

韦廷舟,文 怡,王 超,等.一株产 IAA 芽孢杆菌 ST37 对油菜的耐盐促生作用[J]. 江苏农业科学,2023,51(6):210-215.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.06.029

# 一株产 IAA 芽孢杆菌 ST37 对油菜的耐盐促生作用

韦廷舟<sup>1,3</sup>, 文 怡<sup>1</sup>, 王 超<sup>2</sup>, 王 爽<sup>1</sup>, 陈 云<sup>1</sup>, 张泽颖<sup>1</sup>, 范清锋<sup>1,3</sup>, 胡琬新<sup>1</sup>, 龙治坚<sup>1,3</sup>, 江世杰<sup>1,3</sup>

(1. 西南科技大学生命科学与工程学院, 四川绵阳 621010; 2. 四川卫生康复职业学院, 四川自贡 643000;

3. 西南科技大学生物材料教育部工程研究中心, 四川绵阳 621010)

**摘要:**植物根际促生菌(PGPR)具有促进非生物胁迫下植物种子萌发和幼苗生长的特性。通过在盐胁迫下接种盐矿区污染土壤中分离的菌株 ST37, 评价其对油菜种子萌发和幼苗生长的促生作用, 结合细菌形态特征和 16S rDNA 序列分析对其进行鉴定, 同时测定 ST37 的耐盐能力及其产吡啶乙酸(IAA)、解钾、产铁载体、产 1-氨基-环丙烷-1-羧酸(ACC)脱氢酶的能力。结果表明, 试验菌株 ST37 在盐胁迫下对油菜种子萌发和幼苗生长具有较好的促生效果, 50 mmol/L NaCl 处理下, 种子发芽率、发芽势增长率均为 6.67%, 幼苗根长和株高增长率分别达到 11.15% 和 235.40%; 经理化性质分析和分子生物学鉴定, ST37 菌株为 *Bacillus mobilis*, 具有耐受 4% NaCl 胁迫能力, 在 0~4% NaCl 培养条件下均可分泌 IAA, 其分泌 IAA 含量最高为 6.82 mg/L。ST37 菌株还具有解钾、产铁载体和产 ACC 脱氢酶的能力。表明菌株 ST37 通过分泌 IAA、解钾等多种方式缓解盐胁迫对油菜种子和幼苗生长的损伤, 结果可为耐盐生物菌肥/剂的开发提供候选菌种资源。

**关键词:**植物根际促生菌; 油菜种子; 吡啶乙酸; 耐盐促生; 芽孢杆菌

**中图分类号:**S182 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)06-0210-06

土壤盐渍化是造成土地荒漠化的主要原因, 严重影响土壤结构和功能, 对农业的可持续发展产生不可估量的损失<sup>[1-2]</sup>。据统计, 目前已有 20% 的耕

地受到盐分胁迫, 而且盐渍化土壤的面积仍呈现不断增加趋势, 预计到 2050 年全球将有 50% 的耕地受土壤盐碱化的影响<sup>[3]</sup>。盐渍化土壤中含有过高的盐分, 高盐环境使植物产生渗透胁迫、质膜损伤、离子不平衡等问题, 从而阻碍植物的生长<sup>[4]</sup>。由于盐胁迫对土地和作物的影响日益严重, 亟待开发一种高效可行的应对策略解决全球粮食安全问题, 传统方法是培育耐盐新品种<sup>[5]</sup>或是开发转基因耐盐植物<sup>[6]</sup>, 但因其效果不佳且在使用过程中存在一定的局限性, 亟须寻找一种有效可行的替代策略, 近年来通过植物根际促生菌 PGPR (plant growth -

收稿日期:2022-05-06

基金项目:四川省科技创新苗子工程(编号:2021070);自贡市重点科技计划(编号:2020YGJC10);四川省大学生创新创业训练计划(编号:S202110619123)。

作者简介:韦廷舟(1996—),男,贵州兴仁人,硕士研究生,研究方向为植物根际细菌促生。E-mail:1565071306@qq.com。

通信作者:江世杰,博士,讲师,主要从事特殊环境生物资源利用研究。E-mail:shijiejiang525@163.com。

[11]童炳丽.米槁根际微生物与其药材活性成分的相关性研究[D].贵阳:贵州大学,2020:43-45.

[12]王英哲,姜大成,容路生,等.东北产朝鲜淫羊藿中黄酮类成分的对比例分析[J].药物分析杂志,2019,39(11):2034-2040.

[13]康 捷,章淑艳,韩 韬,等.麻山药不同生长期根际土壤微生物多样性及群落结构特征[J].生物技术通报,2019,35(9):99-106.

[14]刘 泽.中国被孢霉属及近缘属的分类与分子系统发育研究[D].北京:北京林业大学,2020:1-2.

[15]Ozimek E, Hanaka A. *Mortierella* species as the plant growth - promoting fungi present in the agricultural soils[J]. Agriculture, 2020,11(1):7.

[16]Zhang K L, Bonito G, Hsu C M, et al. *Mortierella elongata* increases plant biomass among non - leguminous crop species [J].

Agronomy, 2020, 10(5):754.

[17]高婷婷.红松外生菌根真菌群落随时间尺度的动态变化及影响因素[D].长春:吉林农业大学,2020:35-36.

[18]靳 微.几种栎树外生菌根真菌多样性及其对苗木生长和养分吸收的影响[D].北京:中国林业科学研究院,2019:67-69.

[19]王凤让,毛克克,李国钧,等.印度梨形孢及其近似种 *Sebacina vermifera* 促进番茄生长发育及磷吸收[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2011,37(1):61-68.

[20]毛克克. *Piriformospora indica* 和 *Sebacina vermifera* 诱导的番茄抗病性研究[D].杭州:浙江大学,2010:37-39.

[21]白 猛,王海洋,练余兴,等.红树植物角果木内生真菌 *Cladosporium* sp. JS1-2 的次级代谢产物研究[J].中国抗生素杂志,2020,45(7):655-659.

promoting rhizobacteria) 改良盐碱地土壤和提高植物抗逆性已然成为一种有效手段<sup>[7]</sup>。

植物根际促生菌 PGPR 是指生存于植物根际土壤中,具有促进植物生长特性的有益微生物<sup>[8]</sup>,也是目前用于盐碱地微生物改良措施中应用最为广泛的微生物,PGPR 通过激素促进植物对营养的吸收和利用,从而促进植物的生长<sup>[9]</sup>。吲哚乙酸 IAA (indole-3-acetic acid) 是植物内源激素,作用于植物生长发育全过程,影响植物细胞分裂、伸长、分化以及种子萌发、根系发育等诸多过程。除此之外,IAA 在植物对盐胁迫等不良环境的响应中也具有重要意义。已有研究表明,从植物根际土壤中分离出产 IAA 的 PGPR 能够显著促进植物的生长和发育<sup>[10]</sup>。从盐碱地、海水等高盐环境分离出的耐盐 PGPR 能够促进植物在盐胁迫环境中的生长;Li 等从盐碱地花生根际土壤中分离出 1 株能产 IAA 的阴沟肠杆菌 HSNJ4,在模拟盐胁迫条件下,接种 HSNJ4 菌能够显著增加油菜幼苗的根长、株高、侧根数量以及提高脯氨酸含量、抗氧化酶活性等指标,降低丙二醛含量,从而促进油菜幼苗的生长<sup>[11]</sup>。此外,PGPR 还通过解钾、产铁载体和产 ACC 脱氨酶等多种方式促进植物生长;解钾菌、溶磷菌通过分解土壤中的难溶性钾、磷、硅等元素,使其转变为易被植物吸收的可溶态的钾、磷、硅等元素<sup>[12]</sup>;产 ACC 脱氨酶 PGPR 通过降解乙烯前体物 ACC,抑制乙烯的合成,调节植物体乙烯的含量,从而对植物生长起促进作用<sup>[13]</sup>。周波等从柠条根际土壤中分离出一株具有产铁载体功能的根际促生菌,接种菌株后能使柠条幼苗的株高、根长、鲜质量、干质量分别增长 17.25%、6.68%、42.51% 和 20.67%,这说明具有产铁载体功能的 PGPR 能够显著促进柠条的生长<sup>[14]</sup>。因此利用耐盐 PGPR 来改良盐碱地具有较好的应用前景。

四川省自贡市享有“盐都”之称,其特殊的地质构造孕育了地下丰富的盐卤资源,随着盐矿开采过程中卤水渗漏、矿盐堆积、意外冒卤事件均会导致大面积土壤盐碱化,微生物群落对环境变化极为敏感,随着环境变迁,土壤微生物的适应性进化被驱动,其种类和结构均不同于非盐渍化污染的土壤<sup>[14]</sup>。因此本研究前期从自贡市长山镇盐矿区周边盐渍化土壤中分离出 1 株耐盐芽孢杆菌,通过测定其促生特性,在盐胁迫下将其接种于甘蓝型油菜种子,测定种子的发芽率、发芽势及其幼苗的根长

和株高,以期耐盐 PGPR 的开发和盐碱地的改良提供重要菌种资源。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验菌株及种子

本研究前期从自贡市荣县长山镇盐矿区污染的植物根际土壤中分离获得一批具有耐盐能力的细菌,经分离纯化保存于笔者所在实验室;大肠杆菌 DH5 $\alpha$  和枯草芽孢杆菌 WB600 作为对照菌株。试验所用甘蓝型油菜种子由四川大学生命科学学院提供。所有试验于 2021 年 11 月至 2022 年 3 月在四川省绵阳市西南科技大学生物质材料教育部工程研究中心完成。

### 1.2 试验方法

1.2.1 菌株 ST37 的鉴定 将菌株接种于 LB 固体培养基中过夜活化,参照《常见细菌系统鉴定手册》观察细菌基本特征(包括形态、颜色、边缘、透明度等),并对菌株进行革兰氏染色。提取过夜培养的 ST37 菌株纯培养物基因组 DNA,以此为模板,使用通用引物 F27/R1492 进行 PCR 扩增。扩增产物经琼脂糖凝胶电泳检测后送至华大基因测序。获得的 16S rDNA 序列经 NCBI 数据库比对分析初步确定物种的分类地位。

1.2.2 菌株 ST37 的耐盐能力测定 对菌株的耐盐性进行分析,分别以大肠杆菌 DH5 $\alpha$  和枯草芽孢杆菌 WB600 为对照菌株。试验菌株经过夜活化转接于新鲜液体 LB 培养基中,于 30℃、200 r/min 摇床培养至菌液  $D_{600\text{ nm}}$  为 0.5,分别取培养物 1 mL 进行梯度稀释( $10^{-1} \sim 10^{-5}$ ),每个稀释度分别取 10  $\mu\text{L}$  至含有不同浓度 NaCl (0.2%、4%、6%) 的固体 LB 培养基表面,于 30℃ 培养箱中倒置培养 1 d,观察菌株在不同盐胁迫下的生长情况。

1.2.3 菌株 ST37 对油菜种子萌发的影响 用 0.1%  $\text{HgCl}_2$  对油菜种子进行消毒并清洗后,分别置于 ST37 菌悬液( $D_{600\text{ nm}}=0.5$ ) 和无菌水中浸种 1 h,待风干后置于含无菌滤纸培养皿中,每个处理 50 粒油菜种子,分别加入等体积不同浓度的盐溶液(0、50、100 mmol/L NaCl),以浸泡无菌水的种子为对照组,每个实验组设置 5 次重复。置于组培室,温度设置为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ,光照/黑暗为 16 h/8 h 处理。保持滤纸湿度,每日统计其发芽数,10 d 后统计发芽率,并测定其株高和根长。

发芽率 = (发芽种子总数/供试种子总数)  $\times$

100% ;

发芽势 = ( 前 3 d 发芽种子总数/供试种子总数) × 100% 。

1.2.4 ST37 菌株分泌 IAA 能力测定 将 ST37 菌株接种到含有 100 mg/L 色氨酸的 King 氏培养基中 (以不含色氨酸的 King 氏培养液为对照), 以加 100 μL 无菌水的培养液为空白对照, 置于 28 ℃、120 r/min 的摇床中培养 2 d。取培养物 10 000 r/min、4 ℃ 离心 10 min 的上清液 4 mL, 等体积加入比色液混匀, 在黑暗中静置 0.5 h, 立即测定  $D_{530\text{ nm}}$  值, 通过 IAA 标准曲线计算 ST37 菌株产 IAA 的量<sup>[15]</sup>。按照上述方法, 通过在 King 培养基中添加不同浓度 NaCl (0 ~ 4%) 测定盐胁迫对菌株产 IAA 能力的影响。

1.2.5 ST37 菌株其他促生能力的检测 利用 CAS 检测液分析菌株产铁载体能力<sup>[16]</sup>; 利用含钾长石的

解钾培养基检测菌株解钾能力<sup>[15]</sup>; 在 ADF 培养基上连续划线 5 次分析菌株产 ACC 脱氨酶能力<sup>[15]</sup>。

1.3 数据统计

采用 MEGA11 构建系统发育树, SPSS 26.0 对生理指标数据进行统计分析, 采用 Origin 2017 制图。

2 结果与分析

2.1 菌株 ST37 的鉴定

ST37 细菌在固体 LB 培养基中培养 24 h, 菌落呈浅黄色、圆形、边缘凸起、表面光滑; 经革兰氏染色鉴定 ST37 菌株为革兰氏阳性菌。提取 ST37 菌株基因组 DNA, 以 F27/R1492 为引物扩增 16S rDNA 片段, 测序获得 1 434 bp 序列, 经 NCBI 数据库比对分析, 鉴定该菌为运动芽孢杆菌 (*Bacillus mobilis*), 系统发育分析也显示菌株 ST37 与运动芽孢杆菌 (NR\_157731.1) 亲缘关系最近 (图 1)。

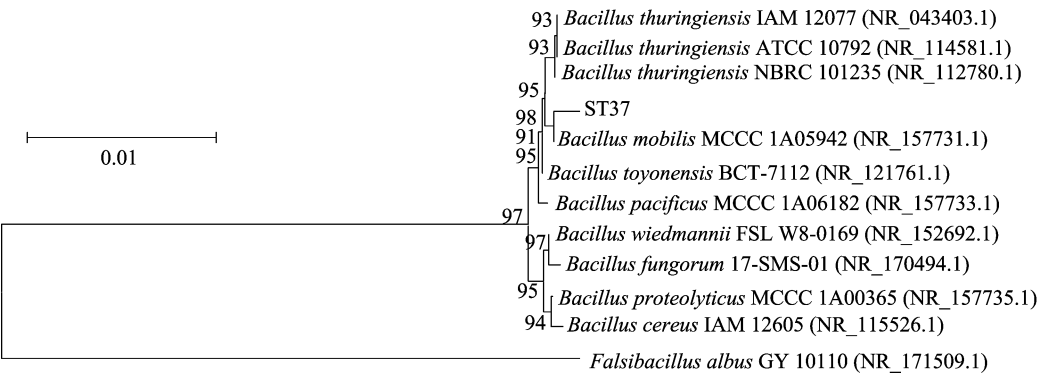


图1 基于 16S rRNA 基因序列的系统发育树分析

2.2 ST37 菌株对油菜种子萌发和幼苗生长的影响

通过种子萌发试验研究 ST37 菌株在不同 NaCl 胁迫下对油菜种子萌发的影响。结果显示, 随着盐胁迫水平的增加, 种子发芽率与发芽势随之降低。与未接菌对照相比, 接种 ST37 菌株能够促进种子的萌发。在 0、50、100 mmol/L 的盐胁迫下, 接种 ST37

菌株的发芽势比未接菌的分别提高 15. 00%、6. 67%、2. 50%; 接种 ST37 菌株的发芽率比未接菌的分别提高 0. 84%、6. 67%、4. 40% (图 2), 表明 ST37 菌株的接种对油菜种子的萌发具有一定的促进作用。结果显示, 接种 ST37 菌株的油菜株高和根长均高于未接种的对照组的油菜苗株高和根长。

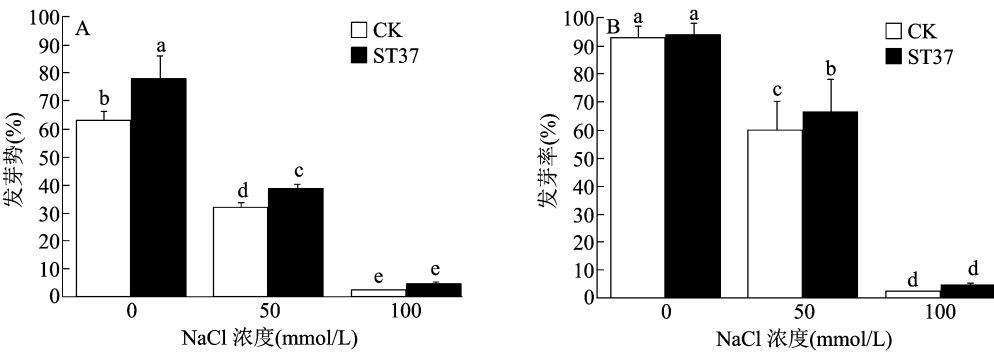


图2 盐胁迫对油菜种子发芽势(A)和发芽率(B)的影响

在 50、100 mmol/L NaCl 处理后,接种 ST37 菌株的油菜苗株高分别增加了 235.40%、217.78%,接种 ST37 菌株的油菜苗根长分别增加了 11.15% 和 100.00%。以上结果也说明 ST37 菌株能够显著提高盐胁迫下油菜苗的生物量(图 3)。

2.3 ST37 菌株的耐盐能力测定

通过比较试验菌株 ST37 和大肠杆菌 DH5α、枯

草芽孢杆菌 WB600 在不同 NaCl 胁迫下的生长状况,进而评价其耐盐能力(图 4)。结果显示,与对照菌株相比,在 2% NaCl 处理下,菌株 ST37 和枯草芽孢杆菌 WB600 生长状况一致,均优于大肠杆菌 DH5α;在 4% NaCl 处理下,ST37 菌株耐盐能力强于 DH5α 而弱于 WB600。总体而言,ST37 菌株能够耐受 2% 和 4% NaCl 胁迫,具有一定的耐盐能力。

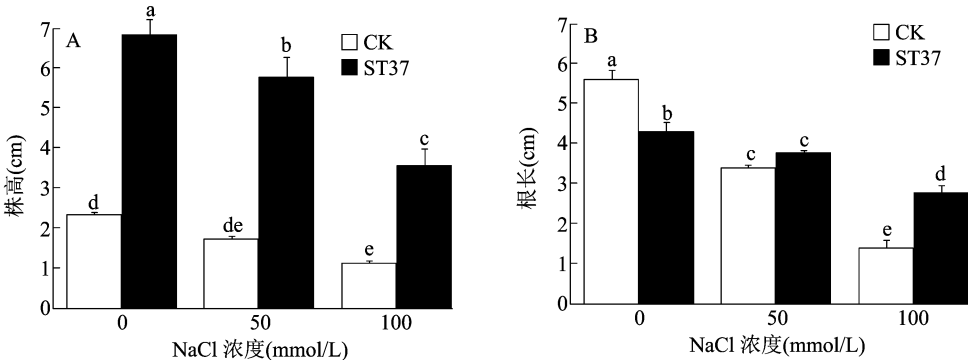


图3 盐胁迫对油菜苗株高(A)和根长(B)的影响

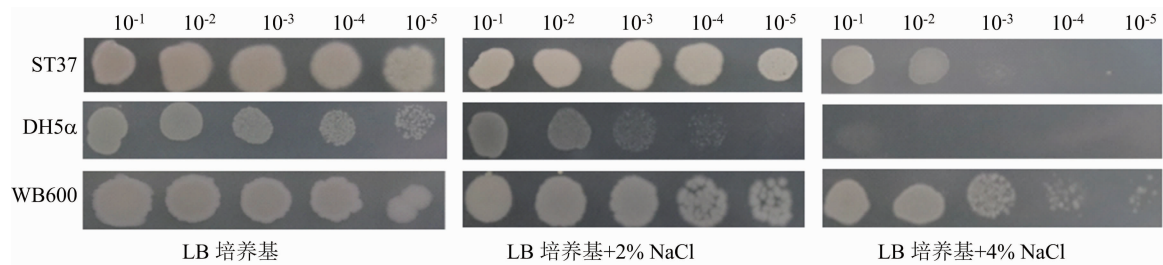


图4 菌株 ST37 的耐盐能力分析

2.4 盐胁迫下菌株 ST37 产 IAA 能力

进一步分析 ST37 菌株在不同 NaCl 胁迫下产 IAA 能力,结果显示,ST37 菌株产 IAA 能力随 NaCl 浓度的增加而显著降低。不加 NaCl 的正常培养基培养 2 d 后,其分泌 IAA 的含量为 6.82 mg/L;加入 1% NaCl 后,ST37 菌株产 IAA 能力显著降低,为不加 NaCl 对照组 IAA 含量的 57.52%,加入 3%~4% NaCl 时,其产 IAA 含量差异不显著,维持在 2.15~2.88 mg/L 之间,表明 ST37 菌株在中度盐胁迫下仍具有产 IAA 的能力(图 5)。

2.5 菌株 ST37 的促生特性分析

微生物除通过分泌 IAA 之外,还可以通过解钾、产铁载体、产 ACC 脱氨酶等方式评价其潜在促生能力。由图 6 结果显示,ST37 菌株在含有钾长石的解钾培养基上可产生明显透明圈,说明其具有分解难溶性钾盐的能力;通过与对照相比,ST37 菌株的接种导致培养液颜色变红变深,说明该菌具有一

定的产铁载体能力;在 ADF 培养基上连续接种 ST37 菌株纯培养物 5 次,依然可以正常生长,说明其具有产 ACC 脱氨酶的能力。基于上述试验结果,表明 ST37 菌株可能通过产 IAA、解钾、产铁载体、分泌 ACC 脱氨酶等方式使油菜幼苗表现出一定的耐盐促生表型。

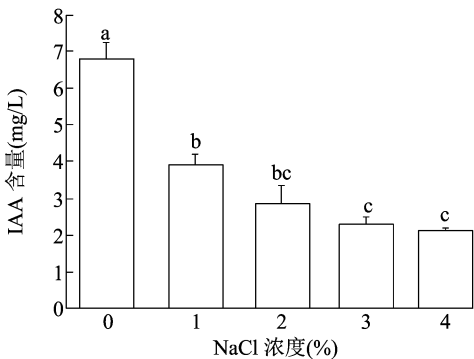
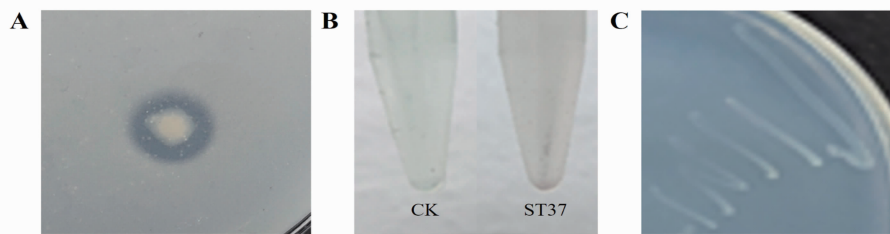


图5 不同盐浓度下菌株 ST37 分泌 IAA 的能力



A、B、C 分别表示菌株解钾、产铁载体、产 ACC 脱氨酶试验

图6 菌株 ST37 的其他促生能力

### 3 讨论

本研究试验菌株 ST37 分离自盐矿区污染的土壤中,高盐环境长期驯化使菌株产生一定的耐盐能力,本研究通过试验验证 ST37 菌株能够耐受 4% 的 NaCl,经过 16S rRNA 基因测序初步鉴定 ST37 菌株是 *Bacillus mobilis*,属于芽孢杆菌属(*Bacillus*)。目前,关于 *B. mobilis* 的研究较少;Korobov 等从含有大量除草剂土壤中分离的 *B. mobilis* 能够降解 2,4,5-三氯苯氧基乙酸,接种该菌 9 d 后能够降解培养基中 62% 的 2,4,5-三氯苯氧基乙酸,20 d 后能够有效降解土壤中的 2,4,5-三氯苯氧基乙酸,去污程度达到 58%,说明该菌株能够作为改善土壤农药的去污微生物菌剂<sup>[17]</sup>。杜慧慧等为寻找高效微生物肥料潜在菌株,从云南多叶树根际土壤中筛选出 41 株解磷细菌,经过研究发现,*B. mobilis* 是 41 株解磷细菌中溶磷能力最强的菌株,说明 *B. mobilis* 在去污、促生等方面具有一定的潜力<sup>[18]</sup>。

种子萌发是植物生长周期中最基本和最重要的阶段,也是对盐胁迫最为敏感的时期<sup>[8]</sup>。土壤中盐分积累导致渗透势增加,不利于种子吸收水分,阻碍种子内部核酸和蛋白质代谢<sup>[19]</sup>,影响内源激素合成,从而抑制种子萌发<sup>[20-21]</sup>。大量研究表明,在盐胁迫下,接种耐盐 PGPR 可以促进种子萌发。本研究通过接种 ST37 菌株能够有效缓解低盐浓度(50 mmol/L NaCl)对油菜种子萌发的毒害作用,对种子的发芽率、发芽势以及株高、根长等均有显著的增益和改善作用。然而在高盐胁迫下,ST37 菌株缓解盐胁迫的作用下降或不明显,这与前人的研究结果<sup>[22]</sup>基本一致。有研究表明,接种耐盐 PGPR 可以有效促进植物根系对土壤矿质营养物质的吸收和利用,增强植物体内的离子平衡,增加植物种子对水分的吸收和利用能力,从而促进植物种子的萌发;但是过高的盐胁迫会导致种子胚细胞破裂,植

物体内代谢失调,造成核酸蛋白合成受阻及毒素积累等,从而导致耐盐 PGPR 缓解盐胁迫能力下降<sup>[23]</sup>。

耐盐 PGPR 通过自身代谢产生植物激素(如 IAA 等)、分泌 ACC 脱氨酶、产铁载体等多种促生活性物质,或者具有将难溶性钾、磷转变为植物易吸收的可溶性钾和磷的能力,从而促进植物生长。IAA 能促进植物细胞生长,使细胞的体积和质量增加,也是调节植物生长发育全过程的信号物质<sup>[24]</sup>。研究表明,在处于高盐等逆境条件下,植物自身合成 IAA 的能力受到抑制,外源 IAA 的介入能促进植物种子萌发和幼苗生长,从而增强植物对逆境的适应能力<sup>[25]</sup>;Li 等从盐碱地获得 1 株分泌 IAA 的阴沟肠杆菌能够显著促进油菜幼苗的生长,也证明了 PGPR 分泌的 IAA 能显著促进植物的生长<sup>[11]</sup>。本研究中 ST37 菌株不仅是中度耐盐菌,而且在不同盐浓度下能分泌 IAA,从而在不同盐胁迫下促进植物种子萌发和幼苗的生长,这与前人研究结果基本一致。研究发现,利用可合成 ACC 脱氨酶的细菌可以增强水稻在盐胁迫下的生长<sup>[26]</sup>;陈小娟等从滨海盐碱地根际土壤样品中分离出 2 株芽孢杆菌,均具有分泌 IAA、产铁载体等促生能力,与施用普通有机肥相比,施用这 2 株菌的微生物肥料均能显著增加玉米产量<sup>[27]</sup>。综上,本研究中 ST37 菌株具有解钾、分泌 IAA、产铁载体、产 ACC 脱氨酶等促生特性,且能在 4% NaCl 的盐环境中生存,说明该菌株在盐胁迫中具有促进植物生长的潜力,其可能通过以上一种或多种方式促进油菜种子萌发和幼苗生长,然而,对于该菌详细的促生机制有待于进一步探究。

### 4 结论

本研究菌株 ST37 经初步鉴定为 *Bacillus mobilis*,具有耐受 4% NaCl、产 IAA、解钾、产铁载体、产 ACC 脱氨酶等能力。在盐胁迫下,ST37 菌株

能够促进油菜种子萌发和油菜幼苗的生长,说明该菌株具有一定的耐盐促生特性。本研究 ST37 菌株可作为植物促生菌的理想候选菌株,在改善和修复盐碱地方面具有一定的应用潜力。

#### 参考文献:

- [1] Zhang H X, Xiang Y, Irving L J, et al. Nitrogen addition can improve seedling establishment of *N* - sensitive species in degraded saline soils[J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30 (2) : 119 - 127.
- [2] Egamberdieva D, Wirth S, Bellingrath - Kimura S D, et al. Salt - tolerant plant growth promoting rhizobacteria for enhancing crop productivity of saline soils [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10:2791.
- [3] Lakhdar A, Rabhi M, Ghnaya T, et al. Effectiveness of compost use in salt - affected soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 171 (1/2/3) : 29 - 37.
- [4] 孙 培, 王 罡, 张亚楠, 等. 一种耐盐促生菌筛选、鉴定及对玉米幼苗生长的影响[J]. *生物技术通报*, 2019, 35(8) : 27 - 33.
- [5] Fita A, Rodríguez - Burruez A, Boscaiu M, et al. Breeding and domesticating crops adapted to drought and salinity: a new paradigm for increasing food production[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6:978.
- [6] Wang W X, Vinocur B, Altman A. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance[J]. *Planta*, 2003, 218(1) : 1 - 14.
- [7] 张银翠, 姚 拓, 赵桂琴, 等. 耐盐促生菌筛选鉴定及对盐胁迫燕麦生长的影响[J]. *草地学报*, 2021, 29(12) : 2645 - 2652.
- [8] 潘 晶, 黄翠华, 彭 飞, 等. 植物根际促生菌诱导植物耐盐促生作用机制[J]. *生物技术通报*, 2020, 36(9) : 75 - 87.
- [9] 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.
- [10] Goswami D, Pithwa S, Dhandhukia P, et al. Delineating *Kocuria turfanensis* 2M4 as a credible PGPR: a novel IAA - producing bacteria isolated from saline desert [J]. *Journal of Plant Interactions*, 2014, 9(1) : 566 - 576.
- [11] Li H S, Lei P, Pang X, et al. Enhanced tolerance to salt stress in canola ( *Brassica napus* L. ) seedlings inoculated with the halotolerant *Enterobacter cloacae* HSNJ4[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 119:26 - 34.
- [12] Sun F, Ou Q J, Wang N, et al. Isolation and identification of potassium - solubilizing bacteria from *Mikania micrantha* rhizospheric soil and their effect on *M. micrantha* plants[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 23: e01141.
- [13] Grichko V P, Glick B R. Amelioration of flooding stress by ACC deaminase - containing plant growth - promoting bacteria[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2001, 39(1) : 11 - 17.
- [14] 周 波, 代金霞. 柠条根际产铁载体促生菌的分离鉴定及其促生特性[J]. *北方园艺*, 2017(21) : 122 - 129.
- [15] 王 丹, 赵亚光, 张风华. 耐盐促生菌筛选、鉴定及对盐胁迫小麦的效应[J]. *麦类作物学报*, 2020, 40(1) : 110 - 117.
- [16] 王 平, 董 彪, 李卓棣, 等. 小麦根围细菌铁载体的检测[J]. *微生物学通报*, 1994, 21(6) : 323 - 326.
- [17] Korobov V V, Zhurenko E I, Zharikova N V, et al. Application of the new degrader strain *Bacillus mobilis* 34<sup>T</sup> for soil treatment from 2, 4, 5 - trichlorophenoxyacetic acid [J]. *Moscow University Biological Sciences Bulletin*, 2019, 74(3) : 154 - 157.
- [18] 杜慧慧, 朱芙蓉, 杨 敏, 等. 不同生境滇重楼根际解磷菌的筛选与鉴定[J]. *中国中药杂志*, 2021, 46(4) : 915 - 922.
- [19] Habib S H, Kausar H, Saud H M. Plant growth - promoting rhizobacteria enhance salinity stress tolerance in okra through ROS - scavenging enzymes [J]. *BioMed Research International*, 2016, 2016:6284547.
- [20] 严青青, 张巨松, 李星星, 等. 盐碱胁迫对海岛棉种子萌发及幼苗根系生长的影响[J]. *作物学报*, 2019, 45(1) : 100 - 110.
- [21] 赵 嫚, 陈仕勇, 李亚萍, 等. 外源 GABA 对盐胁迫下金花菜种子萌发及幼苗抗氧化能力的影响[J]. *江苏农业学报*, 2021, 37(2) : 310 - 316.
- [22] 王 楠, 王卫卫, 张 洁, 等. 盐胁迫对氢氧化细菌 WMQ7 浸种小麦萌发和生长的影响[J]. *西北植物学报*, 2011, 31(10) : 2065 - 2070.
- [23] 傅 蕾, 李 霞, 高 璐, 等. 盐胁迫下泛菌属内生细菌对杂交狼尾草发芽及生理的影响[J]. *草业科学*, 2017, 34(10) : 2099 - 2108.
- [24] Sun S L, Yang W L, Fang W W, et al. The plant growth - promoting rhizobacterium *Variovorax boronicumulans* CGMCC 4969 regulates the level of indole - 3 - acetic acid synthesized from indole - 3 - acetonitrile[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2018, 84(16) : e00298 - e00218.
- [25] 高 阳, 朱双丽, 吴庆珊, 等. 金钗石斛 IAA 内生细菌筛选及对干旱胁迫下玉米种子萌发的影响[J]. *种子*, 2017, 36(4) : 36 - 41.
- [26] 刘 鹏, 毕江涛, 罗成科, 等. 耐盐菌对盐胁迫下水稻种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(2) : 246 - 256.
- [27] 陈小娟, 刘铠鸣, 宣明刚, 等. 增强作物耐盐胁迫能力的根际促生菌筛选、鉴定及田间应用效果[J]. *南京农业大学学报*, 2020, 43(3) : 452 - 459.