

# 甜瓜种子内生菌多样性及其促生功能分析

孙蓓蓓<sup>1</sup>, 周宇<sup>2</sup>, 王丽君<sup>1</sup>, 轩正英<sup>3</sup>

(1. 塔里木大学分析测试中心 新疆阿拉尔 843300; 2. 塔里木大学水利与建筑工程学院 新疆阿拉尔 843300;  
3. 塔里木大学园艺与林学院 新疆阿拉尔 843300)

**摘要:** 为了鉴定甜瓜种子内生菌并验证其促生功能, 以甜瓜种子为试验材料, 采用稀释涂布平板法从甜瓜种子中分离内生菌, 通过细菌 16S rRNA 基因测序结果分析甜瓜种子内生菌的多样性; 使用多种促生培养基, 鉴定甜瓜种子内生菌溶磷、固氮、解钾、产 IAA、产铁载体和分解纤维素功能。结果表明, 从甜瓜种子中分离获得 39 株细菌, 细菌分属于 3 个属(芽孢杆菌属 *Bacillus*、埃希氏菌属 *Escherichia*、志贺氏菌属 *Shigella*) 7 个种, 其中优势菌属为芽孢杆菌属(*Bacillus*); 7 个种内生菌均具有固氮和产 IAA 的功能, 其中分属于 *Bacillus*、*Escherichia* 的 5 种内生菌具有产铁载体能力。综上, 甜瓜种子内生菌物种丰富, 且分离获得的内生菌均具有促生功能。本研究结果揭示了甜瓜种子内生菌的多样性, 为研发环保型生物促生菌剂提供了种质资源。

**关键词:** 甜瓜种子; 内生菌; 多样性; 植物促生

**中图分类号:** S652 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-2871(2026)01-109-07

## Analysis of endophytic bacteria diversity and growth-promoting functions in melon (*Cucumis melo* L.) seeds

SUN Beibei<sup>1</sup>, ZHOU Yu<sup>2</sup>, WANG Lijun<sup>1</sup>, XUAN Zhengying<sup>3</sup>

(1. Instrumental Analysis Center, Tarim University, Alar 843300, Xinjiang, China; 2. College of Hydraulic and Architectural Engineering, Tarim University, Alar 843300, Xinjiang, China; 3. College of Horticulture and Forestry, Tarim University, Alar 843300, Xinjiang, China)

**Abstract:** To identify endophytes in melon (*Cucumis melo* L.) seeds and verify their plant growth-promoting functions, melon seeds were used as the experimental materials. Endophytes were isolated using the dilution plating method, and their diversity was analyzed based on 16S rRNA gene sequencing. The isolated endophytes were evaluated for their abilities in phosphate solubilization, nitrogen fixation, potassium solubilization, production of indole-3-acetic acid (IAA), siderophore production, and cellulose decomposition using various growth-promoting media. The results showed that 39 bacterial strains were successfully isolated from the melon seeds, belonging to 7 species across 3 genera (*Bacillus*, *Escherichia*, *Shigella*), with *Bacillus* being the dominant genus. All species exhibited nitrogen fixation and IAA production capabilities, while 5 species belonging to the *Bacillus* and *Escherichia* genera demonstrated siderophores production. In conclusion, the melon seeds harbored diverse endophytes, and all endophytes possess growth-promoting functions. This study reveals the diversity of endophyte in melon seeds and provides valuable germplasm resources for the development of environmentally friendly biofertilizers.

**Key words:** Melon seeds; Endophytes; Diversity; Plant growth promotion

植物内生菌指在其生活史的一定阶段或所有阶段定殖于健康植物组织内部或细胞间隙, 而宿主植物没有表现出明显病害症状的微生物, 包括内生细菌、真菌和放线菌等<sup>[1]</sup>。宿主植物在胁迫环境下, 内生菌对其适应和生存有重要贡献, 可以促进植物

中重要次级代谢产物的产生与分泌, 在食品、医药、农业领域具有潜在应用价值, 内生菌与宿主植物在长期演化进程中形成互利共生的关系<sup>[2-3]</sup>。很多研究揭示了内生菌可以促进植物生长, 如产生植物激素吲哚-3-乙酸 (IAA)、产生 1-氨基环丙烷-1-羧酸

收稿日期: 2025-05-14; 修回日期: 2025-06-23

基金项目: 兵团指导性科技计划项目(2022ZD115); 塔里木大学校长基金一般项目(TDZKYB202203)

作者简介: 孙蓓蓓, 女, 实验师, 主要从事微生物资源及其次生代谢产物研究。E-mail: beibeisun0410@163.com

通信作者: 轩正英, 女, 教授, 研究方向为蔬菜种质资源。E-mail: xzyzky@163.com

(ACC)、产生挥发性有机物质、分泌铁载体、固氮、溶磷、促进养分吸收、增强对生物胁迫[诱导系统抗性(IS)、抑制病原真菌]和非生物胁迫(农药、温度、干旱、盐碱和金属)的抵抗力<sup>[4]</sup>。农业生产中为保证产量,经常喷施化学农药和施用化学肥料,这些农药和化肥会引起植物病原菌的耐药性、土壤板结以及地下水污染等环境问题<sup>[5-6]</sup>。研究发现,许多植物内生菌具有促进植物生长、减少病虫害等作用,从而可以降低化学肥料和农药带来的负面影响,提供一种环境友好的生产方案,在改善环境健康和提高农作物产量等方面展现出巨大潜力<sup>[7-8]</sup>。特别是种子内生菌,作为植物生长发育过程中内生菌的建立基础,可以促进幼苗发育,提高植物抗逆性<sup>[9]</sup>。因此,研究种子内生菌的多样性及其促生功能,对于开发新型微生物菌剂和推动农业健康发展具有重要意义。

目前,关于植物内生菌的研究在水稻<sup>[10]</sup>、小麦<sup>[11]</sup>、玉米<sup>[12]</sup>等作物中取得显著进展,例如植物内生菌属中的芽孢杆菌属(*Bacillus*)和假单胞菌属(*Pseudomonas*)被报道具有固氮、溶磷和产 IAA 等多种促生功能。然而,针对瓜类作物种子内生菌的研究相对较少,尤其是甜瓜种子内生菌的多样性及其促生功能的研究仍处于起步阶段。已有研究报道,葫芦科植物种子内生菌可以通过对抗病原菌来增强植物的抗病能力,还可以通过释放生物活性物质来促进植物防御反应,并且还具具有促进种子萌发、提高出苗率的功能<sup>[13-14]</sup>,但其种子内生菌的菌落组成及促生功能尚未得到解析。因此,本研究以甜瓜种子为研究对象,旨在了解其可培养内生菌的多样性,并评估其促生潜力,为研发环境友好的生物菌剂、推动农业绿色发展储备微生物资源。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

试验于 2024 年 3—12 月在塔里木大学分析测试中心进行。试验用甜瓜种子为昌吉市金土地种子有限责任公司生产的青脆蜜甜瓜杂交种。

### 1.2 培 养 基

分离、纯化培养基购自北京陆桥股份有限公司,促生功能培养基购自北京酷莱博科技有限公司。分离培养基:营养琼脂培养基(NA)、LB 琼脂培养基、高氏一号培养基、沙氏葡萄糖琼脂培养基(SDA)、马铃薯葡萄糖琼脂培养基(PDA);纯化培养基:营养琼脂培养基(NA);促生功能培养基:蒙金

娜培养基、NBRIIP 培养基、阿须贝氏无氮培养基、解钾培养基、金氏 B 培养基、CAS 培养基、纤维素刚果红培养基。

### 1.3 甜瓜种子内生菌的分离、纯化及保藏

采用稀释涂布平板法<sup>[15]</sup>分离甜瓜种子内生菌。参考张凯晔<sup>[16]</sup>的方法对甜瓜种子进行消毒处理,称取 1.0 g 健康饱满的甜瓜种子放入无菌的烧杯中,75%乙醇浸泡 30 s,无菌水洗涤 5 次,5% NaClO 溶液浸泡 5 min,无菌水洗涤 5 次。最后一次洗涤水吸取 100  $\mu$ L 涂布于分离培养基作为对照,以确定甜瓜种子消毒是否彻底。将处理好的甜瓜种子放在无菌滤纸上沥干水分,然后放入无菌研钵中,加入 9 mL 生理盐水充分研磨,将研磨液用生理盐水稀释至  $10^2$ 、 $10^3$ 、 $10^4$  和  $10^5$  倍,分别吸取 100  $\mu$ L 涂布于分离培养基上,每种分离培养基对每个稀释梯度做 3 个平行处理,放置 28  $^{\circ}$ C 恒温培养箱倒置培养,每天观察 1 次。

在超净工作台中挑取细菌单菌落于 NA 培养基上采取平板划线法进行纯化。

纯化后的菌株采用真空冻干保藏法进行保藏,2 mL 安瓿管塞好脱脂棉塞,121  $^{\circ}$ C 高压灭菌 20 min,烘干备用。配制 20%脱脂奶粉,每个安瓿管分装 500  $\mu$ L,115  $^{\circ}$ C 高压灭菌 20 min。在超净工作台刮取纯化好的菌株于无菌脱脂奶粉中,塞好无菌脱脂棉塞于-80  $^{\circ}$ C 冰箱预冻 4 h,将预冻好的样品放置冷冻干燥机内进行冷冻干燥。干燥好的安瓿管用酒精喷灯封口,封口后的安瓿管低温避光保存。

### 1.4 甜瓜种子内生菌的鉴定

采用酚抽提法提取细菌基因组 DNA<sup>[17]</sup>:在超净工作台中,准备 1.5 mL 无菌离心管分别加入 480  $\mu$ L  $1\times$ TE 缓冲溶液和 20  $\mu$ L 溶菌酶( $50\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ),挑取适量菌体于离心管中,放入恒温摇床中 37  $^{\circ}$ C 振荡培养过夜。经上述处理后加入 50  $\mu$ L SDS (20%) 和 5  $\mu$ L 蛋白酶 K( $20\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ )至 1.5 mL 菌体的离心管中,放入 60  $^{\circ}$ C 恒温水浴锅水浴 1 h,每 30 min 振荡 1 次。水浴结束待离心管恢复室温,加入 550  $\mu$ L 酚:氯仿:异戊醇(体积比 25:24:1)溶液,轻轻颠倒混匀,12 000  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  离心 10 min,吸取上清液转移至另一离心管中,加入与上清液等体积的酚:氯仿:异戊醇溶液反复抽提 2 次。准备 1.5 mL 无菌离心管,加入 800  $\mu$ L 无水乙醇和 80  $\mu$ L 乙酸钠溶液( $3\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ),吸取上清液至离心管,放入 4  $^{\circ}$ C 冰箱静置 1 h 以上。12 000  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  离心 15 min,

弃上清液。用 300  $\mu\text{L}$  70%的乙醇清洗离心产物 2 次,10 000  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  离心 5 min,弃上清液。待离心管中的乙醇挥发完(用枪头吸走多余液体),加入 50  $\mu\text{L}$  ddH<sub>2</sub>O 溶解 DNA,放入-20  $^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存备用。

细菌用引物 27F (5'-AGAGTTTGATCCTG-GCTC-3') 和 1492R (5'-CGGCTACCTTGTTAC-GACTT-3'), 扩增 16S rRNA 基因<sup>[18]</sup>。PCR 体系 (25  $\mu\text{L}$ ): *Taq* PCR Mix 12.5  $\mu\text{L}$ , 引物 27F 和 1492R 各 0.5  $\mu\text{L}$ , dd H<sub>2</sub>O 11  $\mu\text{L}$ , DNA 模板 0.5  $\mu\text{L}$ 。PCR 反应条件:95  $^{\circ}\text{C}$  预变性 5 min, 95  $^{\circ}\text{C}$  变性 30 s, 55  $^{\circ}\text{C}$  退火 30 s, 72  $^{\circ}\text{C}$  复性 2 min, 35 个循环, 72  $^{\circ}\text{C}$  延伸 10 min。PCR 产物凝胶电泳检测合格后送生工生物工程(上海)股份有限公司进行测序。细菌测序结果登录 EzBioCloud<sup>[19]</sup> 数据库进行比对。使用 MEGA 7 软件<sup>[20]</sup> 以邻接法 (neighbor-joining, NJ)<sup>[21]</sup> 进行聚类分析及系统进化树构建。

### 1.5 甜瓜种子内生菌促生能力的测定

1.5.1 溶磷能力的测定 磷以有机磷和无机磷两种形式存在,因此本试验使用蒙金娜培养基(测有机磷)和 NBRIP 培养基(测无机磷)测定菌株的溶磷能力。通过测序结果比对排除重复的甜瓜种子内生菌,将排重后的甜瓜种子内生菌在超净工作台中心点接于上述 2 种培养基上,每个菌株每种培养基做 3 次重复,28  $^{\circ}\text{C}$  倒置培养 7 d,通过解磷圈直径和菌落直径的比值判断溶磷能力<sup>[22-23]</sup>。

1.5.2 固氮能力的测定 采用平板划线法将排除重复后的甜瓜种子内生菌接种于阿须贝氏无氮培养基上,每个菌株做 3 次重复,28  $^{\circ}\text{C}$  倒置培养 7 d,若平板上有菌落生长,表示其有固氮能力;若平板上无菌落生长,表示其无固氮能力<sup>[24]</sup>。

1.5.3 解钾能力的测定 使用解钾培养基测定甜瓜种子内生菌的解钾能力,将甜瓜种子内生菌点接于解钾培养基上,每个菌株做 3 次重复,28  $^{\circ}\text{C}$  倒置培养 7 d,通过解钾圈直径和菌落直径的比值判断解钾能力<sup>[25]</sup>。

1.5.4 产 IAA 能力测定 使用 3-吲哚乙酸配制 IAA 标准溶液,标准溶液浓度( $\rho$ )为 10、30、50、70、100  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,加入与标准溶液等体积的 Salkowski 比色液 (35% HClO<sub>4</sub>:0.5  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  FeCl<sub>3</sub>=50:1),黑暗环境下静置 30 min 后,使用美国 PerkinElmer 公司生产的 Lambda 365 紫外可见分光光度计在 530 nm 波长下测定 IAA 的标准曲线。

参考 Salkowski 比色法测定菌株产 IAA 能力。挑取甜瓜内生菌单菌落接种于 10 mL 含有 100  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

L-色氨酸的金氏 B 液体培养基中,每个菌株做 3 次重复,以没有接种菌落的含有 100  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  L-色氨酸的金氏 B 液体培养基做空白对照,空白对照做 3 次重复,28  $^{\circ}\text{C}$ 、150  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  摇床振荡培养 7 d 后,10 000  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  离心 10 min,取上清液,将 3 次重复的上清混合均匀,加入与其等体积的 Salkowski 比色液 (35% HClO<sub>4</sub>:0.5  $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  FeCl<sub>3</sub>=50:1),黑暗环境下静置 30 min 后,使用美国 PerkinElmer 公司生产的 Lambda 365 紫外可见分光光度计在 530 nm 波长下测定样品的 IAA 产量<sup>[26]</sup>。

1.5.5 产铁载体能力的测定 将甜瓜种子内生菌点接于 CAS 培养基上,每个菌株做 3 次重复,28  $^{\circ}\text{C}$  倒置培养 7 d,如果菌落周围有黄色透明圈形成,说明该菌株具有产铁载体的能力,通过计算黄色透明圈直径和菌落直径的比值判断菌株产铁载体的能力<sup>[27]</sup>。

1.5.6 分解纤维素能力的测定 将甜瓜种子内生菌点接于纤维素刚果红培养基上,每个菌株做 3 次重复,28  $^{\circ}\text{C}$  倒置培养 7 d,观察菌落周围有无透明圈形成,通过计算透明圈直径和菌落直径的比值判断菌株分解纤维素的能力<sup>[28]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 甜瓜种子内生菌多样性分析

采用 5 种分离培养基对甜瓜种子内生菌进行分离、纯化,根据菌落特征初步排除重复菌株后提取菌株基因组 DNA,PCR 扩增测序,序列比对结果显示(图 1),从甜瓜种子中分离获得 39 株细菌,细菌分属于 3 个属 7 个种,3 个属分别为芽孢杆菌属 (*Bacillus*)、埃希氏菌属 (*Escherichia*)、志贺氏菌属 (*Shigella*),7 个种分别为 *Bacillus altitudinis*、*Bacillus australimaris*、*Bacillus pumilus*、*Bacillus safensis* subsp. *safensis*、*Bacillus zhangzhouensis*、*Escherichia fergusonii*、*Shigella flexneri*。在分离获得的内生菌中,*Bacillus* 属的物种多样性最高(共 5 个种),因此可判定 *Bacillus* 属为优势菌属。

### 2.2 甜瓜种子内生菌促生功能分析

对甜瓜种子 7 种内生菌 ZZ-1 (*Bacillus zhangzhouensis*)、ZZ-3 (*Bacillus australimaris*)、ZZ-4 (*Bacillus safensis* subsp. *safensis*)、ZZ-10 (*Bacillus pumilus*)、ZZ-15 (*Bacillus altitudinis*)、ZZ-19 (*Shigella flexneri*)、ZZ-30 (*Escherichia fergusonii*) 进行溶磷、固氮、解钾、产 IAA、产铁载体、分解纤维素能力测定,结果显示 7 株内生菌均无溶磷、解钾和分解纤

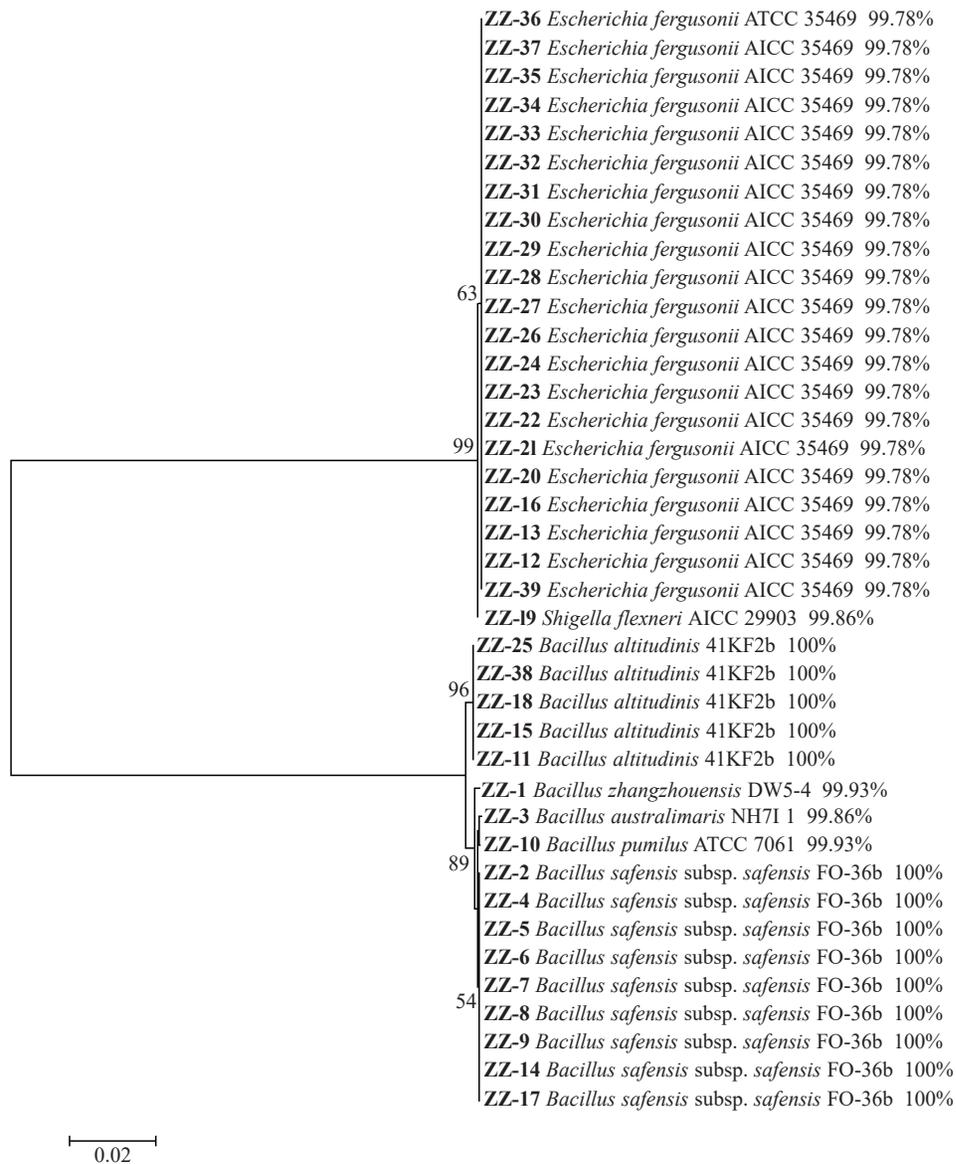


图1 甜瓜种子内生菌基于16S rRNA基因序列构建的Neighbour-Joining系统进化树

Fig. 1 Neighbour-Joining phylogenetic tree based on 16S rRNA gene sequences of endophytic bacteria in melon seeds

纤维素的能力;7株内生菌均可以在阿须贝氏无氮培养基上生长,具有固氮能力,见图2。采用Salkowski比色法定量测定的结果表明,7株内生菌均具有产IAA能力,其中菌株ZZ-10的IAA产量为10.43 mg·L<sup>-1</sup>,菌株ZZ-1、ZZ-3、ZZ-4的IAA产量分别为5.87、4.98、5.65 mg·L<sup>-1</sup>,菌株ZZ-15、ZZ-19、ZZ-30的IAA产量分别为3.90、3.79、3.79 mg·L<sup>-1</sup>,这一结果表明菌株ZZ-10产IAA的能力最强,菌株ZZ-1、ZZ-3、ZZ-4产IAA的能力次之,但菌株ZZ-1、ZZ-3、ZZ-4产IAA的能力略强于菌株ZZ-15、ZZ-19、ZZ-30,见图3和表1。5株内生菌(ZZ-1、ZZ-3、ZZ-4、ZZ-15、ZZ-30)具有产铁载体的能力,通过计算黄色透明圈直径和菌落直径的比值

判断菌株产铁载体的能力,结果计算出菌株ZZ-4、ZZ-30产铁载体的能力分别为1.32、1.35,菌株ZZ-1、ZZ-3、ZZ-15产铁载体的能力分别为1.24、1.20、1.17,这一结果表明菌株ZZ-4、ZZ-30产铁载体的能力略强于菌株ZZ-1、ZZ-3、ZZ-15,见图4和表1。

### 3 讨论与结论

本研究从甜瓜种子中分离获得39株内生菌,经16S rRNA测序比对鉴定为7个种,其中*Bacillus*为优势菌属。这一发现与多项研究结果一致,Chen等<sup>[29]</sup>从青稞种子中分离的86株内生菌以*Bacillus*为优势菌属,并且有50%的内生菌表现出促进植物

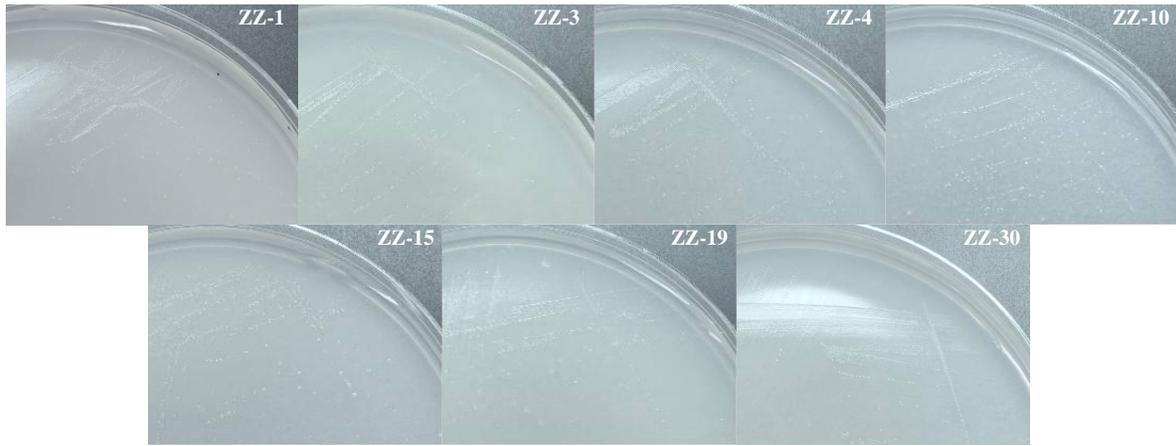
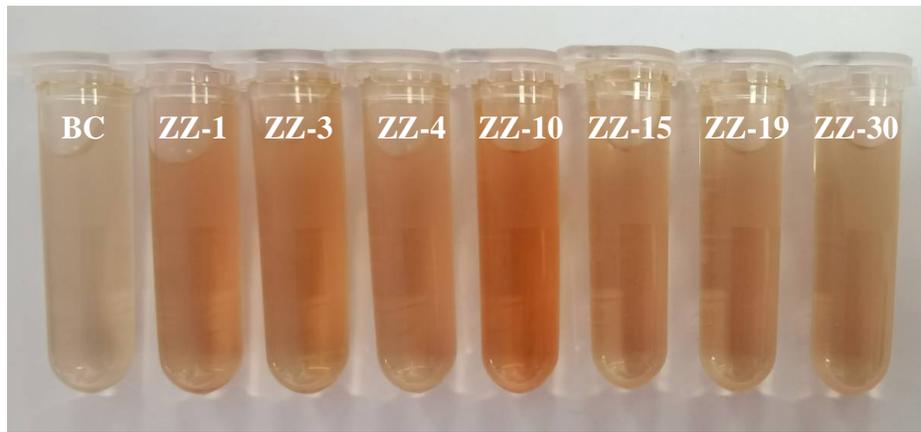


图2 甜瓜种子内生菌在阿须贝氏无氮培养基上的生长情况

Fig. 2 Growth of endophytic bacteria from melon seeds on Ashby's nitrogen-free medium



注:“BC”为空白对照。

Note: “BC” stands for blank control.

图3 甜瓜种子内生菌产 IAA 显色结果

Fig. 3 Colorimetric detection of IAA produced by melon seed endophytes



注:ZZ-10 和 ZZ-19 无产铁载体能力。

Note: ZZ-10 and ZZ-19 lack siderophore production capability.

图4 甜瓜种子内生菌在 CAS 培养基上的生长情况

Fig. 4 Growth of melon seed endophytic bacteria on CAS medium

生长的特性;Khalaf 等<sup>[13]</sup>从葫芦科植物种子中分离出 169 株内生菌,并测试了这些内生菌对重要病害 (*Rhizoctonia solani*、*Fusarium graminearum*、*Phytophthora capsici*、*Pythium aphanideratum*、*Podospaera fuliginea*) 的体外拮抗作用,发现 70%的内生

菌对 5 种病害表现出拮抗作用,且 68%的拮抗内生菌为 *Bacillus* 和 *Paenibacillus*; Mukherjee 等<sup>[30]</sup>从鹰嘴豆中分离出 29 株内生菌,8 株来自于干种子,21 株来自于萌发种子。基于 16S rRNA 的系统发育分析表明,种子内生细菌属于 *Enterobacter*、*Bacillus*、

表1 甜瓜种子内生菌促生能力测定结果  
Table 1 Evaluation of plant growth-promoting traits in melon seed endophytic bacteria

菌株编号 Strain number	产 IAA 能力 IAA production capacity/(mg·L <sup>-1</sup> )	产铁载体能力 Siderophore production capability	固氮能力 Nitrogen fixation capacity
ZZ-1	5.87	1.24	+
ZZ-3	4.98	1.20	+
ZZ-4	5.65	1.32	+
ZZ-10	10.43	0.00	+
ZZ-15	3.90	1.17	+
ZZ-19	3.79	0.00	+
ZZ-30	3.79	1.35	+

注：“+”表示具有相关能力。

Note: “+” indicates positive capability.

*Pseudomonas*、*Staphylococcus*、*Pantoea* 和 *Mixta* 属,检测发现部分内生菌可以促进植物生长,并且提高鹰嘴豆植物对病原菌的抗性;Choi 等<sup>[31]</sup>从野生芥菜种子中分离出 13 株内生菌,归为 6 个菌属 *Bacillus*、*Rhodococcus*、*Streptomyces*、*Staphylococcus*、*Paenibacillus*、*Pseudomonas*,有 8 株内生菌表现出溶磷、产 IAA、产铁载体的促生特性;Zhang 等<sup>[32]</sup>从苜蓿种子中分离出 13 株内生细菌,包括 *Bacillus*、*Enterobacter*、*Brevibacterium*、*Geobacillus*、*Staphylococcus* 菌属,其中 *Bacillus* 占比 76.9%,为优势菌属,且发现 4 株 *Bacillus* 能够显著延长秀丽隐杆线虫的寿命。这些研究表明,*Bacillus* 在多种植物种子内生菌中普遍存在且占据优势地位,本研究结果表明,甜瓜种子内生菌的优势菌属也是 *Bacillus*,结果与前人研究一致。

内生菌在植物生长发育中发挥重要作用,本研究发现,甜瓜种子内生菌的促生作用主要体现在固氮、产 IAA、产铁载体。氮是植物生长的关键元素之一,部分内生菌可将空气中的氮气转化为植物可以利用的氮素(如氨、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)<sup>[33]</sup>。IAA 是植物生长过程中的重要生长激素,有研究发现微生物分泌的植物促生激素 IAA 可以促进植物不定根和侧根的形成,增强植物吸收水分和养分的能力<sup>[34]</sup>。铁载体是一类对 Fe<sup>3+</sup> 具有高亲和力的小分子化合物,在植物生长过程中可以促进植物对铁元素的吸收利用,还能通过增强相关酶活性和基因表达提高植物抗病能力<sup>[35]</sup>。内生菌作为微生物促生菌剂具有独特优势,因其可定殖于植物组织内部,占据有利的生态地位。本研究发现,从甜瓜种子中分离的 7 株内生菌(分属 *Bacillus*、*Escherichia*、*Shigella*)均具有固氮和产 IAA 能力,其中 5 株内生菌(分属 *Bacillus*、

*Escherichia*)具有产铁载体的能力,已有多项研究报道 *Bacillus*、*Escherichia*、*Shigella* 属内生菌具有促生功能,Brahim 等<sup>[36]</sup>从盐生植物 *Salicornia brachiata* 中分离的 4 株 *Bacillus* 属内生固氮菌兼具产 IAA、产铁载体和溶磷等促生特性,其中菌株 MA17 可将小麦病害发生率降低 64.5%;Di 等<sup>[37]</sup>从甘蔗中分离的一株枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)可显著提高甘蔗有机酸和植物激素含量,接种该枯草芽孢杆菌后甘蔗幼苗的氮、磷、钾含量分别增加 29.26%、50.78%和 15.49%,甘蔗的光合速率、根系发育能力和叶绿素含量均有所提高;彭鑫<sup>[38]</sup>研究 2 种解磷菌 *Escherichia coli*、*Enterobacter cloacae* 对 Cd 的耐受性及促生功能时发现,2 株菌对可以耐受 Cd<sup>2+</sup> 最大浓度在 400 mg·L<sup>-1</sup>;两株菌最高解磷量为 11.37、9.09 mg·L<sup>-1</sup>;IAA 产量最大值为 55.01、26.12 mg·L<sup>-1</sup>; *Escherichia coli* 在培养至第 4 天时产铁载体能力最强; *Enterobacter cloacae* 在 1~4 d 内产铁载体能力逐渐减弱。李向阳等<sup>[39]</sup>从燕麦种子中分离的 34 株内生菌以 *Bacillus* 为优势菌属,且有 9 株分属于 *Bacillus*、*Escherichia*、*Shigella*、*Pseudomonas* 和 *Atlantibacter* 的内生菌同时具有固氮、产 IAA、溶磷和分解纤维素的功能。本研究甜瓜种子内生菌(分属 *Bacillus*、*Escherichia*、*Shigella*)的促生功能与前人研究一致,可作为甜瓜种植过程中的潜在促生微生物资源。

综上所述,笔者从甜瓜种子中分离得到 39 株内生菌,分属于 3 个属、7 个种,其中优势菌属为 *Bacillus* 属,明确了甜瓜种子内生菌的组成及优势菌属。对 7 个物种内生菌的促生功能进行研究,发现 7 株内生菌同时具备固氮和产 IAA 功能,归属为 *Bacillus*、*Escherichia* 属的 5 株内生菌具有产铁载体功能,归属为 *Bacillus* 属的内生菌 ZZ-4 综合促生能力最强,本研究为甜瓜种植用植物促生菌剂的研发提供了菌种资源。

### 参考文献

- [1] 曹际钊,都晓伟,李倩,等.药用植物内生菌促药效成分生物合成的研究进展[J].中南药学,2024,22(2):445-452.
- [2] DANNEELS B,CARLIER A. Whole-genome sequencing of bacterial endophytes from fresh and preserved plant specimens[J]. Methods in Molecular Biology, 2023, 2605: 133-155.
- [3] LI Z G, XIONG K Y, WEN W E, et al. Functional endophytes regulating plant secondary metabolism: current status, prospects and applications[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(2): 1153.
- [4] VANDANA U K, RAJKUMARI J, SINGHA L P, et al. The en-

- dophytic microbiome as a hotspot of synergistic interactions, with prospects of plant growth promotion[J]. *Biology*, 2021, 10(2):101.
- [5] 谭智勇,李玉柱,谭大新,等.31种中药材水提取物对茄子缢疫病原菌的抑制作用[J]. *中国瓜菜*, 2025, 38(6):203-208.
- [6] 李务焜,李昊熙,李乐.3种微生物菌剂肥对不同生育时期西瓜生长、果实品质及矿物质元素吸收的影响[J]. *中国瓜菜*, 2025, 38(6):109-114.
- [7] 刘梦洁,徐亚军,黄雪珍,等.植物内生菌研究方法[J]. *微生物学通报*, 2024, 51(6):1887-1897.
- [8] FATEMA K, MAHMUD N U, GUPTA D R, et al. Enhancing rice growth and yield with weed endophytic bacteria *Alcaligenes faecalis* and *Metabacillus indicus* under reduced chemical fertilization[J]. *PLoS One*, 2024, 19(5):e0296547.
- [9] VUJANOVIC V, GERMIDA J J. Seed endosymbiosis: A vital relationship in providing prenatal care to plants[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2017, 97(6):972-981.
- [10] HERNÁNDEZ I, TAULÉ C, PÉREZ-PÉREZ R, et al. Endophytic seed-associated bacteria as plant growth promoters of Cuban rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Microorganisms*, 2023, 11(9):2317.
- [11] DE LIMA J D, MONTEIRO P H R, RIVADAVEA W R, et al. Potential of endophytic bacteria from *Acacia mearnsii*: Phosphate solubilization, indole acetic acid production, and application in wheat[J]. *Applied Soil Ecology*, 2024, 196:105315.
- [12] MENDONÇA J J, ALVES M J G, VITALINO G M, et al. Effect of *Digitaria eriantha* endophytic bacteria on maize growth in a hydroponic system[J]. *Agronomy*, 2024, 14(12):2769.
- [13] KHALAF E M, RAIZADA M N. Bacterial seed endophytes of domesticated cucurbits antagonize fungal and oomycete pathogens including powdery mildew[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9:42.
- [14] 赵梦琪,王晓晗,郑金双,等.一株黄瓜种子内生胶红酵母菌的鉴定及其促生功能[J]. *中国瓜菜*, 2025, 38(5):49-54.
- [15] 李文均,张忠泽,姜成林.几种主要稀有放线菌的选择性分离[J]. *国外医药(抗生素分册)*, 2002, 23(1):18-22.
- [16] 张凯晔.田菁种子内生菌的分离及其促生功能研究[D].山西晋中:山西农业大学, 2020.
- [17] 李丽霞,文凤,罗丹,等.吐鲁番戈壁滩耐热微生物及产酶能力[J]. *微生物学通报*, 2024, 51(9):3438-3453.
- [18] 郑昭焕,余函纹,梁笑,等.桔梗根腐病拮抗菌的筛选及生防机制初探[J]. *药学报*, 2025, 60(3):825-833.
- [19] KIM O S, CHO Y J, LEE K, et al. Introducing EzTaxon-e: A prokaryotic 16S rRNA gene sequence database with phylotypes that represent uncultured species[J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2012, 62(3):716-721.
- [20] KUMAR S, STECHER G, TAMURA K. MEGA7: molecular evolutionary genetics analysis version 7.0 for bigger datasets[J]. *Molecular Biology and Evolution*, 2016, 33(7):1870-1874.
- [21] SAITOU N, NEI M. The neighbor-joining method: A new method for reconstructing phylogenetic trees[J]. *Molecular Biology and Evolution*, 1987, 4(4):406-425.
- [22] 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*, 2017, 57(5):667-680.
- [23] 李慧萍,甘雅楠,韩庆庆,等.祁连山云杉林土壤溶磷细菌的分离及对白三叶的促生效应[J]. *草地学报*, 2022, 30(4):879-888.
- [24] 王琦,李文涛,张沛东,等.鳃草根际固氮菌的分离鉴定及培养条件的筛选[J]. *中国水产科学*, 2017, 24(4):791-801.
- [25] 俞海平,傅庆林,刘俊丽,等.解钾细菌的分离筛选及其对水稻的促生效果[J]. *浙江农业科学*, 2022, 63(6):1161-1164.
- [26] 程鑫宇,王继莲,麦日艳古·亚生,等.盐爪爪根际土壤产 IAA 菌株分离及促生特性分析[J]. *草业学报*, 2024, 33(4):110-121.
- [27] 许佳露,张平,李美芳,等.产铁载体菌株的分离、培养条件优化及初步应用[J]. *微生物学通报*, 2022, 49(3):1004-1016.
- [28] 陈佳雯,赵杰,徐静茹,等.牛瘤胃液中纤维素分解菌分离、鉴定及降解效果测定[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2022, 43(2):104-110.
- [29] CHEN Y L, LIANG J P, ZIA A, et al. Culture dependent and independent characterization of endophytic bacteria in the seeds of highland barley[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13:981158.
- [30] MUKHERJEE A, SINGH B K, VERMA J P. Harnessing chickpea (*Cicer arietinum* L.) seed endophytes for enhancing plant growth attributes and bio-controlling against *Fusarium* sp.[J]. *Microbiological Research*, 2020, 237:126469.
- [31] CHOI B W, JEONG S, KIM E. Variation of the seed endophytic bacteria among plant populations and their plant growth-promoting activities in a wild mustard plant species, *Capsella bursa-pastoris*[J]. *Ecology and Evolution*, 2022, 12(3):e8683.
- [32] ZHANG H L, JIA F, LI M, et al. Endophytic *Bacillus* strains isolated from alfalfa (*Medicago sativa* L.) seeds: enhancing the lifespan of *Caenorhabditis elegans*[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2019, 68(3):226-233.
- [33] SINGH R K, SINGH P, SHARMA A, et al. Unraveling nitrogen fixing potential of endophytic diazotrophs of different *Saccharum* species for sustainable sugarcane growth[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(11):6242.
- [34] GANESH J, HEWITT K, DEVKOTA A R, et al. IAA-producing plant growth promoting rhizobacteria from *Ceanothus velutinus* enhance cutting propagation efficiency and *Arabidopsis* biomass[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15:1374877.
- [35] KAMATH A, SHARMA A, SHUKLA A, et al. Fortifying plant fortresses: siderophores in defense against *Cercospora* leaf spot disease in *Vigna radiata* L.[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2025, 15:1492139.
- [36] BRAHIM A H, BEN ALI M, DAOUD L, et al. Biopriming of durum wheat seeds with endophytic diazotrophic bacteria enhances tolerance to fusarium head blight and salinity[J]. *Microorganisms*, 2022, 10(5):970.
- [37] DI Y N, KUI L, SINGH P, et al. Identification and characterization of *Bacillus subtilis* B9: A diazotrophic plant growth-promoting endophytic bacterium isolated from sugarcane root[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2022, 42(3):1720-1737.
- [38] 彭鑫.解磷微生物协同绿色活化剂强化黑麦草修复镉污染农田土壤研究[D].长沙:湖南农业大学, 2023.
- [39] 李向阳,张玉娟,贾倩英,等.9个燕麦品种的种带细菌多样性及其促生功能定性分析[J]. *草原与草坪*, 2024, 44(2):13-24.