

李承龙, 李琬玉, 王耀浦, 等. 短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物对盐胁迫下黄瓜幼苗离子平衡和营养吸收的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(10): 2047-2056.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.10.018

## 短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物对盐胁迫下黄瓜幼苗离子平衡和营养吸收的影响

李承龙, 李琬玉, 王耀浦, 赛尔兰·贾纳尔别克, 亚迪什尔·努尔麦麦提, 郑旭成, 赵芳萍, 翟炳焱, 许红军, 李红

(新疆农业大学园艺学院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要:** 盐胁迫是影响黄瓜生产的主要非生物逆境因子, 大量研究结果表明一些根际促生菌可以提高植物耐盐性, 然而这些促生菌的分泌物能否缓解植物的盐胁迫还有待进一步研究。本研究以黄瓜津优 401 和短短芽孢杆菌 Rh47 为材料, 将黄瓜种子分别浸泡在含有 0(对照)、25%、50%、75%、100% 的 Rh47 代谢物中, 处理后分别以 0 mmol/L、25 mmol/L、50 mmol/L、75 mmol/L NaCl 溶液进行盐处理, 研究不同含量代谢物对盐胁迫下黄瓜种子发芽的影响。并在 75 mmol/L 的 NaCl 胁迫下, 用不同含量的 Rh47 代谢物浇灌黄瓜幼苗, 研究其对盐胁迫下黄瓜幼苗生长、植株光合参数以及植株体内  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$  等含量和对营养元素吸收的影响。结果表明, 在 75 mmol/L NaCl 处理下, 短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物含量为 50% 时黄瓜种子的活力指数和总根长显著高于其他含量处理 ( $P < 0.05$ )。在幼苗期, 当短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物含量为 75% 时, 与对照相比, 盐胁迫下黄瓜幼苗的株高、叶面积、总根长、根表面积和根体均显著增加 ( $P < 0.05$ ), 幼苗净光合速率、气孔导度和蒸腾速率与对照相比显著提高了 49%、59% 和 44%, 地上部  $K^+$  含量显著增加, 全株  $Na^+$  含量显著降低 ( $P < 0.05$ )。此外, 含量为 75% 的短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物还显著促进了黄瓜幼苗对 Zn、Fe、S 和 P 等营养元素的吸收。综上, 适宜含量的短短芽孢杆菌 Rh47 的代谢物可通过调节黄瓜植株体内离子平衡、增强植株对营养元素的吸收以及提升叶片的光合作用效率, 来提高黄瓜耐盐性。

**关键词:** 短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物; 黄瓜; 盐胁迫; 离子平衡; 营养吸收

中图分类号: S642.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2025)10-2047-10

## Effects of metabolites produced by *Brevibacillus brevis* Rh47 on ion balance and nutrient uptake in cucumber seedlings under salt stress

LI Chenglong, LI Wanyu, WANG Yaopu, Saierlan · Jianaerbieke, Yadikaer · Nuermaiti, ZHENG Xucheng, ZHAO Fangping, ZHAI Bingyao, XU Hongjun, LI Hong

(College of Horticulture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830000, China)

收稿日期: 2025-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(32360790); 新疆维吾尔自治区重点研发项目(2022B02023-2); 新疆蔬菜产业技术体系项目(XJARS-07); 新疆维吾尔自治区 2021 年“天池博士计划”项目

作者简介: 李承龙(1999-), 男, 山东济南人, 硕士研究生, 主要从事园艺植物与微生物互作方向研究。(E-mail) Chenglong0814@163.com

通讯作者: 李红, (E-mail) lihongcau@126.com

**Abstract:** Salt stress is a major abiotic stress factor affecting cucumber production. Numerous studies have shown that certain plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) can enhance plant salt tolerance, but whether their metabolites can alleviate salt stress in plants requires further investigation. This study used cucumber ‘Jinyou 401’ and *Brevibacillus brevis* Rh47 as test materials. Seeds were soaked in solutions containing 0 (control), 25%, 50%, 75%, and 100% Rh47 metabolites, followed by salt

treatments with 0 mmol/L, 25 mmol/L, 50 mmol/L, and 75 mmol/L NaCl solutions to investigate the effects of different metabolite concentrations on cucumber seed germination under salt stress. Under 75 mmol/L NaCl stress, cucumber seedlings were irrigated with different concentrations of Rh47 metabolites to examine their effects on seedling growth, photosynthetic parameters, the contents of  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  and absorption of nutrient elements. Results demonstrated that under 75 mmol/L NaCl treatment, the vigor index and total root length of cucumber seeds treated with 50% concentration of *Brevibacillus brevis* Rh47 metabolites were significantly higher than those in other concentration treatments ( $P < 0.05$ ). At the seedling stage, when the metabolite concentration was 75%, cucumber seedlings subjected to salt stress exhibited significant increases ( $P < 0.05$ ) in plant height, leaf area, root length, root surface area, and root volume compared to the control group. Leaf net photosynthetic rate, stomatal conductance, and transpiration rate increased by 49%, 59%, and 44% respectively versus control. Shoot  $K^+$  content significantly increased ( $P < 0.05$ ), while whole-plant  $Na^+$  content significantly decreased ( $P < 0.05$ ). Additionally, the 75% concentration of *Brevibacillus brevis* Rh47 metabolites significantly promoted the absorption of nutrient elements such as Zn, Fe, S, and P in cucumber seedlings. In conclusion, *Brevibacillus brevis* Rh47 metabolites at appropriate concentrations can improve the salt tolerance of cucumber by regulating ionic homeostasis, improving nutrient uptake, and enhancing photosynthetic efficiency.

**Key words:** *Brevibacillus brevis* Rh47 metabolites; cucumber; salt stress; ionic homeostasis; nutrient uptake

黄瓜(*Cucumis sativus* L.)是葫芦科黄瓜属一年生攀缘植物,具有产量高、经济效益好等特点,是重要的经济作物之一,在世界范围内被广泛栽培<sup>[1]</sup>。据统计,2020年中国黄瓜采收面积为 $1.28 \times 10^6$  hm<sup>2</sup>,占世界黄瓜总采收面积的56.61%,年产量达 $7.28 \times 10^7$  t,占世界总产量的79.81%<sup>[2]</sup>。黄瓜是非盐生植物,根系细弱、好气、分布浅,容易遭受盐胁迫,导致植株生长发育受到抑制,影响黄瓜果实的产量和品质<sup>[3-4]</sup>。不同含量的NaCl对黄瓜幼苗生长造成的影响不同,低含量NaCl胁迫对植株的生长影响小,甚至可能促进植株的生长;高含量NaCl胁迫下植株生长受到抑制,黄瓜生长的极限盐含量为1.2%<sup>[5]</sup>。黄瓜是重要的设施栽培蔬菜作物,近年来,中国设施农业发展迅猛,设施栽培面积和总产量均已处于世界首位。由于种植过程中水肥过量供应,导致设施菜田土壤次生盐渍化严重,这也成为限制中国设施蔬菜产业持续发展的主要逆境胁迫因子之一<sup>[6]</sup>。因此,提高黄瓜的耐盐性对黄瓜设施栽培具有重要的意义。

植物根际促生菌(PGPR)是指生活于植物根际土壤环境中,通过直接代谢调控或间接互作促进植物生长,并在一些生物或者非生物逆境响应中发挥关键作用的一类功能微生物。一些PGPR能够通过产生胞外多糖、铁载体、渗透调节物质和植物激素等调节植物的光合作用、离子稳态、渗透平衡和氧化损伤<sup>[7-8]</sup>,例如,根际细菌BC-II-20可通过分泌胞外多糖,调控外源离子转运,促进植物体内 $K^+$ 的积累和减少 $Na^+$ 的吸收,促进根表面生物膜的形成,以提高植

物的耐盐性<sup>[9]</sup>。在盐渍化土壤中铁的有效性降低,导致植株对铁的吸收受阻,前人研究发现贝莱斯芽孢杆菌HP9、吡咯伯克霍尔德氏菌P10和芽孢杆菌HGD12,可通过分泌铁载体螯合土壤中的铁,促进植物对铁的吸收,减少植物缺铁失绿症的发生,提高盐胁迫下植物的光合作用能力<sup>[10]</sup>。此外,一些PGPR(如*Burkholderia* sp. BK01)也能够分泌渗透调节物质,增加植物细胞内溶质含量,调节细胞渗透平衡,减缓盐胁迫对植物的毒害,提高植物的抗盐性<sup>[11]</sup>。链霉菌菌株*Streptomyces lasalocidi* JCM3373T可通过代谢产生吡啶-3-甲醛(ICA1d)调节盐胁迫下大豆的根系构型,缓解植物盐胁迫<sup>[12]</sup>。因此,应用有益菌的代谢物可能是缓解植物盐胁迫损伤的又一重要途径。

植物的盐胁迫大多是由土壤中积累了大量的 $Na^+$ 所导致的<sup>[13]</sup>, $Na^+$ 通过根系转运进入植物细胞,在细胞中累积进而引发离子毒害<sup>[14]</sup>。植株体内 $Na^+$ 过量会打破体内的离子平衡,导致 $K^+$ 和 $Ca^{2+}$ 的吸收减少,从而阻碍植株的正常生长发育<sup>[15-16]</sup>。同时,盐胁迫也会降低植物的叶绿素含量,抑制光合作用,减少营养物质的合成和供应<sup>[17]</sup>。因此,盐胁迫下维持植物体内的离子平衡、促进根系对养分的吸收是增强植物耐盐性的有效方式之一。

本研究应用前期从根际土壤中分离、筛选和验证后得到的1株耐盐促生菌Rh47(*Brevibacillus brevis*,短芽孢杆菌),通过培养后获得Rh47的代谢物,并在盐胁迫下将其接种在黄瓜根系周围,探究短芽孢杆菌Rh47代谢物对盐胁迫下黄瓜植株生

长、离子平衡以及营养吸收等的影响。本研究结果旨在为缓解黄瓜盐胁迫提供一种新的策略。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试黄瓜品种为津优 401, 购买于天津科润黄瓜研究所。短短芽孢杆菌 Rh47 是由课题组前期筛选得到的耐盐促生菌株, 经分子生物学鉴定为短短芽孢杆菌 (*Brevibacillus brevis*), 在美国国家生物技术信息中心 (NCBI) 数据库比对相似度为 99%。

### 1.2 试验方法

**1.2.1 短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物的获取** 将短短芽孢杆菌 Rh47 接种到无菌 R2A 液体培养基内, 置于恒温摇床内培养, 培养条件为 28 °C、180 r/min, 培养 5 d 左右, 当菌液吸光度值 ( $OD_{600}$ ) = 1.0 时, 使用 0.2 μm 无菌滤膜进行过滤, 获得细菌代谢物, 此时的代谢物含量记为  $C_0$ , 使用无菌水进行稀释, 分别得到 0 $C_0$ 、25% $C_0$ 、50% $C_0$ 、75% $C_0$ 、100% $C_0$  含量的细菌代谢物, 含量记为: 0、25%、50%、75% 和 100%, 用于处理黄瓜种子和幼苗。

**1.2.2 种子萌发试验** 选取籽粒饱满、大小一致的黄瓜种子, 在超净工作台内进行表面灭菌, 种子先浸泡于 70% 乙醇中 30 s, 用无菌水冲洗 3 次后, 置于 3% 的 NaClO 溶液中处理 10 min, 再使用无菌水冲洗 3 次。经表面消毒的种子分别放在含有 0、25%、50%、75% 和 100% 的短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物中浸泡 6 h, 取出种子置于铺有 2 层滤纸的 9 cm 的无菌方型培养皿内, 分别加入 7 mL 含有 0 mmol/L、25 mmol/L、50 mmol/L、75 mmol/L 无菌 NaCl 的溶液中进行盐胁迫处理, 每个处理 5 次重复, 每个重复 7 粒种子, 处理后将培养皿放置于 28 °C 的恒温培养箱内, 避光的条件下培养 3 d 后, 对各处理的种子进行相关指标测定。

**1.2.3 幼苗生长试验** 选取饱满成熟的黄瓜种子, 在超净工作台内进行表面灭菌, 方法同 1.2.2 中所述。经表面消毒的种子使用无菌水浸种 6 h, 之后将种子放在铺有 2 层滤纸的无菌培养皿中, 于 28 °C 黑暗环境下催芽 36 h。催芽后, 将发芽种子播种于装有灭菌基质的 32 孔穴盘中, 基质由沙子和蛭石按体积比为 1:1 混合而成, 混合基质在播种前需经高温灭菌, 灭菌温度为 121 °C, 灭菌时间为 1 h, 此后将混合基质置于室温下 24 h, 然后重复灭菌 1 次, 冷却至

室温后进行播种。播种后, 将穴盘放入光照培养箱内进行培养, 培养温度为 27 °C (光照)/18 °C (黑暗), 培养时间为 14 h (光照)/10 h (黑暗), 光合有效辐射为 (278.0±8.1) μmol/(m<sup>2</sup>·s), 空气相对湿度为 65%~75%。

待幼苗第 1 片真叶展平时, 选取长势一致的健康幼苗进行代谢物处理和盐处理, 其中代谢物处理含量分别为: 0 (对照)、25%、50%、75% 和 100%, 盐处理为添加 75 mmol/L 的 NaCl 溶液, 盐处理浓度为前期试验筛选得到, 75 mmol/L 的 NaCl 溶液浓度为黄瓜津优 401 盐处理的抑制中浓度<sup>[18]</sup>, 每个处理 4 次重复, 每个重复 12 棵苗。盐胁迫处理 15 d 后, 进行指标测定。

### 1.3 测定项目及方法

**1.3.1 种子发芽相关指标的测定** 盐处理 3 d 后, 统计各处理种子的发芽率, 并从每个处理中选取 12 粒发芽的种子, 分别使用根系扫描仪 (型号: EPSON V800, 爱普生公司产品) 进行扫描, 对获得的图片使用 Win RHIZO 根系分析软件分析萌发种子的总根长和根表面积, 并采用 Image J 软件分析下胚轴的长度。根据测定指标, 分别计算各处理的种子活力指数<sup>[19]</sup>。

种子活力指数 = (下胚轴长度平均值 + 总根长平均值) × 发芽率 (1)

**1.3.2 黄瓜幼苗相关形态和生理指标的测定** 盐处理 15 d 后, 分别测定各处理黄瓜幼苗的形态、生物量和生理指标。株高测量子叶节至生长点的距离; 茎粗采用电子游标卡尺进行测量; 黄瓜幼苗叶片、茎和根的鲜重分别采用分析天平进行测定; 称量鲜重后分别将各处理黄瓜幼苗的叶片、茎和根置于 105 °C 烘箱中杀青 15 min, 然后在 85 °C 下烘干至恒重后称量干重; 根长、根表面积、根体积和叶面积采用扫描仪 (EPSON V800, 爱普生公司产品) 和 Win RHIZO 根系分析软件进行扫描分析; 黄瓜幼苗叶片光合参数使用便携式光合仪 [型号: YZQ-100A, 翼鬃麒科技 (北京) 公司产品] 进行测定, 测定环境温度为 27 °C, CO<sub>2</sub> 浓度为 400 μmol/L。

**1.3.3 黄瓜幼苗体内 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup> 和 Ca<sup>2+</sup> 含量的测定** 利用火焰光度计 (型号: BWB-XP, BWB technologies 公司产品) 进行 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 含量的测定。盐处理 15 d 后, 将各处理植株叶片、茎和根样品经烘干后, 分别研磨过 400 目筛, 称取 0.1 g 植株样品粉末至 50 mL 离心管, 加

入 20 mL 1 mol/L 的 HCl。在室温下使用摇床振荡样品 3 h,用套有滤头的注射器过滤样品残渣,取所得抽提液 5 mL 至新管中,加入 5 mL 1 mol/L 的 HCl 稀释,混匀后使用火焰光度计进行检测<sup>[20]</sup>。

1.3.4 黄瓜幼苗体内元素含量的测定 盐处理 15 d 后,取各处理烘干后的叶片、茎和根的烘干样品,分别用研钵研磨过筛(400 目),称取 0.1 g 植株样品粉末至干净且干燥的消煮管内,用移液管向消煮管内加入 5 mL 优级纯的浓 HNO<sub>3</sub>,使用石墨消解仪(型号 EH-3630,北京澳维仪器有限公司产品)进行消煮和排酸。消煮时先用 130 °C 处理 40 min,再用 180 °C 处理 40 min,消煮完毕后轻轻拧开管盖放出内部气体,在 200 °C 下高温排酸 10~20 min,直至底部剩余少量液体,将消煮液转移至 50 mL 的容量瓶中,用高纯水定容,摇匀后利用原子吸收光度计(型号 Avio 500,珀金埃尔默股份有限公司产品)测量元素含量<sup>[18]</sup>,计算 B、Ca、Cu、Fe、K、Mg、Mn、Mo、Na、P、S、Zn 元素的相对吸收率(公式 2),并以雷达图的形式表示。

相对吸收率 = 处理的元素含量 / 对照的元素含量 (2)

表 1 短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物对盐胁迫下黄瓜种子活力指数的影响

Table 1 Effects of metabolites produced by *Brevibacillus brevis* Rh47 on vigor index of cucumber seeds under salt stress

NaCl 浓度 (mmol/L)	短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物含量				
	0	25%	50%	75%	100%
0	29.65±2.78a	26.19±2.60a	29.31±1.98a	30.50±1.68a	29.73±1.57a
25	30.20±0.62a	25.56±1.36bc	25.88±1.03bc	28.26±1.33ab	23.84±0.92c
50	22.98±1.73ab	22.65±1.57ab	28.29±1.38a	21.28±1.23ab	16.62±2.96c
75	15.68±1.20b	16.84±0.72b	23.73±1.09a	13.91±1.14b	8.72±2.13c

短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物含量 0、25%、50%、75% 和 100% 分别表示含有 0C<sub>0</sub>、25% C<sub>0</sub>、50% C<sub>0</sub>、75% C<sub>0</sub>、100% C<sub>0</sub> 的细菌代谢物, C<sub>0</sub> 为稀释前的细菌代谢物含量。同一行数据后不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05)。

## 2.2 短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物对盐胁迫下黄瓜幼苗生长的影响

为探究短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物对盐胁迫下黄瓜幼苗生长的影响,在 75 mmol/L NaCl 处理 15 d 后测定了植株的相关生长指标,结果如图 2 所示。盐胁迫下,株高和叶面积随着短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物含量的升高呈现先增高后降低的趋势,其中短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物含量为 75% 时株高和叶面积最大,与对照(短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物含量为 0)相比显著增加了 0.86 倍和 1.88 倍。盐胁迫下添加短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物黄瓜幼苗的茎粗均显著高于无短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物处理。添

## 1.4 数据分析

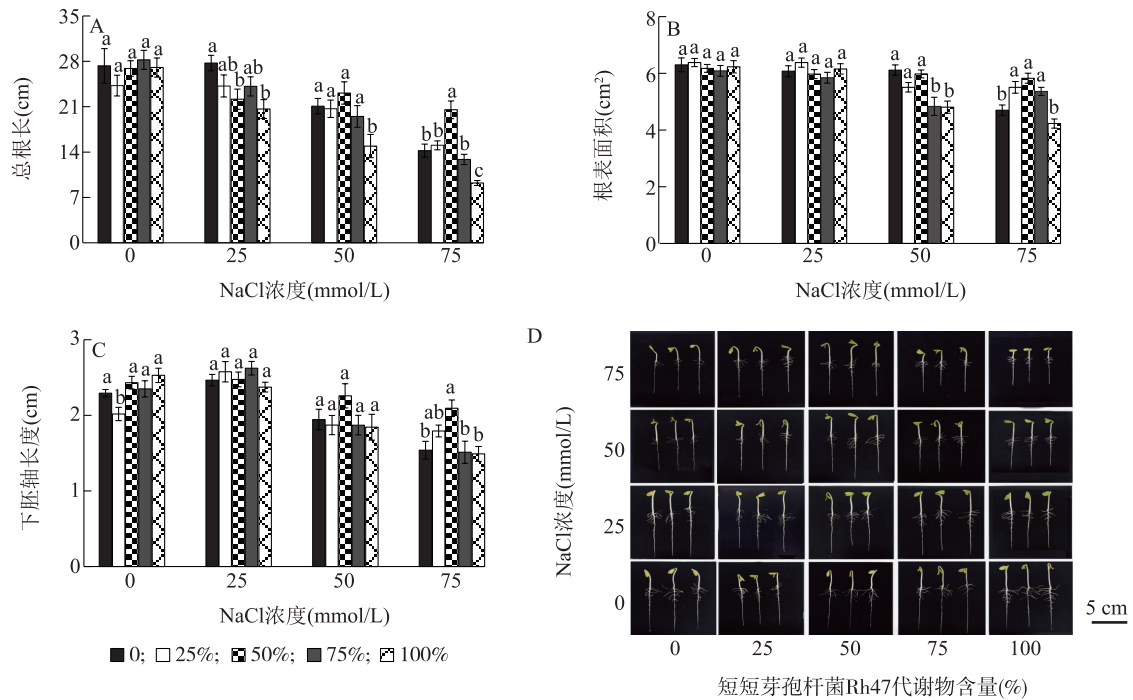
使用 Microsoft Excel 2021 和 Origin 2021 进行数据整理和作图,采用 SPSS 26.0 软件进行方差分析,使用 Duncan's 法进行处理间多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物对盐胁迫下黄瓜种子萌发的影响

分析不同含量的短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物对盐胁迫下黄瓜种子活力指数及生长特性的影响。结果(表 1、图 1)显示,在 75 mmol/L NaCl 胁迫条件下,50% 的 Rh47 代谢物能显著提高黄瓜种子活力指数,显著增加黄瓜种子的总根长和根表面积,尤其是可显著促进下胚轴的增长 (P<0.05)。然而,在 25 mmol/L NaCl 胁迫或非盐胁迫条件下,短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物对黄瓜种子萌发的促进作用并不明显。此外,图 1 所示,在 75 mmol/L NaCl 的胁迫条件下,短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物含量为 50% 时促进种子萌发的效果最好。综上,适宜含量的短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物可缓解盐胁迫对黄瓜种子萌发的抑制。

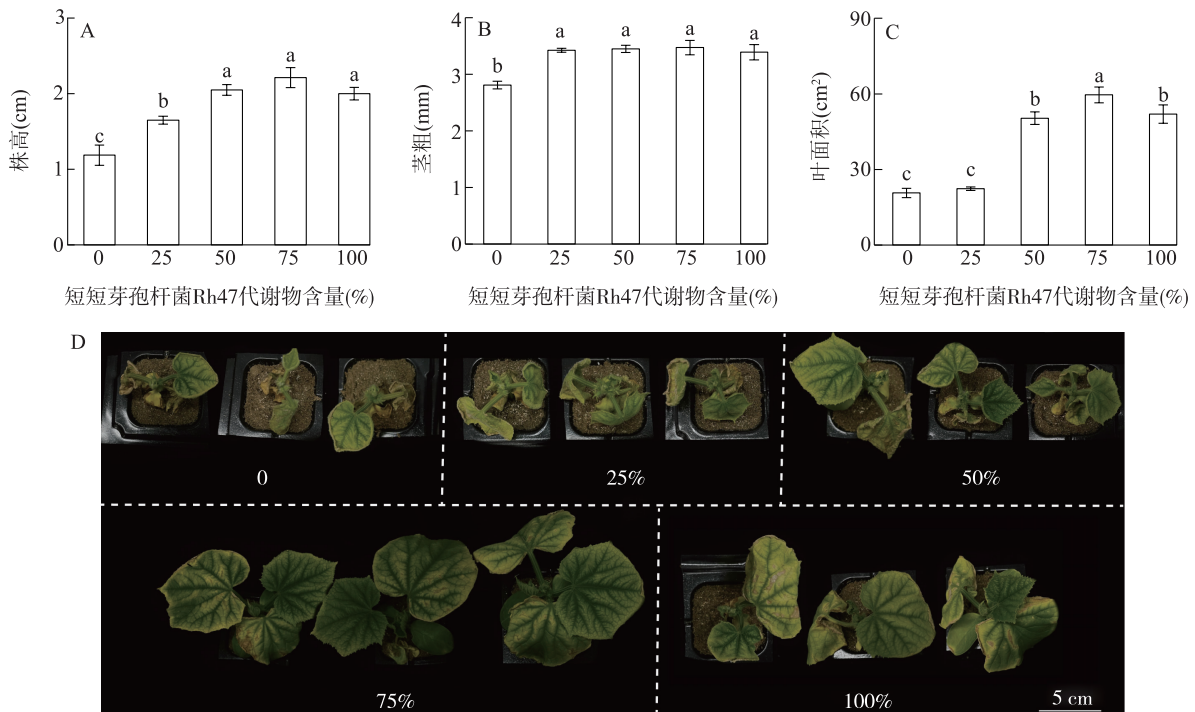
加短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物对盐胁迫下黄瓜幼苗生物量的影响,如表 2 所示。盐胁迫下,与对照相比,在 75% 的芽孢杆菌 Rh47 代谢物处理下根、茎、叶的干重均显著增加;根、茎、叶的鲜重在含量为 100% 和 75% 芽孢杆菌 Rh47 代谢物处理下显著增加。随着短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物含量的增加,黄瓜幼苗的全株鲜重和全株干重呈现先升高后下降的趋势,在短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物含量为 75% 时全株鲜重和全株干重最高。综上,添加短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物能够促进盐胁迫下黄瓜幼苗的生长,在短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物含量为 75% 时缓解黄瓜幼苗盐胁迫的效果最好。



A:总根长;B:根表面积;C:下胚轴长度;D:表型。短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物含量 0、25%、50%、75%和 100%见表 1 注。方差分析均在同一 NaCl 浓度下进行,不同小写字母表示在 0.05 水平上有显著差异。

图 1 短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物对盐胁迫下黄瓜种子萌发的影响

Fig.1 Effects of metabolites produced by *Brevibacillus brevis* Rh47 on cucumber seed germination under salt stress



A:株高;B:茎粗;C:叶面积;D:表型。短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物含量 0、25%、50%、75%和 100%见表 1 注。每个处理均是在 75 mmol/L 的 NaCl 胁迫下进行。图中不同小写字母表示不同含量的短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物处理间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

图 2 短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物对盐胁迫下黄瓜幼苗形态指标的影响

Fig.2 Effects of metabolites produced by *Brevibacillus brevis* Rh47 on morphological indices of cucumber seedlings under salt stress

表 2 短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物对盐胁迫下黄瓜幼苗生物量的影响

Table 2 Effects of metabolites produced by *Brevibacillus brevis* Rh47 on the biomass of cucumber seedlings under salt stress

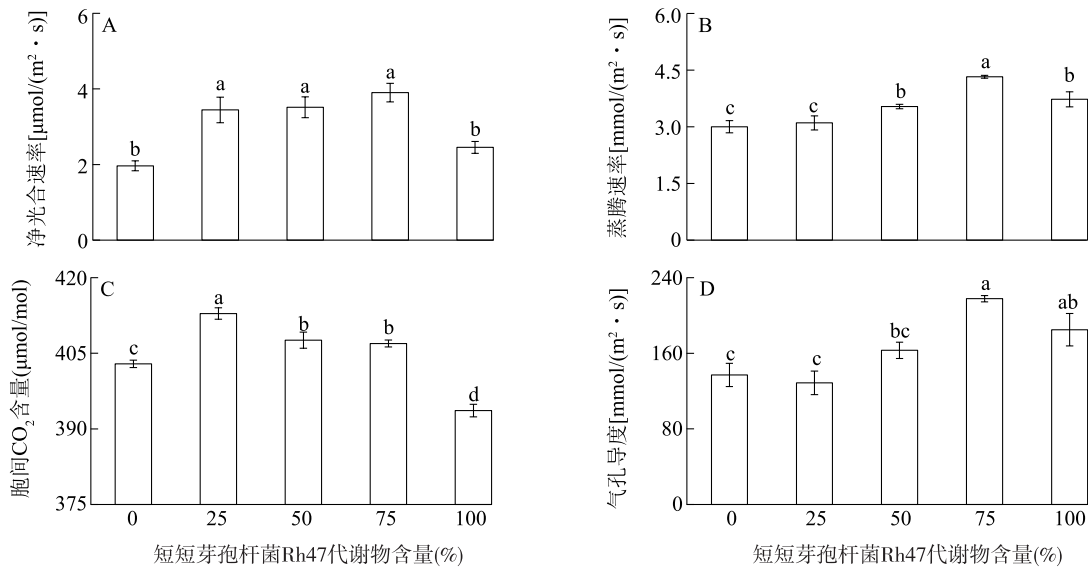
短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物含量 (%)	鲜重 (g)				干重 (mg)			
	根	茎	叶	全株	根	茎	叶	全株
0	0.511±0.03b	0.695±0.03c	0.944±0.09c	2.138±0.152c	22.2±2.1c	44.9±2.1c	147.5±9.9d	214.6±11.0d
25	0.553±0.03b	0.854±0.05bc	1.183±0.09c	2.580±0.176c	24.6±0.8c	59.9±2.7b	194.1±2.3c	278.6±5.0c
50	0.536±0.04b	0.890±0.09b	1.112±0.07c	2.584±0.162c	30.7±1.4b	65.2±4.6ab	226.6±10.1b	322.5±14.4b
75	0.838±0.07a	1.088±0.04a	2.051±0.06a	3.828±0.129a	36.6±4.6a	73.3±1.7a	267.8±7.5a	377.6±9.9a
100	0.886±0.09a	0.958±0.07ab	1.510±0.16b	3.255±0.262b	36.0±1.9a	67.2±2.1ab	264.5±8.6a	367.7±12.1a

短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物含量 0、25%、50%、75% 和 100% 见表 1 注。每个处理均是在 75 mmol/L 的 NaCl 胁迫下进行。同一列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

### 2.3 短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物对盐胁迫下黄瓜幼苗叶片光合参数的影响

为研究短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物对盐胁迫下黄瓜幼苗光合参数的影响,盐处理 15 d 后使用光合仪测定了各处理黄瓜植株的叶片净光合速率、气孔导度、细胞间  $\text{CO}_2$  含量、蒸腾速率,结果如图 3 所示。盐处理下,叶片的净光合速率、蒸腾速率随着短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物含量的增加呈现出先增加后降低的

趋势,在 75% 短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物处理中,黄瓜幼苗的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度最高,与对照相比分别显著增加了 49%、44% 和 59%。而叶片的胞间  $\text{CO}_2$  含量则随着代谢物含量的增加先升高后降低,在 100% 短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物处理时胞间  $\text{CO}_2$  含量最低。综上,适宜含量的短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物能够提高盐胁迫下黄瓜幼苗的光合能力,从而促进盐胁迫下黄瓜的生长和生物量的积累。



A: 叶片光合速率; B: 叶片蒸腾速率; C: 叶片胞间  $\text{CO}_2$  含量; D: 叶片气孔导度。短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物含量 0、25%、50%、75% 和 100% 见表 1 注。图中不同小写字母表示不同含量的短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物处理间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

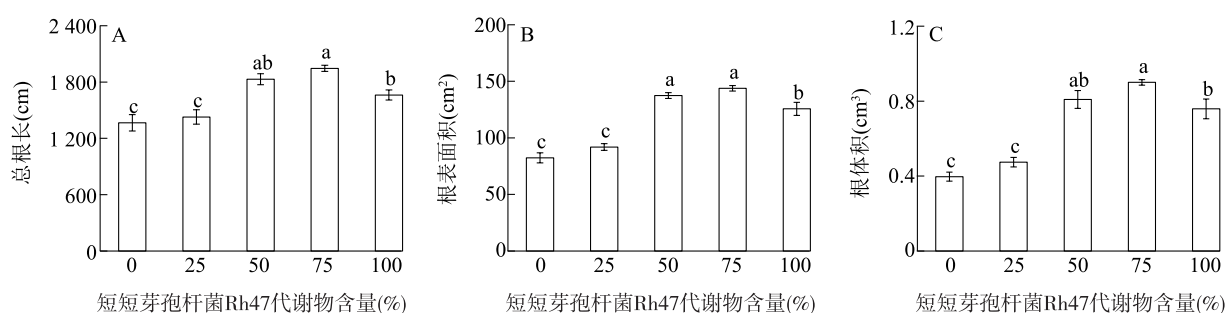
图 3 短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物对盐胁迫下黄瓜幼苗叶片光合的影响

Fig.3 Effects of metabolites produced by *Brevibacillus brevis* Rh47 on leaf photosynthesis of cucumber seedlings under salt stress

### 2.4 短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物对盐胁迫下黄瓜幼苗根系的影响

图 4 显示,在盐胁迫下,黄瓜幼苗的总根长、根表面积和根体积随着代谢物含量的升高出现先升高后降低的趋势,在 75% 短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物

处理后出现最大值,与对照相比,黄瓜幼苗的总根长、根表面积和根体积分别显著增加了 42%、74% 和 125%。综上,适宜含量的短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物可显著增加盐胁迫下黄瓜幼苗的总根长、根表面积和根体积,促进盐胁迫下黄瓜幼苗根系的生长。



短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物含量 0、25%、50%、75% 和 100% 见表 1 注。A: 总根长; B: 根表面积; C: 根体积。图中不同小写字母表示不同含量的短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物处理间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

图 4 短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物对盐胁迫下黄瓜幼苗根系生长的影响

Fig.4 Effects of metabolites produced by *Brevibacillus brevis* Rh47 on root growth of cucumber seedlings under salt stress

## 2.5 短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物对盐胁迫下黄瓜幼苗体内离子平衡的影响

为探究短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物能否通过调节离子平衡来缓解黄瓜幼苗受到的盐胁迫,分别测定了植株不同部位的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$  的含量。结果如图 5 所示,在盐胁迫下,添加短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物处理后黄瓜幼苗根、茎中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$  的含量随着代谢物含量的升高出现了不同的变化趋势。与对照相比,当短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物含量大于 50% 时,黄瓜幼苗根、茎、叶中  $\text{Na}^+$  含量均出现显著降低 ( $P < 0.05$ ),其中在 75% 代谢物处理下,叶片中  $\text{Na}^+$  含量降低 9.4%;在 100% 代谢物处理下,茎和根中的  $\text{Na}^+$  含量分别降低 6.9% 和 51.7%。然而,与对照相比,在 100% 代谢物处理下,叶和茎中  $\text{K}^+$  含量分别增加 13.6% 和 15.5%。此外,50% 短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物处理后茎中  $\text{Ca}^{2+}$  含量显著高于对照。综上,适宜含量的短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物可调节盐胁迫下黄瓜幼苗各部位中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$  的含量,维持盐胁迫下黄瓜幼苗体内的离子平衡。

## 2.6 短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物对盐胁迫下黄瓜幼苗营养元素吸收的影响

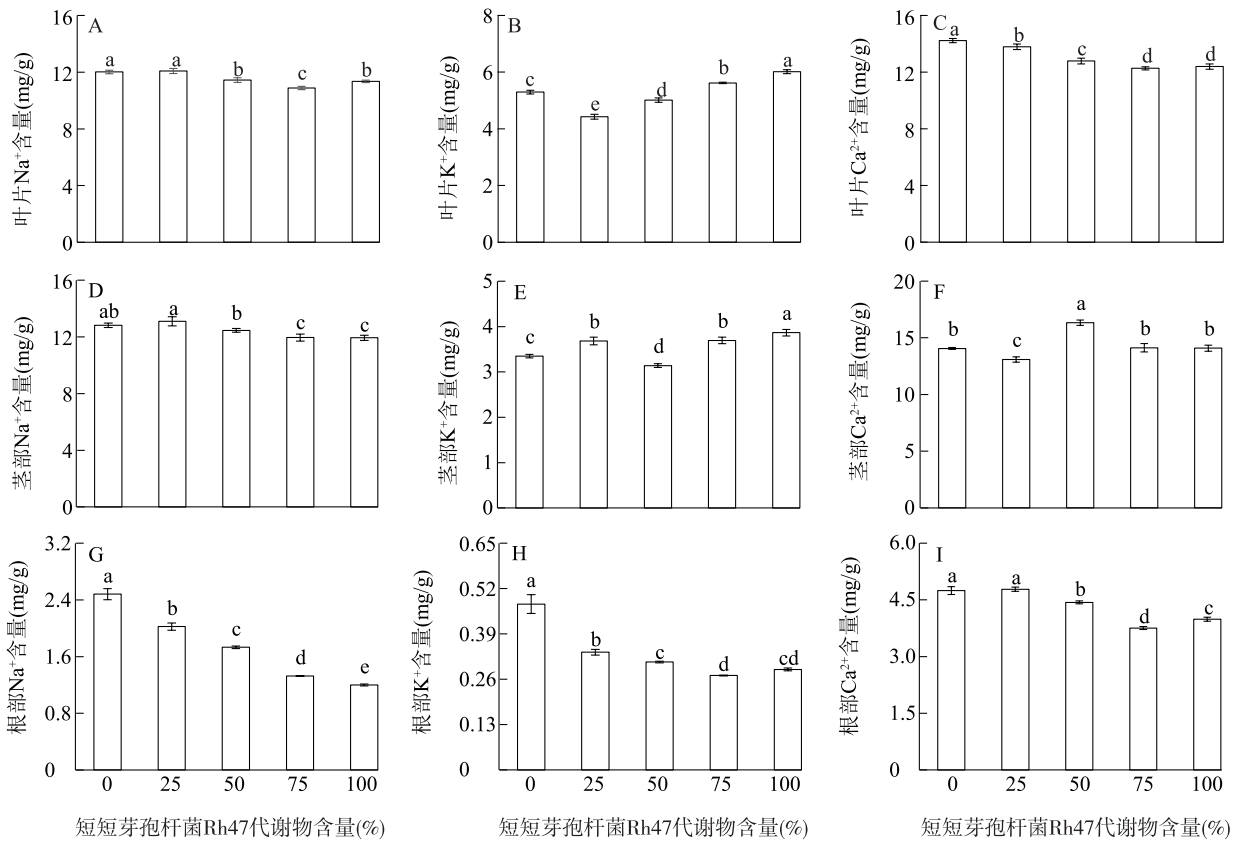
如图 6 所示,盐胁迫下,添加短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物显著影响了黄瓜幼苗根、茎、叶对大量元素和微量元素的吸收。当代谢物含量达到 75% 及以上时,叶片、茎和根内多种营养元素,如 Fe、P、Zn 和 S 元素的含量均显著上升 ( $P < 0.05$ )。综上,短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物能够促进盐胁迫下黄瓜幼苗对 Fe、P、Zn 和 S 元素的吸收,且当短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物含量为 75% 时促进效果最好,可缓解盐胁迫对植株生长产生的抑制作用。

## 3 讨论

盐胁迫是影响植物生长发育及产量的主要非生物胁迫因子之一,近些年的研究表明,微生物能够协助植物在盐胁迫下生长,可通过促进盐胁迫下植物根系的生长,增强根系对水分和养分的吸收<sup>[21]</sup>,以及产生有机物质促进盐胁迫下植物的生长<sup>[22]</sup>。然而关于外源添加微生物的代谢物对盐胁迫下植物生长影响的相关研究还未见报道。因此,本研究以盐敏感黄瓜品种津优 401 和根际促生菌短短芽孢杆菌 Rh47 为材料,探究外源添加短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物对盐胁迫下黄瓜幼苗离子平衡和营养吸收的影响,为促进盐渍化土壤条件下黄瓜优质高产提供新的思路。

植物的种子在萌发阶段的耐盐性可以在一定程度上反映该物种的耐盐能力<sup>[23]</sup>。有研究结果显示,微生物可提高黄瓜种子的发芽率,促进黄瓜幼苗的生长<sup>[24-27]</sup>。75 mmol/L NaCl 胁迫下,外源添加 50% 的短短芽孢杆菌 Rh47 代谢物可以提高黄瓜种子的活力指数、下胚轴长度、总根长和根表面积,促进黄瓜种子的萌发。

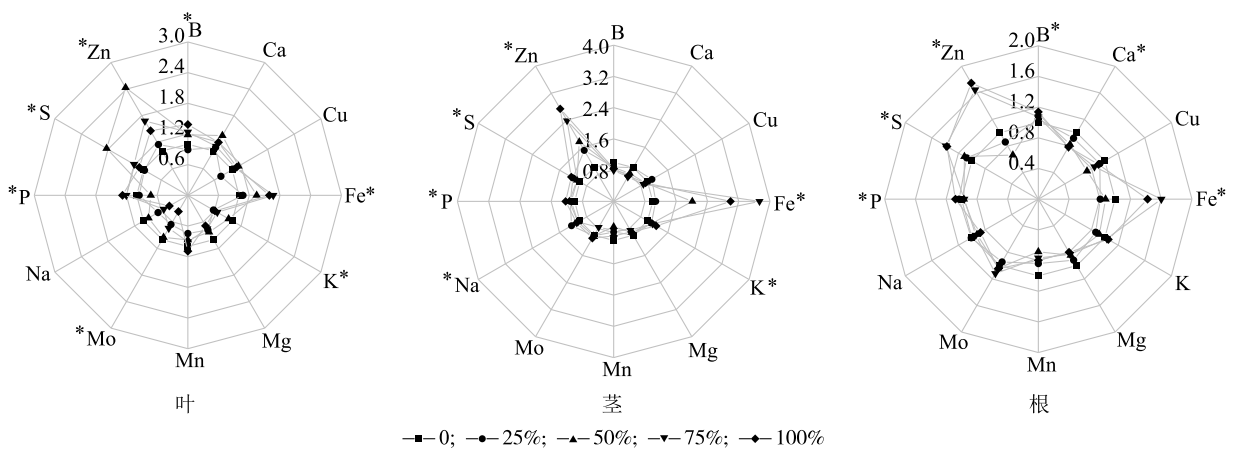
盐胁迫能够抑制植株的株高、茎粗、叶片数、叶面积等形态指标增加,影响植物正常的生长<sup>[28]</sup>。此外,盐胁迫还会使植株根系的扩展能力减弱,影响根系的伸长和对营养物质的吸收、运输<sup>[29-31]</sup>。研究表明,盐胁迫下适量添加一些外源物质,可以促进植物的生长,维持植物体内的离子平衡,缓解氧化损伤<sup>[32-33]</sup>。本研究发现,在 75 mmol/L 的 NaCl 胁迫下,添加不同含量的根际促生菌 Rh47 代谢物,对缓解黄瓜幼苗生长抑制的效果不同,随着短短芽孢杆



短芽孢杆菌 Rh47 代谢物含量 0、25%、50%、75% 和 100% 见表 1 注。图中不同小写字母表示不同含量的短芽孢杆菌 Rh47 代谢物处理间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

图 5 短芽孢杆菌 Rh47 代谢物对盐胁迫下黄瓜幼苗体内  $\text{Na}^+$  (A、D、G)、 $\text{K}^+$  (B、E、H) 和  $\text{Ca}^{2+}$  (C、F、I) 含量的影响

Fig.5 Effects of metabolites produced by *Brevibacillus brevis* Rh47 on  $\text{Na}^+$  (A, D, G),  $\text{K}^+$  (B, E, H), and  $\text{Ca}^{2+}$  (C, F, I) contents in cucumber seedlings under salt stress



短芽孢杆菌 Rh47 代谢物含量 0、25%、50%、75% 和 100% 见表 1 注。A: 叶片营养元素相对吸收率; B: 茎营养元素相对吸收率; C: 根营养元素相对吸收率。每个处理均是在 75 mmol/L 的 NaCl 胁迫下进行的; 以短芽孢杆菌 Rh47 代谢物含量为 0 时作为对照, 元素的相对吸收率为处理的元素含量与对照元素含量的比值。处理间采用 Duncan 法进行多重比较, \* 表示与对照相比短芽孢杆菌 Rh47 代谢物处理能显著影响植株体内营养元素的含量 ( $P < 0.05$ )。

图 6 短芽孢杆菌 Rh47 代谢物对盐胁迫下黄瓜幼苗营养元素吸收的影响

Fig.6 Effects of metabolites produced by *Brevibacillus brevis* Rh47 on nutrient uptake of cucumber seedlings under salt stress

菌 Rh47 代谢物含量的升高,黄瓜幼苗的株高、叶面积、总根长、根体积、根表面积等均总体呈现先上升后降低的趋势,并在 75% 的短芽孢杆菌 Rh47 代谢物处理后达到最大值。光合作用是植物生长、发育和繁殖的主要能量来源,盐胁迫会破坏植物叶片中的光合膜和光合色素,降低固定 CO<sub>2</sub> 的能力,导致叶片气孔导度和净光合速率降低<sup>[34-35]</sup>。同时,盐胁迫造成的离子紊乱也会导致叶绿素含量降低,影响光合作用的运行<sup>[17]</sup>。研究表明,添加 75% 的外源物质能够增强盐胁迫下植物的光合作用,增加植物体内水分含量、酶和非酶抗氧化剂的活性或含量<sup>[36]</sup>。在本研究中,添加 75% 短芽孢杆菌 Rh47 代谢物后,黄瓜幼苗叶片的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率显著增加,提高了黄瓜幼苗的耐盐性。

盐胁迫下植物体内会出现 Na<sup>+</sup> 含量上升、K<sup>+</sup> 含量下降的现象。一些外源物质能抑制盐胁迫下 Na<sup>+</sup> 的过量积累,同时提高 K<sup>+</sup> 含量,从而维持盐胁迫下植物体内的离子平衡,增强其耐盐性<sup>[37]</sup>。添加适宜含量的短芽孢杆菌 Rh47 代谢物后,与对照相比,植株根、茎和叶内 Na<sup>+</sup> 的含量显著降低,茎和叶片内的 K<sup>+</sup> 含量显著上升,并且显著促进了盐胁迫下植株对 Zn、Fe、S 和 P 等营养元素的吸收。在前期试验过程中,发现短芽孢杆菌 Rh47 携带 *bpp* 基因,而该基因可在土壤中促使有机磷矿化,促进植物对磷的吸收<sup>[38]</sup>。此外,前人研究发现,植物根际促生菌可通过生物固氮、溶磷、解钾等方式促进植株对土壤中氮、磷、钾等矿物元素的吸收<sup>[39]</sup>,也可分泌铁载体以及产生多种酶类物质来提高植物的抗逆性,例如荧光假单胞菌 (*Pseudomonas fluorescens*) 可通过分泌铁载体,与病原菌争夺土壤中的铁元素,从而抑制植物病害的发生与蔓延<sup>[40]</sup>。因此,我们推测短芽孢杆菌 Rh47 代谢物中可能存在某些物质,可提高土壤中矿质元素的有效性,促进植株对 Zn、Fe、S 和 P 等营养元素的吸收,增加植株的养分含量,提高植物的耐盐性,而具体的作用机制还需进一步研究。

## 4 结论

盐胁迫导致黄瓜幼苗的生长发育受到抑制,造成黄瓜幼苗的离子失衡和营养吸收能力下降。外源添加适宜含量的短芽孢杆菌 Rh47 代谢物,能够提高盐胁迫下黄瓜种子的发芽活力,促进根系和下胚轴的生长。在黄瓜幼苗期,添加适宜含量的短

芽孢杆菌 Rh47 代谢物可通过调节黄瓜幼苗体内离子平衡、促进植株对营养元素的吸收、提高植株的光合作用,从而缓解盐胁迫对黄瓜幼苗生长造成的抑制作用。

## 参考文献:

- [1] 李荣光. 现代温室无土栽培黄瓜品种筛选及生理生态分析 [D]. 上海:上海应用技术大学,2023.
- [2] 陆珂,吴则东,李胜男. 黄瓜诱变育种研究进展[J]. 江苏农业科学,2022,50(18):208-214.
- [3] 王丹怡,韩玲娟,张毅,等. 多胺对盐胁迫下黄瓜 *SOS2* 基因家族表达的影响[J]. 西北植物学报,2020,40(11):1855-1865.
- [4] 史沉鱼,吴梁艳. 外源独脚金内酯对盐胁迫下黄瓜幼苗生长的缓解效应[J]. 南方农业,2023,17(9):28-33.
- [5] 韩冰,徐刚,郭世荣,等. 不同浓度盐胁迫对黄瓜幼苗生长和生理代谢的影响[J]. 江苏农业学报,2014,30(1):172-177.
- [6] 李杨,宋立群,敖静,等. 秸秆还田下连作对黄瓜土壤细菌群落结构和多样性的影响[J]. 中国土壤与肥料,2025(2):65-75.
- [7] BHAT M A, KUMAR V, BHAT M A, et al. Mechanistic insights of the interaction of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) with plant roots toward enhancing plant productivity by alleviating salinity stress[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020,11:1952.
- [8] 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.
- [9] THAKUR R, YADAV S. Biofilm forming, exopolysaccharide producing and halotolerant, bacterial consortium mitigates salinity stress in *Triticum aestivum* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024,262:130049.
- [10] 杨苑娟,谢思雨,申娟,等. 3个促生菌菌株对盐胁迫下辣椒生长及土壤细菌群落结构的影响[J/OL]. 分子植物育种, 2024; 1-15 [2024-11-21]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20241120.1554.020>.
- [11] CHEN E N, YANG C S, TAO W Y, et al. Polysaccharides produced by plant growth-promoting rhizobacteria strain *Burkholderia* sp. BK01 enhance salt stress tolerance to *Arabidopsis thaliana* [J]. *Polymers*, 2024,16(1):145.
- [12] LU L, LIU N, FAN Z H, et al. A novel PGPR strain, *Streptomyces lasalocidi* JCM 3373T, alleviates salt stress and shapes root architecture in soybean by secreting indole-3-carboxaldehyde [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2024,47(6):1941-1956.
- [13] QIN H, HUANG R F. The phytohormonal regulation of Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> and reactive oxygen species homeostasis in rice salt response [J]. *Molecular Breeding*, 2020,40(5):47.
- [14] 侯汶君,麻冬梅,张玲,等. 叶面喷施表油菜素内酯对湖南稷子耐盐性的调控作用[J]. 西北植物学报,2024,44(4):517-528.
- [15] 万玺宏,张会龙,朱建峰,等. 液泡膜转运蛋白在植物耐盐性调控中的作用[J]. 植物生理学报,2024,60(2):295-310.

- [16] ISAYENKOV S V, MAATHUIS F J M. Plant salinity stress; many unanswered questions remain [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10:80.
- [17] 岩学斌,袁金海. 盐胁迫对植物生长的影响[J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(4):30-33.
- [18] LI H, LA S K, ZHANG X, et al. Salt-induced recruitment of specific root-associated bacterial consortium capable of enhancing plant adaptability to salt stress [J]. *The ISME Journal*, 2021, 15(10):2865-2882.
- [19] 马玲. 干旱胁迫对油菜种子萌发的影响[J]. *中国农业文摘·农业工程*, 2024, 36(4):38-42.
- [20] WANG Y P, GUO Y, LI C L, et al. Rhizosphere microorganisms mediate ion homeostasis in cucumber seedlings: a new strategy to improve plant salt tolerance [J]. *BMC Plant Biology*, 2025, 25:670. DOI:10.1186/s12870-025-06699-0.
- [21] ZHANG H M, KIM M S, SUN Y, et al. Soil bacteria confer plant salt tolerance by tissue-specific regulation of the sodium transporter HKT1 [J]. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 2008, 21(6):737-744.
- [22] FINCHEIRA P, QUIROZ A. Microbial volatiles as plant growth inducers [J]. *Microbiological Research*, 2018, 208:63-75.
- [23] 周璐璐,伏兵哲,许冬梅,等. 盐胁迫对沙芦草萌发特性影响及耐盐性评价[J]. *草业科学*, 2015, 32(8):1252-1259.
- [24] 谷清义,王妍佳,李梦楠,等. 枯草芽孢杆菌 BSCY-1 对黄瓜种子萌发和幼苗生长特性的影响[J]. *北方园艺*, 2024(10):17-23.
- [25] PÉREZ-GARCÍA L A, SÁENZ-MATA J, FORTIS-HERNÁNDEZ M, et al. Plant-growth-promoting rhizobacteria improve germination and bioactive compounds in cucumber seedlings [J]. *Agronomy*, 2023, 13(2):315.
- [26] SHARMA A, SHUKLA A, GUPTA M. Effect of bioagents on cucumber seed mycoflora, seed germination, and seedling vigour [J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1):6052.
- [27] 赵虎. 外源物质对黄瓜种子萌发及幼苗生长的影响[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2019.
- [28] 杜长霞,邵俏赛,樊怀福,等. 外源 NO 对 Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 胁迫下黄瓜幼苗生长和抗氧化系统的影响[J]. *核农学报*, 2013, 27(6):854-860.
- [29] WANG S L, KU S S, YE X G, et al. Current status of genetic transformation technology developed in cucumber (*Cucumis sativus* L.) [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(3):469-482.
- [30] 张丽平. 盐碱胁迫对黄瓜种子发芽和幼苗生理代谢的影响[D]. 泰安:山东农业大学, 2008.
- [31] 卢凤刚,樊新华,夏彦辉,等. 盐碱混合胁迫对黄瓜幼苗根系主要生理代谢的影响[J]. *北方园艺*, 2013(15):33-35.
- [32] 付玲,包颖,范永山. 外源水杨酸对黄瓜幼苗生长和离子吸收的影响[J]. *唐山师范学院学报*, 2022, 44(3):54-58.
- [33] CHEN L, LIU L T, LU B, et al. Exogenous melatonin promotes seed germination and osmotic regulation under salt stress in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) [J]. *PLoS One*, 2020, 15(1):e0228241.
- [34] 范潇琪. 盐胁迫对公园花卉生长影响的研究进展[J]. *现代园艺*, 2023(24):26-27,30.
- [35] EL-DAKAK R A, BADR R H, ZEINELDEIN M H, et al. Effect of chilling and salinity stress on photosynthetic performance and ultrastructure of chloroplast in faba beans (*Vicia faba* L.) leaves [J]. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 2023, 34(2):447-456.
- [36] SADAK M S, HANAFY R S, ELKADY F M A M, et al. Exogenous calcium reinforces photosynthetic pigment content and osmolyte, enzymatic, and non-enzymatic antioxidants abundance and alleviates salt stress in bread wheat [J]. *Plants*, 2023, 12(7):1532.
- [37] EL-BANNA M F, MOSA A. Exogenous application of proline mitigates deteriorative effects of salinity stress in NFT closed-loop system: an ultrastructural and physio-biochemical investigation on hydroponically grown tomato (*Solanum lycopersicon* L.) [J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 330:113061.
- [38] HU W, ZHANG Y P, RONG X M, et al. Coupling amendment of biochar and organic fertilizers increases maize yield and phosphorus uptake by regulating soil phosphatase activity and phosphorus-acquiring microbiota [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 355:108582.
- [39] BOUBEKRI K, SOUMARE A, MARDAD I, et al. The screening of potassium- and phosphate-solubilizing Actinobacteria and the assessment of their ability to promote wheat growth parameters [J]. *Microorganisms*, 2021, 9(3):470.
- [40] LUGTENBERG B, KAMILOVA F. Plant-growth-promoting rhizobacteria [J]. *Annual Review of Microbiology*, 2009, 63:541-556.

(责任编辑:陈海霞)