

特基拉芽孢杆菌 Bt-RS 对盐胁迫环境下香蕉幼苗生长的影响

冯钲权^{1,2,3}, 邓 娜^{1,2,3}, 李启彪³, 孙靖然^{1,2,3}, 胡永华^{2,3}, 莫坤联^{2*}

1. 海南大学生命健康学院, 海南海口 570228; 2. 中国热带农业科学院热带生物技术研究所/海南热带农业资源研究院/海南省热带农业资源保护与利用重点实验室, 海南海口 571101; 3. 中国热带农业科学院湛江实验站, 广东湛江 524013

摘 要: 土壤盐渍化是世界性生态环境问题, 是阻碍作物生长并致使农业生产损失的潜在非生物胁迫因子之一。利用植物根际促生菌促进植物生长, 提高植物耐盐性, 缓解植物所受的非生物胁迫被视为 1 种新兴有效可行方法。本研究以实验室前期于南海岛礁根际土壤中分离到的 1 株特基拉芽孢杆菌 (*Bacillus tequilensis*) Bt-RS 为研究对象, 利用功能培养基对其耐盐特性和耐盐促生性状进行定性定量分析, 并进一步通过土壤盆栽实验评价该菌株在盐胁迫环境下对香蕉幼苗生长的影响。研究结果显示: Bt-RS 菌株能够在 NaCl 含量为 0~10% 的条件下生长, 能耐受多种类型盐分, 具有产 1-氨基环丙烷-1-羧酸 (1-aminocyclopropane-1-carboxylate, ACC) 脱氨酶能力; 在 1%~5% 的 NaCl 浓度下能够分泌植物生长素吲哚-3-乙酸 (indole-3-acetic acid, IAA), 最大产量值为 6.4 mg/L。盆栽实验结果显示: 在正常条件下, 接种菌株 Bt-RS 的香蕉幼苗相比未接种菌株其株高、叶面积、地上部分鲜重、地下部分鲜重、地上部分干重、地下部分干重分别提高 40.30%、93.00%、102.38%、81.08%、65.82%、50.50%; 在 200 mmol/L 盐胁迫环境下, 接种菌株 Bt-RS 的香蕉幼苗与对照组相比在株高、叶面积、地上部分鲜重、地下部分鲜重、地上部分干重、地下部分干重方面分别提高 20.55%、65.01%、98.14%、144.93%、87.85%、54.01%; 在正常条件与盐胁迫下接种菌株均能显著提高香蕉幼苗的株高、叶面积以及生物量 ($P < 0.05$), 盐胁迫环境下的实验组与正常条件下的对照组相比在株高和叶面积上均无显著差异, 因此通过施用菌株 Bt-RS 能够有效缓解 NaCl 对香蕉幼苗的胁迫, 促进香蕉幼苗的生长。综上结果表明, 特基拉芽孢杆菌 Bt-RS 具有较强的耐盐性以及产 IAA 和 ACC 能力, 能够促进香蕉幼苗生长并在盐胁迫环境下显著提高植物耐盐性, 可为开发与利用盐渍土提供菌株资源。

关键词: 土壤盐渍化; 植物根际促生菌; 盐胁迫; 香蕉幼苗; 耐盐促生; 特基拉芽孢杆菌

中图分类号: S668.1 文献标志码: A

Effect of *Bacillus tequilensis* Bt-RS on the Growth of Banana Seedling under Salt Stress

FENG Zhengquan^{1,2,3}, DENG Na^{1,2,3}, LI Qibiao³, SUN Jingran^{1,2,3}, HU Yonghua^{2,3}, MO Kunlian^{2*}

1. School of Life and Health Sciences, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Institute of Tropical Bioscience and Biotechnology, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Hainan Institute for Tropical Agricultural Resources / Key Laboratory of Biology and Genetic Resources of Tropical Crops of Hainan Province, Haikou, Hainan 571101, China; 3. Zhanjiang Experimental Station, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang, Guangdong 524013, China

Abstract: Soil salinization is an ecological environment issue globally and is one of the major abiotic stress factors that cause crop loss worldwide as well as hindering crop productivity. Halotolerant plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) having potential to promote crop growth and increase salt tolerance in crops can be employed to counter this issue in a more effective and eco-friendly way. The recent study aimed to assess the salinity tolerance and growth-promoting capacity of *Bacillus tequilensis* Bt-RS isolated from the rhizosphere soil of islands in the South China Sea, for assessment, the corresponding media were used for qualitative and quantitative analysis. A pot trail was also

收稿日期 2023-11-01; 修回日期 2023-11-23

基金项目 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (No. 1630102023002)。

作者简介 冯钲权 (1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 微生物。*通信作者 (Corresponding author): 莫坤联 (MO Kunlian), E-mail: mokunlian@163.com。

conducted to further evaluated its bacterial consortium to promote banana seedlings growth under salinity stress. The results showed that strain Bt-RS could grow well under the condition of 0–10% NaCl content with various types of salts. The strain Bt-RS also possessed 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) deaminase activity along with indole acetic acid (IAA, up to 6.4 mg/L under the condition of 1%–5% NaCl). Base on the pot experiment, the banana seedlings that were inoculated with Bt-RS displayed a significant increase in height, leaf area, fresh weight of above ground and underground, as well as dry weight of above ground and underground (40.30%, 93.00%, 102.38%, 81.08%, 65.82% and 50.50%, respectively) compared to the control group under normal conditions; The 200 mmol/L NaCl-stress treatment significantly increased the growth of banana seedlings in height, leaf area, fresh and dry weight of both above ground and underground by 20.55%, 65.01%, 98.14%, 144.93%, 87.85% and 54.01% respectively, when compared with the control group. The plant height, leaf area and biomass of banana seedlings were significantly increased in both normal conditions and salt stress environment ($P<0.05$). There was no difference in plant height and leaf area between the experimental group under salt stress environment and the control group under normal conditions, indicating that applying Bt-RS can alleviated the adverse effects of NaCl stress and enhanced banana seedlings growth attributes. In conclusion, the strain *B. tequilensis* Bt-RS exhibits high salt tolerance and possess the ability to produce IAA and ACC deaminase, making it a valuable strain for improving banana seedling growth and salt tolerance, and also providing resources of strain for developing and utilizing in saline soil.

Keywords: soil salinization; plant growth-promoting rhizobacteria; salt stress; banana seeding; salt tolerance and growth promotion; *Bacillus tequilensis*

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.08.010

土壤盐渍化现象是当下普遍存在的环境问题，是制约农业生产力的主要因素之一^[1]。我国盐渍化土地具有面积大、分布广、类型多等特点^[2]，在内陆及沿海地区均有分布，并呈现出持续扩大的趋势，如海南等沿海地区常因台风天气导致海水倒灌而引发土壤盐渍化，严重影响农业的可持续发展。

盐胁迫对植物生长的影响主要体现在渗透胁迫和离子毒害，进而造成植物代谢紊乱，严重影响植物形态及生理生化功能^[3]，且对土壤理化环境产生一定破坏，不利于作物的可持续发展。植物在盐胁迫环境下最先遭受渗透胁迫，高浓度离子环境造成植物细胞内外渗透压失衡，植物体内水分流失且难以吸收水分，从而出现生理性干旱，抑制根茎成长^[4]，导致叶片枯萎。盐胁迫环境下大量 Na^+ 与 Cl^- 在植物组织内积累，导致 Na^+/K^+ 比值失衡，抑制植物对其他矿物质元素和必需营养物质的吸收^[5]，并积累大量的活性氧自由基于植物体内，过量的活性氧在植物体内造成蛋白质、DNA、脂质的氧化损伤，抑制植物生长^[6]。

香蕉 (*Musa* spp.) 作为热带地区的重要经济作物，是我国具有国际竞争力的优势农产品之一。香蕉属于盐敏感作物，蒋晶^[7]研究发现香蕉幼苗在盐胁迫环境下会导致其生长缓慢，叶片萎靡并出现灼烧状褐斑等。随着海水倒灌等因素，土壤盐渍化问题不断扩大，土壤中过量的盐分会导致

香蕉生长缓慢，造成香蕉产量的严重损失^[8]，严重影响香蕉产业发展。

由于土壤盐渍化对于可利用耕地和作物的危害日益加剧，盐渍土的改良与利用问题亟需解决。治理土壤盐渍化措施主要有修复盐渍土、基因育种和应用微生物菌剂 3 种。传统治理盐渍土分为物理和化学 2 种方法，但施用化学改良剂、水利工程改良和更改灌溉方式等方法存在工程量大，成本高以及可能改变生态平衡等问题^[9]。选育耐盐品种也是改善香蕉在盐胁迫环境下生长的一个关键途径^[10]，但通过杂交育种或基因改造的方法提高植物耐盐性复杂且耗时耗力。近年来有研究提出施加微生物菌剂改善盐渍地土壤是一项经济且环保的理想方法，通过利用植物根际促生菌与植物互作，增强植物应对非生物胁迫逆境的能力、改善土壤生态环境^[11]。应用微生物菌剂诱导植物抗逆促生可以避免繁琐且高成本的工程操作，已经成为近年的研究热点^[12]，具有极大的研究与应用潜力。

植物促生菌 (plant growth promoting rhizobacteria, PGPR) 是指定殖于植物根际土壤中，具有促进植物生长特性，抑制病原菌及改善土壤环境的有益微生物^[13-14]。盐胁迫环境下植物对土壤中氮、磷、钾等养分的吸收和积累减少，而 PGPR 能够通过自身特性改善植物的营养吸收和转运^[15]，促进植物生长。PGPR 通常具有产生植物生长素吲哚-3-乙酸 (IAA) 的能力，促进植物根系生长

以便吸收土壤中养分^[16]。此外, PGPR 还具有固氮、解钾、溶磷、产生铁载体等能力^[17], 提高土壤中速效氮、速效钾、速效磷等养分含量以便植物吸收。植物在胁迫环境下通常会释放过量的乙烯, 低浓度的乙烯可以促进植物生长, 但过量乙烯的存在会抑制植物生长甚至使之死亡^[18], PGPR 通过产生氨基环丙烷羧酸 (ACC) 脱氨酶降解植物在胁迫环境产生的乙烯前体—氨基环丙烷羧酸 (ACC), 从而降低植物体内乙烯含量^[19], 提高植物抗逆性。

芽孢杆菌属 (*Bacillus*) 是一类产芽孢的杆状革兰氏阳性菌, 在自然环境中广泛存在, 具有优良的抗逆能力且多数无毒无害可防可控。芽孢杆菌能够产生多种抗菌素维持自身的生态优势位, 逐渐在植物根际生态位中成为优势菌株^[20]。部分芽孢杆菌因其能够缓解盐胁迫的有害影响, 调节促进植物生长, 成为当下新兴的研究热点, 如安婉宁^[21]应用海洋生境贝莱斯芽孢杆菌 CT2628 在 180 mmol/L 盐胁迫下可以降低植物膜透性, 通过提高植物抗氧化酶活性来诱导水稻耐盐; ALI 等^[22-23]分别在 0、300、600、900 mmol/L 盐胁迫环境下接种苏云金芽孢杆菌 (*B. thuringiensis*) PM25 和蕈状芽孢杆菌 (*B. mycoides*) PM35, 能够提高玉米的茎部与根部生物量。芽孢杆菌属在农业生产中有重要地位, 多种芽孢杆菌 PGPR 早已广泛应用于小麦^[5]、辣椒^[20]、棉花^[24]等作物的促生、抗逆、抗病上, 但关于特基拉芽孢杆菌 (*B. tequilensis*) 及其应用在香蕉上的研究较少, 因此本研究在盐胁迫环境下将特基拉芽孢杆菌 Bt-RS 接种于香蕉幼苗根系, 评价其在盐胁迫环境下对香蕉幼苗耐盐性影响, 为探索新菌种利用及盐渍土资源开发利用提供有效方法。

海洋环境复杂多样, 具有丰富且未开发的微生物资源, 因海洋生境的特殊性, 海洋微生物通常具有耐受极端环境的能力。本研究以实验室前期从岛礁根际土壤环境分离出的一株特基拉芽孢杆菌 Bt-RS 为研究对象, 初步探究该菌的耐盐特性及在盐胁迫环境下对香蕉幼苗的促生效果, 为后续深入探究其耐盐促生机制和微生物菌剂研发提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试菌株 供试菌株为特基拉芽孢杆菌

(*Bacillus tequilensis*) Bt-RS, 由本实验室前期于南海永兴岛礁银毛树根际土壤中分离并保存。枯草芽孢杆菌 WB00 和杀鱼爱德华氏菌 2F 为本课题组保存的菌株, 作为耐盐特性实验对照菌株。

1.1.2 供试香蕉品种 供试香蕉品种为巴西蕉 (*Musa AAA Cavendish* var. Brazil), 其组培袋育苗购自中国热带农业科学院组培中心, 选取生长期相近, 株高约 10 cm 的幼苗。盆栽实验种植于中国热带农业科学院热带生物技术研究三所三楼平台。

1.1.3 培养基 LB 培养基: 胰蛋白胨 10 g, 酵母粉 5 g, NaCl 10 g, pH 7.0±0.2, 无菌蒸馏水定容至 1 L, 固体培养基添加琼脂粉 20 g, 于 121 °C 高压灭菌 20 min; 基础发酵培养基: 豆粕粉 40 g, 玉米粉 15 g, 糖蜜 15 g, K₂HPO₄ 1 g, KH₂PO₄ 1 g, 无水 CaCl₂ 2 g, 无菌蒸馏水定容至 1 L, 于 121 °C 高压灭菌 20 min; IAA 检测培养基: 将色氨酸溶于超纯水, 0.22 μm 除菌过滤器过滤后加入灭菌后的 LB 培养液, 使色氨酸终浓度为 100 mg/L; DF 培养基: KH₂PO₄ 4 g, Na₂HPO₄ 6 g, MgSO₄·7H₂O 0.2 g, FeSO₄·7H₂O 0.2 g, 葡萄糖 2 g, 葡萄糖酸 2 mL, 柠檬酸 2 g, 微量元素 (MoO₃ 10 mg, H₃BO₃ 10 mg, MnSO₄·H₂O 11.19 mg, CuSO₄·5H₂O 78.22 mg, ZnSO₄·7H₂O 124.6 mg, 溶于 100 mL 无菌蒸馏水) 100 μL, pH 7.0±0.2, 无菌蒸馏水定容至 1 L, 固体培养基添加 20 g 琼脂粉, 于 121 °C 高压灭菌 20 min; ADF 培养基: 将 ACC (氨基环丙烷羧酸) 溶于超纯水, 用 0.22 μm 滤膜过滤除菌, 加入不含 (NH₄)₂SO₄ 且预先灭菌的 DF 培养基中, pH 7.0±0.2, 使 ACC 的终浓度为 3.0 mmol/L。

1.2 方法

1.2.1 发酵液处理 种子液制备: 将活化后的 Bt-RS 菌株接种于 LB 培养液, 于 37 °C, 200 r/min 条件培养过夜。发酵液制备: 将 Bt-RS 种子液以 1:100 比例接入基础发酵培养基内, 于 37 °C, 200 r/min 条件下发酵 48 h, 培养菌液浓度至 10⁸ CFU/mL。

1.2.2 菌株 Bt-RS 耐盐特性 (1) 菌株耐盐性。从 LB 培养基上挑取活化后的菌株转接至盐浓度分别为 0、2%、4%、6%、8%、10% 的 LB 培养液中, 在 37 °C、200 r/min 条件下培养, 每隔 2 h, 检测 OD₆₀₀ 值, 使用高通量微生物生长曲线分析仪 Bioscreen FP-1100-C 绘制生长曲线。

(2) 不同 NaCl 浓度对菌株形态的影响。通过对菌株在不同盐浓度平板上的生长状态进行评

估,以枯草芽孢杆菌 WB00 为对照菌株。菌株接种于 LB 培养液,于 37 °C,200 r/min 条件下培养过夜。取出菌液,调整菌液 OD₆₀₀ 值为 0.5,再分别稀释成 5 个浓度梯度 (10⁻¹、10⁻²、10⁻³、10⁻⁴、10⁻⁵),各取 1 μL 点接至含有不同盐浓度 (1%、3%、5%) 的 LB 平板上,于 37 °C 倒置培养 1 d,观察其生长状态。

(3) 不同类型无机盐对菌株生长的影响。向无 NaCl 的 LB 培养基中分别添加 NaNO₃、NaNO₂、Na₂CO₃、NaHCO₃、NaCl、KCl、MgCl₂、CaCl₂ 等 8 种无机盐,控制培养基中添加 Na⁺ 或 Cl⁻ 浓度均为 0.17 mol/L。以 1% 接种量接种 Bt-RS 菌株,于 37 °C,180 r/min 摇床培养 24 h 后检测菌液 OD₆₀₀ 值,评估菌株对不同类型无机盐的耐受能力。

1.2.3 菌株 Bt-RS 促生潜能 (1) 产 ACC 脱氨酶定性检测。参考孙建光等^[25]的方法,将 Bt-RS 菌株稀释涂布于 ADF 固体培养基上,于 28~30 °C 倒置培养 2~5 d,观察菌株生长状态,若能在 ADF 平板上生长,则表示该菌株能够利用 ACC 作为氮源,具有产 ACC 脱氨酶的能力。

(2) 产 IAA 能力测定。配置 IAA 标准曲线:将浓度为 100 mg/L IAA 溶液稀释成 0、10、20、30、40、50 mg/L 六个浓度梯度,分别加入 Salkowski 显色液,暗处避光放置 30 min 显色,测定 OD₅₃₀ 值,以 IAA 浓度为 X 轴,OD₅₃₀ 值为 Y 轴绘制标准曲线。将 Bt-RS 菌株取 100 μL 接种至含有 100 mg/L 色氨酸的 5 mL LB 培养液中,37 °C,200 r/min 培养 48 h 后在 8000 r/min 的条件下离心 10 min,取上清液加入等体积 Salkowski 显色液,暗处避光放置 30 min 显色,测定 OD₅₃₀ 值。以不加菌的含色氨酸 LB 培养液作空白对照 (CK),按照上述方法,通过在含色氨酸 LB 培养液中添加不同浓度的 NaCl (1%、3%、5%) 测定盐胁迫对菌株产 IAA 能力的影响。

1.2.4 菌株 Bt-RS 在盐胁迫环境下对香蕉幼苗促生作用 (1) 盆栽实验。采用盆栽土培模式,共设 4 个处理,每个处理 10 株重复。施加 Bt-RS 发酵液为实验组,施加基础发酵培养基作为对照组,浇灌 200 mmol/L NaCl 溶液以模拟盐胁迫环境。香蕉幼苗移栽定植 7 d 后,实验组每隔 7 d 浇灌 1 次 Bt-RS 发酵液,每次 50 mL/株,连续 7 次;第一次浇灌发酵液 5 d 后开始添加 NaCl 溶液,每隔 2 d 添加 1 次 NaCl 溶液,每次 100 mL/株;对照组浇灌相应的发

酵培养基和清水。各处理组如下:

① CK0: 清水+发酵培养基; RS0: 清水+Bt-RS 发酵液;

② CK200: 200 mmol/L NaCl+发酵培养基; RS200: 200 mmol/L NaCl+Bt-RS 发酵液。

(2) 生长指标记录。首次浇灌盐水记为 0 d,每 7 d 测量株高,在实验末期测量处理组与对照组香蕉苗株高、叶长、叶宽、及生物量 (鲜重、干重) 指标。各指标测量标准如下: ① 株高,基部到最新完全展开叶与株茎的交叉点距离^[26]; ② 叶长,最新完全展开叶的最长部位距离; ③ 叶宽,最新完全展开叶的最长部位距离; ④ 叶面积=叶长×叶宽×0.75^[27]; ⑤ 植物生物量鲜重,取地上部分 (叶、茎) 和地下部分 (根) 分别用清水清洗干净后称量; 干重,取地上、地下部分于烘箱 105 °C 杀青 30 min,75 °C 烘干至恒重后称量。

1.3 数据处理

使用 Excel、SPSS 23 软件进行实验数据处理与差异显著性分析,采用 Graphpad prism 8 软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 菌株 Bt-RS 耐盐特性

2.1.1 菌株耐盐能力的测定 Bt-RS 在不同 NaCl 环境中的生长情况如图 1 所示,在 0~10% 盐浓度条件下菌株均能生长,随着培养基中盐浓度增加,菌株 Bt-RS 的生长逐渐受到抑制。菌株在盐浓度 0~6% 时停滞期较为短暂,约 2 h;而在 8% 和 10% 盐浓度时停滞期将近 4 h,表明菌株需要更长的时间去适应高浓度的盐环境。停滞期后,菌株进入指数生长期,菌株迅速生长,无盐时菌株约在 16 h 进入生长稳定期,2% 盐浓度时约在 26 h 进入生长

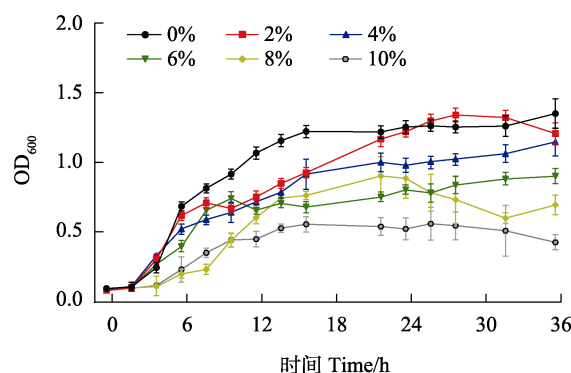


图 1 0~10% NaCl 浓度下菌株 Bt-RS 生长曲线

Fig. 1 Strain Bt-RS growth curve at 0~10% salt concentration

稳定期, 4%盐浓度时约在 20 h 进入稳定期。结果表明菌株 Bt-RS 能够在 0~10%的盐浓度下生长, 在 0~6%盐浓度环境中生长较好, 在 8%~10%盐度下生长变缓, 其耐盐阈值约在 10%~12%盐度具有良好的耐盐能力。

2.1.2 不同 NaCl 浓度对菌株形态的影响 以枯

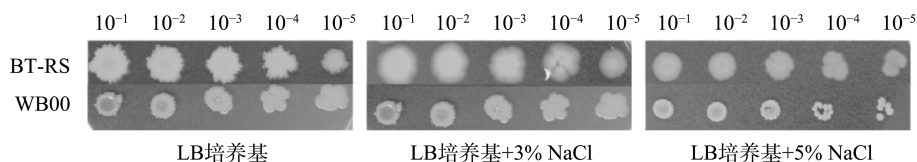
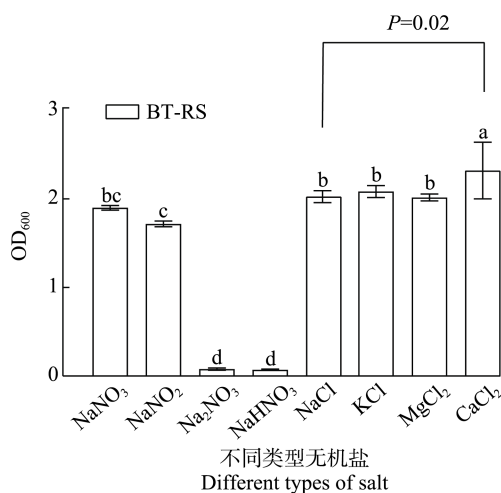


图 2 菌株 Bt-RS 在不同盐胁迫下的生长状态

Fig. 2 Growth status of strain Bt-RS under different salt stresses

2.1.3 不同类型无机盐对菌株生长的影响 不同类型无机盐对菌株 Bt-RS 生长影响如图 3 所示, 菌株 Bt-RS 在含有 NaNO_2 (1.730 ± 0.02)、 NaNO_3 (1.910 ± 0.01)、 KCl (2.085 ± 0.03)、 MgCl_2 (2.017 ± 0.02) 培养基中培养 24 h 后, 其生长量与 NaCl (2.024 ± 0.09) 培养基的生长量差异不显著, 说明 Bt-RS 能够耐受并利用多种类型无机盐。但在含有 Na_2CO_3 和 NaHCO_3 的培养基中 Bt-RS 的 OD_{600} 值分别仅为 0.079 ± 0.01 、 0.071 ± 0.01 , 说明这 2 种无机盐对菌株 Bt-RS 生长具有明显的抑制作用。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$)

图 3 不同类型无机盐对菌株 Bt-RS 生长的影响

Fig. 3 Strain Bt-RS growth under different types of salts

在含有 CaCl_2 的培养基中, 菌株 Bt-RS 的 OD_{600} 值为 2.322 ± 0.16 , 生长量显著优于 NaCl 培养基 ($P < 0.05$), 说明 CaCl_2 能有效促进菌株生长, 可能是因为 Ca^{2+} 是多种酶的激活剂, 并对细胞通

草芽孢杆菌 WB00 作为对照, 比较 2 株菌株在不同盐浓度 LB 平板上菌株生长状态, 评价其耐盐能力。在 3% NaCl 处理下, 2 株芽孢杆菌生长状况相近, 但在中度盐胁迫 (5% NaCl) 处理下, 菌株 Bt-RS 长势良好, 优于 WB00 (图 2), 结果表明 Bt-RS 具有良好的耐盐性。

透性起到影响, 从而促进菌株生长。综上所述, 菌株 Bt-RS 可以耐受多种类型的盐分, 具有在盐渍土环境下生存的潜力。

2.2 菌株产 ACC 脱氨酶定性检测

胁迫环境下植物自身产生过量乙烯加速衰老, PGPR 可以通过产生 ACC 脱氨酶降解植物体内乙烯合成前体 ACC (氨基环丙烷羧酸), 从而缓解植物衰老死亡^[18]。将菌株涂布于 ADF 培养基上, 培养 2 d 后, 发现菌株 Bt-RS 能够在以 ACC 为唯一氮源的 ADF 培养基平板上生长出明显的菌落, 而菌株 2F 在 ADF 培养基上不生长 (图 4), 表明菌株 Bt-RS 能够利用 ACC 作为唯一氮源生长, 可能是由于产生 ACC 脱氨酶将植物体内乙烯合成前体 ACC 降解为氨和 α -丁酮酸。

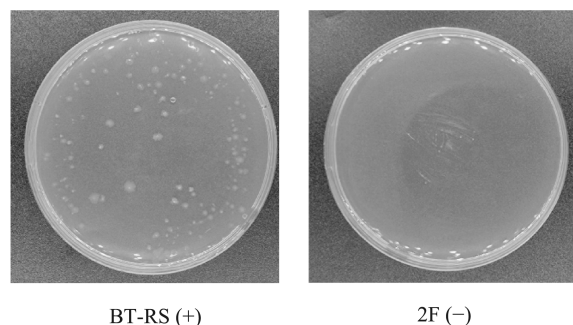
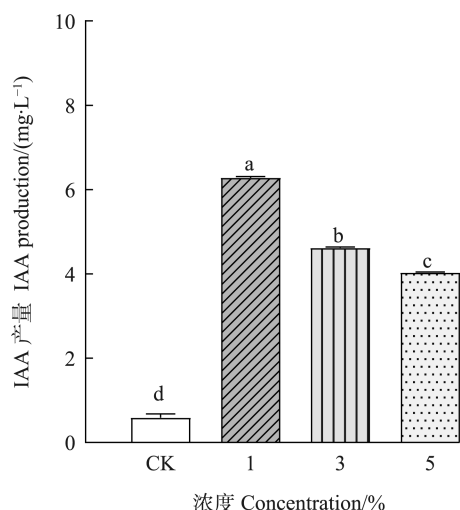


图 4 菌株 Bt-RS 在 ADF 培养基上的生长状态

Fig. 4 Strain Bt-RS grown in ADF medium

2.3 菌株在盐胁迫环境下产 IAA 能力

IAA 是可受 PGPR 调控的重要植物生长激素, 可促进植物根系发育和改变根系结构^[16]。本研究通过 Salkowski 显色法检测菌株在不同 NaCl 浓度下的产 IAA 能力。结果如图 5 所示, 在含有 100 mg/L 色氨酸的正常 (1% NaCl) LB 培养液培养 2 d 后,



CK: 无菌对照; 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

CK: Non-strain control; Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

图 5 菌株 Bt-RS 在盐胁迫环境下产 IAA 能力

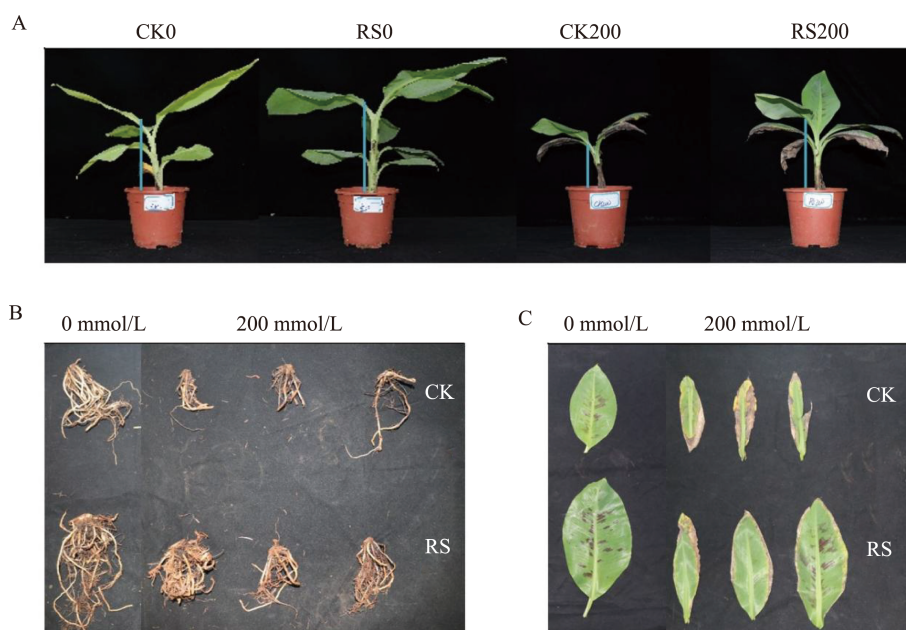
Fig. 5 Ability of strain Bt-RS to produce IAA under salt stress environment

菌株 Bt-RS 产生的 IAA 含量为 6.4 mg/L, 而在 3%、5% NaCl 浓度下, 其分泌 IAA 含量分别下降至

4.63 mg/L 和 4.03 mg/L。菌株产生 IAA 能力随着盐浓度增加而降低, 但在中度盐胁迫 (5% NaCl) 下仍能够产生生长素, 表明菌株 Bt-RS 在盐胁迫环境下具备促生的潜能。

2.4 菌株 Bt-RS 在盐胁迫环境下对香蕉幼苗的促生作用

综上所述结果表明, 菌株 Bt-RS 可能通过自身产 IAA 和 ACC 脱氨酶等方式促进植物在盐胁迫环境下生长并缓解植物所受盐胁迫的影响。为进一步证明菌株对植物耐盐促生作用, 通过施加 200 mmol/L NaCl 溶液模拟盐渍土评估盐胁迫环境下 Bt-RS 提高香蕉幼苗的耐盐性及促生作用。如图 6 所示, 盐胁迫 (CK200) 抑制植株生长发育, 造成叶片枯萎, 叶面积变小, 根系吸水困难而停止生长。而施加 Bt-RS 菌发酵液实验组 (RS200) 明显缓解了盐胁迫症状, 根部侧根数量显著多于对照组 (CK200), RS200 处理组叶面积显著大于 CK200 对照组, 表明菌株 Bt-RS 能够有效缓解植物所受盐胁迫危害。



A: 香蕉幼苗生长情况; B: 香蕉幼苗根系生长情况; C: 香蕉幼苗叶片生长情况。

A: Growth of banana seedlings; B: Symptoms of leaf stress in banana seedlings; C: Symptoms of root stress in banana seedlings.

图 6 菌株 Bt-RS 对不同盐浓度下香蕉幼苗促生效果

Fig. 6 Effect of strain Bt-RS on promoting the growth of banana seedlings under different salt concentrations

由表 1 可见, 200 mmol/L 盐胁迫下对照组 (CK200) 香蕉幼苗的株高、叶面积、地上部分鲜重、地下部分鲜重、地上部分干重、地下部分干重显著下降 ($P < 0.05$), 与 CK0 相比分别降低了 22.60%、44.35%、57.88%、73.53%、71.40%、

73.88%。在无盐胁迫的环境下, 接种 Bt-RS 菌株后的香蕉幼苗 (RS0) 生长状态优于未接种对照 (CK0), 在株高、叶面积、地上部分鲜重、地下部分鲜重、地上部分干重、地下部分干重分别提高了 40.30%、93.00%、102.38%、81.08%、65.82%、

表 1 盐胁迫环境下 Bt-RS 对香蕉幼苗促生作用
Tab. 1 Growth promoting effect of strain Bt-RS on banana seedlings under salt stress environment

处理 Treatment	株高 Height/cm	叶面积 Leaf area/cm ²	地上部分鲜重 Shoot fresh weight/g	地下部分鲜重 Root fresh weight/g	地上部分干重 Shoot dry weight/g	地下部分干重 Root dry weight/g
CK0	20.75±1.36 ^b	194.09±33.05 ^b	55.51±7.38 ^b	27.99±3.29 ^b	5.42±0.67 ^b	4.25±0.46 ^b
CK200	16.06±1.16 ^c	108.01±12.79 ^c	23.38±5.27 ^c	7.41±2.68 ^c	1.55±0.15 ^d	1.11±0.10 ^c
RS0	29.11±1.83 ^a	374.60±39.07 ^a	112.35±12.01 ^a	50.67±11.51 ^a	8.98±0.90 ^a	6.39±0.67 ^a
RS200	19.36±2.67 ^b	178.23±28.49 ^b	46.32±11.51 ^b	20.88±7.83 ^b	2.91±0.51 ^c	1.71±0.45 ^c

注：同列数据中不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$).

50.50%。在盐胁迫环境下接种菌株 Bt-RS 后（RS200），香蕉幼苗的生长状态明显优于未接种菌株的盐胁迫对照组（CK200），在株高、叶面积、地上部分鲜重、地下部分鲜重、地上部分干重、地下部分干重方面分别提高了 20.55%、65.01%、98.14%、144.93%、87.85%、54.01%。

以上结果表明，在无盐胁迫环境下，接种 Bt-RS 菌株促进了香蕉幼苗生长指标，增加其生物量，在盐胁迫环境（200 mmol/L NaCl）下施加 Bt-RS 菌株能够缓解香蕉幼苗所受盐胁迫影响，使其生长恢复至与正常环境下一致。

3 讨论

本研究的菌株 Bt-RS 为分离自南海永兴岛岛礁银毛树根际土壤的 1 株特基拉芽孢杆菌，独特的海洋环境，使海洋微生物能够耐受高盐、高温等极端环境，并产生许多陆地微生物所无法产生的生物活性物质^[28]，因此海洋微生物具有巨大的开发利用潜能。

盐渍土壤中 Na⁺和 Cl⁻是主要的盐分离子，此外土壤中总可溶性盐的组成中有钠、钙、镁，及氯化物、碳酸盐、硝酸盐等多种成分^[29]。部分耐盐菌株可以在不同类型盐分中生长，而有的菌株只能在 NaCl 下生存，因此检测不同类型盐分对菌株生长的影响是评估菌株能否应用于实际的关键。本研究先对菌株 Bt-RS 进行耐盐能力研究，发现菌株 Bt-RS 能够在 10% NaCl 的环境生长，对 NaNO₂、NaNO₃、KCl、MgCl₂、CaCl₂ 多种盐分具有耐受性，与常华等^[30]对耐盐菌研究结果一致，证明菌株 Bt-RS 除了可以耐受 NaCl 环境外，还对多种不同类型无机盐具有耐受性，具有在盐渍土环境中生长的能力。

盐胁迫作为一种主要的非生物胁迫，是农业可持续发展的关键问题之一^[31]，盐胁迫主要影响

植物发育和生长生理形态的过程^[32]，抑制植物根系生长，通过离子毒害造成植物代谢紊乱，最直观地表现在植物生长指标及生物量的降低，香蕉苗期是香蕉生长整个生育期的基础^[33]，也是对盐胁迫的敏感时期，促进香蕉苗期生长是收获高产的关键。盆栽实验结果表明，菌株 Bt-RS 能够在盐胁迫环境（200 mmol/L NaCl）下有效促进香蕉幼苗生长，对香蕉幼苗株高、叶面积、根系鲜重等生物量均有显著的增益与改善作用，能够有效地缓解 NaCl 对香蕉幼苗的胁迫危害，使植株生长恢复至与正常环境下一致。CHEN 等^[34]应用解淀粉芽孢杆菌 SQR9 在 100 mmol/L NaCl 胁迫下促进拟南芥和玉米幼苗生长，显著提高生物量指标；崔荣强等^[35]从海洋生境中分离出一株具有解钾、解磷能力的芽孢杆菌 T28，能够在盐胁迫环境下提高番茄苗的叶绿素含量，并调节脯氨酸来诱导番茄苗抗盐。

植物根际促生菌（PGPR）能促进植株生长，改善土壤养分并提高植物诱导抗逆系统^[36]。大量研究证明 PGPR 能够通过产生植物生长素（IAA），分泌 ACC 脱氨酶等多种活性物质提高植物耐盐性，并将土壤中难溶性氮、磷、钾转为易吸收的可溶性氮、磷、钾来促进植株生长。IAA 能够促进植物根系生长，是调节植物生长发育的重要信号物质，但是在胁迫环境下植物自身合成 IAA 能力受阻，通过促生菌合成外源 IAA 的介入能够促进植物根系、幼苗生长，提高植物抗胁迫能力^[37]，韦廷舟等^[38]从盐矿区分离出 1 株产 IAA 的运动芽孢杆菌，在 0~4% NaCl 条件下 IAA 产量为 6.8~2.15 mg/L，能够在 100 mmol/L 盐胁迫下促进油菜种子萌发与幼苗生长。此外，胁迫环境下，PGPR 通过分泌 ACC 脱氨酶将植物体内乙烯合成前体氨基环丙烷羧酸（ACC）降解，以缓解胁迫环境下植物体内代谢紊乱。KAMAL 等^[39]在盐胁迫环境下

接种具有 ACC 脱氢酶活性的特基拉芽孢杆菌 SEN15N, 显著改善盐胁迫下花生产量。本研究通过试验验证菌株 Bt-RS 能够在 1%~5% NaCl 环境下产生 IAA, 最高产量为 6.4 mg/L, 此外能够以 ACC 作为氮源生长, 初步定性为产 ACC 脱氢酶阳性菌, 上述结果与他人相关研究一致, 由此可见, 菌株 Bt-RS 具备在盐胁迫环境下促生的潜能。除了常规的生长指标外, 植物幼苗抗氧化酶活性、渗透调节物质、丙二醛等指标均能反映植物耐盐性变化, 此外, 添加外源微生物对植物根际土壤微生物群落的影响及对土壤理化性质的影响也值得注意, 耐盐促生菌被证明在盐胁迫环境下能够提高胞外多糖 (EPS) 产量, 在植物根系形成生物保护膜, 隔绝外界高盐环境并调控水分, 保持根际土壤水分^[40]。上述表明, 微生物提高植物对盐分耐受性的作用机制不是单一的, 如枯草芽孢杆菌 y1923^[41]同时兼具解磷、解钾、产 IAA、产 ACC 脱氢酶和产铁载体的能力, 在盐胁迫环境下能够显著促进玉米生长。因此在后续研究中, 本课题组将对菌株提升香蕉幼苗耐盐性的多种机制进一步探索。

综上所述, 菌株特基拉芽孢杆菌 Bt-RS 能耐受 10% NaCl 浓度及多种盐分条件, 可利用 ACC 作为氮源生长, 能够在盐胁迫环境下产 IAA, 因此菌株具备盐胁迫环境下促生以及有效缓解植物所受盐胁迫的能力。通过盆栽实验进一步验证了菌株 Bt-RS 在 200 mmol/L 盐胁迫下能够显著促进香蕉幼苗生长并缓解盐胁迫危害。说明该菌在盐胁迫环境下能够促进植物生长, 有望在将来用于微生物肥料的制备, 但实际生产中存在更加复杂多变的自然环境, 因此还有待在大田环境下评估该菌株耐盐促生效果, 且关于其诱导植物抗逆和促生机制还需进一步探究。

参考文献

- [1] HA-TRAN D M, NGUYEN T T M, HUNG S H, HUANG E, HUANG C C. Roles of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) in stimulating salinity stress defense in plants: a review[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(6): 3154.
- [2] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008(5): 837-845.
YANG J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008(5): 837-845. (in Chinese)
- [3] HASSAN A, AMJAD S F, SALEEM M H, YASMIN H, IMRAN M, RIAZ M, ALI Q, JOYIA F A, AHMED S, ALI S, ABDULLAH ALSAHLI A, NASSER ALYEMENI M. Foliar application of ascorbic acid enhances salinity stress tolerance in barley (*Hordeum vulgare* L.) through modulation of morpho-physio-biochemical attributes, ions uptake, osmo-protectants and stress response genes expression[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2021, 28(8): 4276-4290.
- [4] MANISHANKAR P, WANG N, KÖSTER P, ALATAR A A, KUDLA J. Calcium signaling during salt stress and in the regulation of ion homeostasis[J]. Journal of Experimental Botany, 2018, 69(17): 4215-4226.
- [5] WU H, SHABALA L, BARRY K. Ability of leaf mesophyll to retain potassium correlates with salinity tolerance in wheat and barley[J]. Physiol Plantarum, 2013, 149(4): 515-527.
- [6] KASHIF M H, TANG D F, LI Z Q, WEI F, LIANG Z C, CHEN P. Comparative cytological and gene expression analysis reveals potential metabolic pathways and target genes responsive to salt stress in kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.)[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2020, 39(1): 1-16.
- [7] 蒋晶. 盐胁迫对巴西蕉幼苗生长和生理影响及其钙的缓解效应研究[D]. 海口: 海南大学, 2011.
JIANG J. Growth and physiologic effects of brazil banana seedlings under salinity stress and alleviatory effect of calcium[D]. Haikou: Hainan University, 2011. (in Chinese)
- [8] WEI J Y, LIU D B, LIU Y W, WEI S X. Physiological analysis and transcriptome sequencing reveal the effects of salt stress on banana (*Musa acuminata* cv. BD) Leaf[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 822838.
- [9] EGAMBERDIEVA D, WIRTH S, BELLINGRATH-KIMURA S D, MISHRA J, ARORA N K. Salt-tolerant plant growth promoting rhizobacteria for enhancing crop productivity of saline soils[J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 18(10): 2791.
- [10] GOMES E, WILLADINO L, MARTINS L, TRC, SILVA S. Genotypes of banana (*Musa* spp.) under saline stress: tolerance and sensitivity[J]. The International Journal on Banana and Plantain, 2001, 11(2): 14-18.
- [11] GAMALERO E, BERTA G, MASSA N, GLICK B R, LINGUA G. Interactions between *Pseudomonas putida* UW4 and *Gigaspora rosea* BEG9 and their consequences for the growth of cucumber under salt-stress conditions[J]. Journal of Applied Microbiology, 2010, 108(1): 236-245.
- [12] KUMAR ARORA N, FATIMA T, MISHRA J, MISHRA I, VERMA S, VERMA R, VERMA M, BHATTACHARYA A, VERMA P, MISHRA P, BHARTI C. Halo-tolerant plant

- growth promoting rhizobacteria for improving productivity and remediation of saline soils[J]. *Journal of Advanced Research*, 2020, 11(26): 69-82.
- [13] 潘晶, 黄翠华, 彭飞, 尤全刚, 刘斐耀, 薛娴. 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.
- PAN J, HUANG C H, PENG F, YOU Q G, LIU F Y, XUE X. Mechanisms of salt tolerance and growth promotion in plant induced by plant growth-promoting rhizobacteria[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2020, 36(9): 75-87. (in Chinese)
- [14] ETESAMI H, MAHESHWARI D K. Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: action mechanisms and future prospects[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 156(7): 225-246.
- [15] ETESAMI H, BEATTIE G A. Halophytes for plant growth-promoting halotolerant bacteria to enhance the salinity tolerance of non-halophytic crops[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 1-20.
- [16] 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.
- MU W Q, KANG S M, LI P L. Advances in rhizosphere growth-promoting bacteria function on plant growth facilitation and their mechanisms[J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2022, 34(2): 118-127. (in Chinese)
- [17] ISLAM F, YASMEEN T, ARIF M S, ALI S, ALI B, HAMEED S, ZHOU W. Plant growth promoting bacteria confer salt tolerance in *Vigna radiata* by up-regulating antioxidant defense and biological soil fertility[J]. *Plant Growth Regulation*, 2016, 80(1): 23-36.
- [18] BERNARD R, GLICK. Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world[J]. *Microbiological Research*, 2014, 169(1): 30-39.
- [19] OROZCO-MOSQUEDA M, GLICK B R, SANTOYO G. ACC deaminase in plant growth-promoting bacteria (PGPB): an efficient mechanism to counter salt stress in crops[J]. *Microbiological Research*, 2020, 235(5): 126439.
- [20] 王文飞. 萎蔫芽孢杆菌 WU-9 与辣椒互作缓解盐胁迫机制及菌株相关功能基因解析[D]. 石河子: 石河子大学, 2022.
- WANG W F. The salt stress alleviating mechanism of pepper via the interaction with *Bacillus atrophicus* WU-9 and its functional genes analysis[D]. Shihezi: Shihezi University, 2022. (in Chinese)
- [21] 安婉宁. 海洋生境贝莱斯芽孢杆菌 CT2628 的促生长抗逆作用研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2021.
- AN W N. Plant growth-promoting and stress tolerance effect of marine habitat *Bacillus velezensis* CT2628[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2021. (in Chinese)
- [22] ALI B, HAFEEZ A, AHMAD S, JAVED M A, SUMAIRA, AFRIDI M S, DAWOUD T M, ALMAARY K S, MURESAN C C, MARC R A, ALKHALIFAH D H M, SELIM S. *Bacillus thuringiensis* PM25 ameliorates oxidative damage of salinity stress in maize via regulating growth, leaf pigments, antioxidant defense system, and stress responsive gene expression[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 28(13): 921668.
- [23] ALI B, WANG X, SALEEM M H, AZEEM M A, AFRIDI M S, NADEEM M, GHAZAL M, BATOOL T, QAYYUM A, ALATAWI A, ALI S. *Bacillus mycoides* PM35 reinforces photosynthetic efficiency, antioxidant defense, expression of stress-responsive genes, and ameliorates the effects of salinity stress in maize[J]. *Life*, 2022, 12(2): 219.
- [24] SALEEM S, IQBAL A, AHMED F, AHMAD M. Phyto-beneficial and salt stress mitigating efficacy of IAA producing salt tolerant strains in *Gossypium hirsutum*[J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2021, 28(9): 5317-5324.
- [25] 孙建光, 胡海燕, 刘君, 陈倩, 高森, 徐晶, 周义清. 农田环境中固氮菌的促生潜能与分布特点[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(8): 1532-1544.
- SUN J G, HU H Y, LIU J, CHEN Q, GAO M, XU J, ZHOU Y Q. Growth promotion potential and distribution features of nitrogen-fixing bacteria in field environments[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(8): 1532-1544. (in Chinese)
- [26] 于志强. 水分和盐分胁迫对香蕉生长、营养与生理特征的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2017.
- YU Z Q. Effects of water stress and salt stress on the growth, nutritional and physiological characteristics of banana[D]. Guangzhou: South China Agriculture University, 2017. (in Chinese)
- [27] 王艳琼, 魏守兴. 不同种植模式对巴西香蕉生长及产量的影响[J]. *热带农业科学*, 2009, 29(4): 20-25.
- WANG Y Q, WEI S X. Effect of different planting patterns on the growth and yield of Brazil banana[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2009, 29(4): 20-25. (in Chinese)
- [28] 郑明刚, 刘峰, 王玲, 郑立, 臧家业. 海洋微生物资源的开发与应用研究[J]. *海洋开发与管理*, 2010, 27(9): 76-79.
- ZHENG M G, LIU F, WANG L, ZHENG L, ZANG J Y. Research on the development and application of marine microbial resources[J]. *Ocean Development and Management*, 2010, 27(9): 76-79. (in Chinese)
- [29] RENGASAMY P. Soil processes affecting crop production in salt-affected soils[J]. *Functional Plant Biology*, 2010, 37(7): 613-620.
- [30] 常华, 李海红, 邹含情, 安凤秋. 一株耐盐菌 NY1 的耐盐特性及机理初探[J]. *中国沼气*, 2022, 40(4): 69-74.

- CHANG H, LI H H, ZOU H Q, AN F Q. Research on salt tolerance and mechanism of a salt-tolerant strain NY1[J]. China Biogas, 2022, 40(4): 69-74. (in Chinese)
- [31] SHABALA S, CUIN T A. Potassium transport and plant salt tolerance[J]. Physiologia Plantarum, 2008, 133(4): 651-669.
- [32] BISTGANI Z E, HASHEMI M, DACOSTA M, CRAKER L, MAGGI F, MORSHEDLOO M R. Effect of salinity stress on the physiological characteristics, phenolic compounds and antioxidant activity of *Thymus vulgaris* L. and *Thymus daenensis* Celak[J]. Industrial Crops and Products, 2019, 135: 311-320.
- [33] 宁瑜, 张玉, 朱志堂, 禰维言, 冯斗. 不同减量施肥对香蕉幼苗生长的影响[J]. 农业研究与应用, 2017(2): 9-12.
- NING Y, ZHANG Y, ZHU Z T, XUAN W Y, FENG D. The effect of different reduced fertilization on the growth of banana seedlings[J]. Agriculture Research and Application, 2017(2): 9-12. (in Chinese)
- [34] CHEN L, LIU Y, WU G, ZHANG N, SHEN Q, ZHANG R. Beneficial rhizobacterium *Bacillus amyloliquefaciens* SQR9 Induces plant salt tolerance through spermidine production[J]. Molecular Plant-Microbe Interactions, 2017, 30(5): 423-432.
- [35] 崔荣强, 张久明, 马湘君, 李闯, 田黎. 海洋生境芽孢杆菌(*Bacillus* sp.)T28 菌株对番茄生长的多功能促进作用[J]. 植物生理学报, 2015, 51(11): 1855-1860.
- CUI R Q, ZHANG J M, MA X J, LI C, TIAN L. Multifunction of marine *Bacillus* sp. strain T28 on tomato growth-promoting[J]. Plant Physiology Journal, 2015, 51(11): 1855-1860. (in Chinese)
- [36] 张婷, 张玲, 张莹莹, 郑然, 项福星, 李洁. 植物促生菌在农作物上的应用进展 (综述) [J]. 河北农业科学, 2022, 26(3): 33-37.
- ZHANG T, ZHANG L, ZHANG Y Y, ZHENG R, XIANG F X, LI J. Application progress of plant growth promoting bacteria in crops[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2022, 26(3): 33-37. (in Chinese)
- [37] HASSAN T U, BANO A, NAZ I, HUSSAIN M. *Bacillus cereus*: a competent plant growth promoting bacterium of saline sodic field[J]. Pakistan Journal of Botany, 2018, 50: 1029-1037.
- [38] 韦廷舟, 文怡, 王超, 陈云, 张泽颖, 范青锋, 胡琬新, 龙治坚, 江世杰. 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.
- WEI T Z, WEN Y, WANG C, CHEN Y, ZHANG Z Y, FAN Q F, HU W X, LONG Z J, JIANG S J. Study on salt-tolerance and growth-promoting effect of an IAA-producing *Bacillus* ST37 on *Brassica napus*[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(6): 210-215. (in Chinese)
- [39] KAMAL K P, DEY R, SHERATHIA D N, DEVIDAYAL, MANGALASSERY S, KUMAR A, RUPAPARA R B, MANDALIYA M, RAWAL P, BHADANIA R A, THOMAS M, PATEL MB, MAIDA P, NAWADE B D, AHMAD S, DASH P, RADHAKRISHNAN T. Alleviation of salinity stress in peanut by application of endophytic bacteria[J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 650771.
- [40] AL-TURKI A, MURALI M, OMAR A F, REHAN M, SAYYED R Z. Recent advances in PGPR-mediated resilience toward interactive effects of drought and salt stress in plants[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1214845.
- [41] 郭彦钊, 杜春辉, 于烽, 黄敏刚, 齐飞. 旱区盐生植物根际促生菌的分离鉴定及其干旱、盐胁迫下促生特性[J]. 微生物学报, 2023, 63(2): 610-622.
- GUO Y Z, DU C H, YU F, HUANG M G, QI F. Isolation and identification of growth-promoting bacteria in halophyte rhizosphere in arid region and their growth-promoting characteristics under drought and salt stresses[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2023, 63(2): 610-622. (in Chinese)