyli* HS1 strain renders vegetable plants resistant and tolerant against pathogen infection and high salinity stress[J]. The Plant Pathology Journal, 2021, 37(1): 72-78.
- [34] 刘静洋. 棉花根际促生菌株促生生理活性的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2013.
- [35] 陶泽, 佟兆庆, 秦嗣军. 樱桃根际产吡啶乙酸促生菌的分离、鉴定及功能特性[J]. 微生物学报, 2025, 65(1): 122-135.
- [36] 陈伟立, 李娟, 朱红惠, 等. 根际微生物调控植物根系构型研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(17): 5285-5297.
- [37] IGIEHON N O, BABALOLA O O. Below-ground-above-ground plant-microbial Interactions: Focusing on soybean, rhizobacteria and mycorrhizal fungi[J]. Open Microbiology Journal, 2018, 12(1): 261-279.
- [38] ROMANYA J, CASALS P. Biological nitrogen fixation response to soil fertility is species-dependent in annual legumes[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2022, 20(2): 546-556.
- [39] ORTIZ- CASTRO R, CONTRERAS- CORNEJO H A, MACIAS- RODRIGUEZ L, et al. The role of microbial signals in plant growth and development[J]. Plant Signaling and Behavior, 2009, 4(8): 701-712.
- [40] 杨扬, 高克祥, 吴岩, 等. 吡啶乙酸跨界信号调节植物与细菌互作[J]. 生物技术通报, 2016, 32(8): 14-21.
- [41] 穆文强, 康慎敏, 李平兰. 根际促生菌对植物的生长促进作用及机制研究进展[J]. 生命科学, 2022, 34(2): 118-127.
- [42] PILET P E, SAUGY M. Effect on root growth of endogenous and applied IAA and ABA[J]. Plant Physiology, 1987, 83: 33-38.
- [43] FIGUEREDO E F, CRUZ T A, ALMEIDA J R et al. The key role of indole-3-acetic acid biosynthesis by *Bacillus thuringiensis* RZ2MS9 in promoting maize growth revealed by the ipdC gene knockout mediated by the CRISPR-Cas9 system[J]. Microbiological Research, 2023, 226: 127218.