

巨大芽胞杆菌 CJLC2 菌株对盐胁迫下番茄生长及耐盐生理生化指标的影响

罗 欢 伍辉军 谢永丽 高学文*

(南京农业大学植物保护学院, 农作物生物灾害综合治理教育部重点实验室, 南京 210095)

摘要: 为增强番茄耐盐能力, 采用菌液浸种、灌根以及蒽酮比色和钼锑抗显色等方法, 研究巨大芽胞杆菌 *Bacillus megaterium* CJLC2 菌株增强番茄耐盐能力的效果及其作用机制。在非 NaCl 胁迫条件下, CJLC2 菌株显著促进番茄的生长, 对根长、株高和鲜重的促生率分别为 14.33%、9.20% 和 17.75%。在 NaCl 胁迫条件下, 随 NaCl 浓度增加对番茄的生长抑制作用增大, 而 CJLC2 菌株在一定程度上提高了番茄对 NaCl 耐受能力。其中, 番茄对 100 mmol/L NaCl 的耐受能力显著提高, 加菌处理对根长、株高和鲜重的促生率分别为 17.05%、18.04% 和 15.81%。CJLC2 菌株可提高番茄叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量, 在 200 mmol/L NaCl 处理时效果显著, 分别提高了 40% 和 41%。CJLC2 菌株还影响番茄矿物质元素的含量, 其中在 100 mmol/L NaCl 胁迫下, 加菌处理番茄根系磷、钾、铁、铜和锌的含量以及 K^+/Na^+ 比值分别提高 190%、12.88%、6.80%、34.78%、10.17% 和 50.72%, 而根系钠的含量降低 25.11%。此外, CJLC2 菌株可降低受害番茄乙烯的含量。研究表明, 巨大芽胞杆菌 CJLC2 菌株通过提高番茄耐盐相关生理生化指标, 增强番茄的耐盐能力并促进其生长。

关键词: 巨大芽胞杆菌; 盐胁迫; 番茄; 生理生化指标

Effects of *Bacillus megaterium* CJLC2 on the growth and the salt-tolerance related physiological and biochemical characters of tomato under salt stress

Luo Huan Wu Huijun Xie Yongli Gao Xuewen*

(Key Laboratory of Integrated Management of Crop Diseases and Pests, Ministry of Education, College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, Jiangsu Province, China)

Abstract: In this study, different methods, including seed soaking, root drenching, anthrone colorimetry, and Mo anti-antimony colorimetry, were used to study the effects and the corresponding mechanisms of the *Bacillus megaterium* CJLC2 on the salt-tolerance of tomato. The results showed that CJLC2 could significantly increase the growth of tomato at the absence of NaCl, and the promotion rates of root length, plant height and fresh weight of tomato were 14.33%, 9.20% and 17.75%, respectively. Under the salt stress of NaCl, the increase of NaCl concentration had stronger inhibitory effect on tomato growth. However, CJLC2 could improve the tolerance of tomato to NaCl to a certain extent. The best effect was achieved when the tomato was treated with 100 mmol/L NaCl, in which CJLC2 could increase the root length, plant height and fresh weight by 17.05%, 18.04% and 15.81%, respectively. When the tomato

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201303015), 国家“863”计划(2012AA101504), 国家自然科学基金(31100056), 高等学校博士学科点(20100097120011)

作者简介: 罗欢, 男, 1988年生, 硕士研究生, 研究方向为分子植物病理学和植物病害生物防治, E-mail: manns2008@yeah.net

* 通讯作者(Author for correspondence), E-mail: gaoxw@njau.edu.cn, Tel/Fax: 025-84395268

收稿日期: 2013-03-25

seedlings were treated with 200 mmol/L NaCl, CJLC2 could increase the contents of soluble sugars and soluble proteins of the tomato by 40% and 41%, respectively. When the tomato seedlings were treated with 100 mmol/L NaCl, CJLC2 could improve the contents of P, K, Fe, Cu, Zn, and K^+/Na^+ ratio in tomato roots by 190%, 12.88%, 6.80%, 34.78%, 10.17%, and 50.72%, respectively, and CJLC2 could also reduce the content of the Na by 25.11%. The results also indicated that CJLC2 could reduce the content of ethylene in damaged tomatoes. Overall, *B. megaterium* CJLC2 could improve the salt tolerance of tomato and promote the growth by enhancing the salt-tolerance related physiological and biochemical characters.

Key words: *Bacillus megaterium*; salt stress; tomato; physiological and biochemical characters

土壤盐渍化所带来的盐胁迫是世界范围内影响农业生产的重要环境因子,其引起的离子毒害和渗透胁迫等对植物的生长、植被分布和农业生产均造成了较大的影响^[1-2]。据统计,我国盐碱地总面积在 0.33 亿公顷以上,主要分布在滨海、东北、西北、黄河中上游和黄淮海平原地区在内的 17 个省份^[3]。土壤含盐量在 0.2%~0.5% 不利于植株生长,而盐碱地的含盐量高达 0.6%~10%,严重危害植物的正常生长发育^[4]。因此,研究农作物的耐盐机制,以及开发能提高作物耐盐能力的产品具有重要的理论和现实意义。

芽胞杆菌 *Bacillus* spp. 能产生抗逆性强的内生孢子和丰富的抗菌物质,是目前生物防治领域研究和应用较多的一类细菌^[5]。一些芽胞杆菌对多类植物病原真菌和细菌等引起的病害具有较好的防治效果^[6-8]。研究表明一些芽胞杆菌能提高植物的耐盐能力,从而使植物在含盐量高的环境中正常生长。Bochow 等^[9]报道了枯草芽胞杆菌 FZB24 菌株可显著提高茄子和辣椒的耐盐性,且在番茄试验中也得到类似的结果^[10]。枯草芽胞杆菌 FZB42 菌株能提高黄瓜根际过氧化氢酶、脲酶和碱性磷酸酶的活性^[11],以及提高光合效率和生理生化代谢水平等,从而增强黄瓜的耐盐性、改善作物品质和提高产量^[12]。芽胞杆菌 BCL-8 菌株与产酸克雷伯氏菌 *Klebsiella oxytoca* Rs-5 菌株的复配制剂可有效防治棉花立枯病,并且显著提高棉花的耐盐性^[13]。

巨大芽胞杆菌 *Bacillus megaterium* 是芽胞杆菌属的一种重要细菌,已广泛应用于农业和工业生产中,并产生了巨大的经济价值。在农业上,巨大芽胞杆菌具有解磷和固钾的功能,是生产有机肥常用的菌种^[14]。此外,该菌还具有促进作物增产和防治作物病害的功能^[15-17]。在工业上,巨大芽胞杆菌常用于生产多种工业酶类,如淀粉酶等^[18]。该菌是水体处理剂的常用菌种,可降低水体中的有机氮和磷的

含量以及降解废水中的氰化物和亚硝酸盐^[19-21]。但是有关巨大芽胞杆菌在非生物逆境下的作用,特别是与盐胁迫相关的研究报道较少,为此,本试验研究了盐胁迫条件下巨大芽胞杆菌对番茄生长及耐盐性的影响,并通过检测番茄耐盐相关生理生化指标,探讨巨大芽胞杆菌提高番茄耐盐能力的机制。

1 材料与方法

1.1 材料

巨大芽胞杆菌 *B. megaterium* CJLC2 菌株,由本实验室分离鉴定。番茄品种为苏红 2003,江苏省江蔬种苗科技有限公司生产。栽培土壤为优质纯草碳粉,黑龙江地宝有限公司生产。LB 液体培养基:10 g/L 胰蛋白胨、5 g/L 酵母提取物、10 g/L 氯化钠。将 CJLC2 菌株接种于 LB 液体培养基中,在 28℃ 摇床内 200 r/min 培养 24~36 h 后,5 000 r/min 离心去上清,菌体用无菌水稀释或不同浓度的 NaCl 溶液悬浮,配制成 10^8 CFU/mL 的菌悬液,用于试验。

1.2 方法

1.2.1 促生效果的检测

将用无菌水和菌悬液浸泡 2 h 的番茄种子,分别播种于口径 8 cm、深 10 cm 的含优质纯草碳粉栽培土壤的塑料杯中,每杯播种 3 粒种子,出苗后每隔 2 d 浇 1 次透水。番茄出苗 7 d 后,仅保留长势良好、均一的幼苗 1 株。待幼苗长出 3~4 片叶时,开始进行盐胁迫处理,每隔 2~3 d 处理 1 次。幼苗生长 7 周后测定根长、株高、鲜重。试验设 8 个处理:① 50 mmol/L NaCl;② 50 mmol/L NaCl 中含有 10^8 CFU/mL 的菌悬液;③ 100 mmol/L NaCl;④ 100 mmol/L NaCl 中含有 10^8 CFU/mL 的菌悬液;⑤ 200 mmol/L NaCl;⑥ 200 mmol/L NaCl 中含有 10^8 CFU/mL 的菌悬液;⑦ 无 NaCl 的 10^8 CFU/mL 菌悬液;⑧ 无盐胁迫、不加菌(CK)。每处理 3 次重复,每重复 10 杯,每处理共 30 株苗。除乙烯释放量的检测外,完成促

生效果检测的幼苗,再用于检测番茄的耐盐相关生理生化指标。

1.2.2 番茄耐盐相关生理生化指标的检测

可溶性糖和可溶性蛋白含量:称取上述不同处理的番茄幼苗叶片 0.5 g,分别采用蒽酮比色法和考马斯亮蓝法测定可溶性糖和可溶性蛋白含量。

根系矿物质元素:将上述不同处理的番茄幼苗根系于 105 ℃ 杀青 15 min,70 ℃ 烘 48 h。将烘干后的叶片用咖啡机磨碎成粉末。称取 0.15 g 该粉末样品,参照文献[22-23]的方法测定离子含量,根系中磷和钾元素测定采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,钠、铁、铜、锌元素采用 HNO₃-HClO₄ 消煮,然后用原子吸收分光光度计测定,磷元素用钼锑抗显色法测定^[24]。

乙烯释放量:番茄种子处理及其播种同 1.2.1。待番茄出苗 7 d 后,开始处理。并分别于处理后 8、10、12、14、16 d,将不同处理的番茄幼苗置于密闭的 500 mL 三角瓶中 2 h,收集乙烯,取 500 μL 待测样品,注入色谱柱,参照 Mayak 等^[25]的方法测定乙烯释放量。试验设 4 个处理:①100 mmol/L NaCl;②100 mmol/L NaCl 中含有 10⁸ CFU/mL 的菌悬液;③无 NaCl 的 10⁸ CFU/mL 菌悬液;④无盐胁迫、不加

菌(CK)。

1.3 数据统计分析

所有数据均利用 Excel 2003 进行处理,采用 SPSS 16.0 统计软件进行单因素方差分析,LSD 法检验各参数不同处理间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 CJLC2 菌株对盐胁迫下番茄幼苗生长的影响

在非 NaCl 胁迫条件下,CJLC2 菌株显著促进番茄的生长,对根长、株高和鲜重的促生率分别为 14.33%、9.20% 和 17.75%。单纯 NaCl 处理显著降低了番茄幼苗的根长、株高和鲜重,并随着盐浓度的增大对番茄生长的抑制作用增强(表 1)。CJLC2 菌株处理后,与相应对照纯 NaCl 处理相比显著提高了番茄的生物量。在 100 mmol/L NaCl 浓度下,加菌处理根长和株高分别为 10.09 cm 和 25.19 cm,与不加菌处理比较,促生率分别为 17.05% 和 18.04%;在 200 mmol/L NaCl 浓度下,加菌处理株高为 23.23 cm,与不加菌处理比较,促生率达到 27.35%(表 1)。说明 CJLC2 菌株能提高番茄幼苗的耐盐性,促进番茄幼苗的生长。

表 1 CJLC2 菌株对盐胁迫下番茄幼苗生长的影响

Table 1 Effects of CJLC2 on the growth of tomato seedlings under salt stress

处理 Treatment	根长 Root length		株高 Plant height		植株鲜重 Fresh weight	
	均值 (cm)	促生率(%)	均值 (cm)	促生率(%)	均值 (g)	促生率(%)
	Mean	Promoting rate	Mean	Promoting rate	Mean	Promoting rate
50 mmol/L NaCl	11.14 ± 0.53 d	—	24.01 ± 0.16 d	—	4.59 ± 0.27 c	—
50 mmol/L NaCl + CJLC2	12.36 ± 0.31 c	10.95	25.76 ± 0.54 c	7.29	4.87 ± 0.37 bc	6.10
100 mmol/L NaCl	8.62 ± 0.71 f	—	21.34 ± 0.63 f	—	3.73 ± 0.45 d	—
100 mmol/L NaCl + CJLC2	10.09 ± 0.12 e	17.05	25.19 ± 0.35 cd	18.04	4.32 ± 0.42 cd	15.81
200 mmol/L NaCl	7.67 ± 0.40 fg	—	18.24 ± 0.39 f	—	2.85 ± 0.38 ef	—
200 mmol/L NaCl + CJLC2	7.95 ± 0.18 g	3.65	23.23 ± 0.72 de	27.35	3.08 ± 0.51 e	8.07
CJLC2	15.32 ± 0.51 a	14.33	30.04 ± 0.28 a	9.20	5.97 ± 0.18 a	17.75
CK	13.40 ± 0.45 b	—	27.51 ± 0.43 b	—	5.07 ± 0.24 b	—

表中数据为平均数 ± 标准误。同列数据后不同字母表示经 LSD 法检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。Data in the table are mean ± SE. The different letters in the same column indicate significant difference at $P < 0.05$ level by LSD test.

2.2 番茄耐盐相关生理生化指标的检测结果

2.2.1 可溶性糖和可溶性蛋白含量

在单纯盐胁迫条件下,随着 NaCl 浓度增加,番茄叶片可溶性糖含量呈上升趋势,加菌处理较单纯 NaCl 处理可溶性糖含量更高。其中,在 200 mmol/L NaCl 浓度下,加菌处理的可溶性糖含量为 2.1%,比

单纯 NaCl 处理提高了 40%(图 1)。

番茄叶片可溶性蛋白含量随 NaCl 浓度增加而明显上升。相同 NaCl 浓度胁迫条件下,巨大芽胞杆菌 CJLC2 处理可溶性蛋白含量较单纯 NaCl 处理增加。其中,在 200 mmol/L NaCl 浓度下,加菌处理的可溶性蛋白含量为 79 mg · g⁻¹ FW,比单纯 NaCl 处

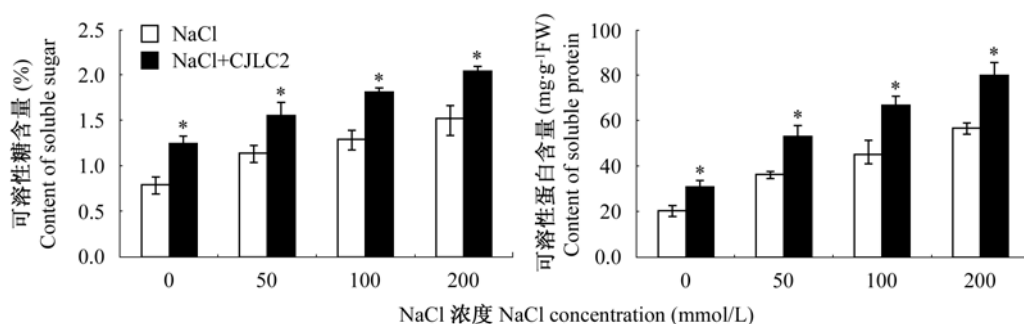


图1 CJLC2 菌株对盐胁迫下番茄叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响

Fig.1 Effects of CJLC2 on the contents of soluble sugars and soluble proteins in leaves of tomato seedlings under salt stress

* 表示经 LSD 法检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。* indicate significant difference at $P < 0.05$ by LSD test.

理的 $56 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FW}$ 提高了 41% (图 1)。

2.2.2 番茄根系矿质元素

在 NaCl 胁迫下,番茄根系磷和钾含量以及 K^+/Na^+ 比值都显著下降,而 CJLC2 菌株处理提高了根系对大量元素的吸收。在 100 mmol/L NaCl 浓度下,加菌处理磷和钾含量分别为 $2.9 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FW}$ 和 $18.4 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FW}$,比不加菌处理提高了 190% 和 12.88%。同时,与单纯 NaCl 相比,加菌处理后的 K^+/Na^+ 比值有所提高。根系中钠含量随着 NaCl 浓度的增加而升高, 200 mmol/L NaCl 处理的钠含量为 $30.6 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FW}$, 是对照的近 6 倍。在 100 mmol/L NaCl 浓度下,加菌处理钠含量为 17.6

$\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FW}$, 比不加菌处理降低了 25.11% (表 2)。说明加菌降低番茄根系钠含量和增加钾含量,并维持植株正常生长的 K^+/Na^+ 比例平衡。

随着 NaCl 浓度增加,番茄幼苗根系对铁、铜和锌的吸收受到显著抑制,加菌处理提高了根系对微量元素的吸收。 100 mmol/L NaCl 浓度下,加菌处理的番茄根系铁、铜和锌含量分别为 94.2 、 3.1 、 $6.5 \mu\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FW}$,比单纯 NaCl 处理提高 6.80%、34.78% 和 10.17%; 200 mmol/L NaCl 浓度下,加菌的植株根系铜含量为 $2.8 \mu\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ FW}$,比单纯 NaCl 处理提高 40% (表 3)。表明 CJLC2 菌株可以改善番茄对微量元素的吸收,特别是对铜的吸收。

表2 CJLC2 菌株对盐胁迫下番茄根系大量元素含量的影响

Table 2 Effects of CJLC2 on the contents of macroelements in roots of tomato seedlings under salt stress

处理 Treatment	磷 P		钠 Na		钾 K		K^+/Na^+	
	含量 Content ($\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ FW)	提高率 Promotion rate (%)	含量 Content ($\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ FW)	提高率 Promotion rate (%)	含量 Content ($\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ FW)	提高率 Promotion rate (%)	比值 Ratio	提高率 Promotion rate (%)
100 mmol/L NaCl	$1.0 \pm 0.05 \text{ c}$	—	$23.5 \pm 1.1 \text{ c}$	—	$16.3 \pm 1.4 \text{ c}$	—	0.6936	—
100 mmol/L NaCl + CJLC2	$2.9 \pm 0.09 \text{ a}$	190.00	$17.6 \pm 2.1 \text{ d}$	-25.11	$18.4 \pm 1.2 \text{ b}$	12.88	1.0454	50.72
200 mmol/L NaCl	$0.8 \pm 0.04 \text{ de}$	—	$30.6 \pm 1.4 \text{ a}$	—	$16.7 \pm 0.8 \text{ c}$	—	0.5457	—
200 mmol/L NaCl + CJLC2	$2.3 \pm 0.13 \text{ b}$	187.50	$26.3 \pm 1.7 \text{ b}$	-14.05	$17.5 \pm 0.5 \text{ bc}$	4.80	0.6654	21.94
CK	$0.8 \pm 0.02 \text{ e}$	—	$5.2 \pm 0.3 \text{ e}$	—	$21.0 \pm 0.6 \text{ a}$	—	4.0384	—

表中数据为平均数 $\pm$ 标准误。同列数据后不同字母表示经 LSD 法检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。Data in the table are mean $\pm$ SE. The different letters in the same column indicate significant difference at $P < 0.05$ level by LSD test.

2.2.3 乙烯释放量

盐胁迫 8 d 后,各处理的番茄幼苗乙烯释放量均随时间的延长而增加,其中单纯 NaCl 处理上升趋势较明显,且乙烯释放量也较多。盐胁迫 14 d 后,单纯 NaCl 处理的乙烯含量达到 $15 \text{ nL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 是对照的 2 倍,而 CJLC2 菌株处理降低了番茄幼苗

乙烯释放量,为 $12.4 \text{ nL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,比单纯 NaCl 处理降低了 17.33%。盐胁迫 16 d 后,NaCl 处理的乙烯释放量较高,为 $34 \text{ nL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,加菌处理乙烯释放量为 $23 \text{ nL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,比单纯 NaCl 处理降低了 32.35% (图 2)。

表 3 CJLC2 菌株对盐胁迫下番茄根系微量元素含量的影响

Table 3 Effects of CJLC2 on the contents of microelements in roots of tomato seedlings under salt stress

处理 Treatment	铁 Fe		铜 Cu		锌 Zn	
	含量	提高率	含量	提高率	含量	提高率
	Content ($\mu\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1} \text{FW}$)	Promotion rate (%)	Content ($\mu\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1} \text{FW}$)	Promotion rate (%)	Content ($\mu\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1} \text{FW}$)	Promotion rate (%)
100 mmol/L NaCl	88.2 $\pm$ 5.1 bc	—	2.3 $\pm$ 0.3 d	—	5.9 $\pm$ 0.3 d	—
100 mmol/L NaCl + CJLC2	94.2 $\pm$ 2.7 ab	6.80	3.1 $\pm$ 0.7 a	34.78	6.5 $\pm$ 0.5 bc	10.17
200 mmol/L NaCl	80.3 $\pm$ 5.6 d	—	2.0 $\pm$ 0.3 e	—	5.3 $\pm$ 0.8 e	—
200 mmol/L NaCl + CJLC2	83.2 $\pm$ 4.2 cd	3.61	2.8 $\pm$ 0.6 b	40.00	6.3 $\pm$ 0.4 cd	18.87
CK	95.1 $\pm$ 2.6 a	—	2.5 $\pm$ 0.3 cd	—	7.1 $\pm$ 0.6 a	—

表中数据为平均数 $\pm$ 标准误。同列数据后不同字母表示经 LSD 法检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。Data in the table are mean $\pm$ SE. The different letters in the same column indicate significant difference at $P < 0.05$ level by LSD test.

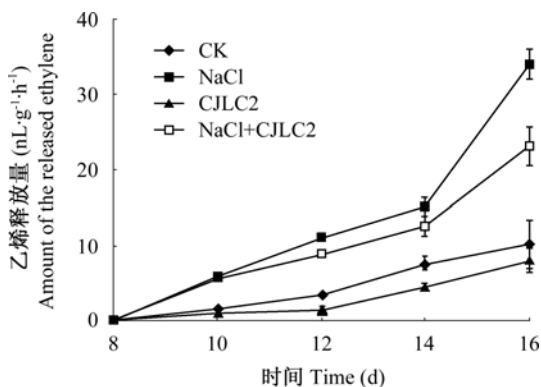


图 2 CJLC2 菌株对盐胁迫下番茄幼苗乙烯释放量的影响

Fig. 2 Effects of CJLC2 on the amount of the released ethylene by tomato seedlings under salt stress

3 讨论

植物耐盐性的直接指标是生物量,即植物对盐胁迫反应的综合表现^[26]。在盐胁迫条件下,巨大芽胞杆菌 CJLC2 菌株处理番茄后,植物的耐盐能力取决于其自身的耐盐能力和 CJLC2 菌株的促生能力。本试验结果显示,盐胁迫抑制了番茄幼苗的生长,且随着 NaCl 浓度的增加对番茄幼苗生长的抑制作用逐渐增强。番茄幼苗耐盐能力的提高得益于 CJLC2 菌株的促生作用,即能够缓解盐胁迫对番茄造成伤害,并提高了番茄幼苗生物量,使植株长势更为良好。

高等植物耐盐机制之一是通过有机小分子物质如可溶性蛋白和可溶性糖的积累,降低细胞渗透势而进行渗透调节^[1-2, 27]。El-Samad & Shaddad^[28]研究发现,大豆品种耐盐性与可溶性蛋白积累较多有关。刘艳等^[29]研究也证实通过积累渗透调节物质提高甘草吸水 and 保水能力,可有效抵御逆境。本试验中,CJLC2 菌株提高了盐胁迫下番茄叶片可溶

性蛋白、可溶性糖含量以调节细胞内的渗透势、维持水分平衡,使番茄植株能够适应盐胁迫的环境。

植物生长需要矿质营养,在盐胁迫下植物所表现出的对矿质元素吸收以及运输的改变,使得植物生长延缓甚至停止,而植物可以通过对无机离子的种类、浓度和比例的调节,维持细胞内外的离子平衡。本试验中盐胁迫使番茄根部钠含量急剧升高、钾含量下降,打破番茄正常吸收矿质营养的平衡机制,植株生长受到影响。维持细胞内高 K^+/Na^+ 是植物耐盐的关键因素。同时,CJLC2 菌株处理使得番茄对磷的吸收比单纯盐胁迫增加了 190%,这可能是源自 CJLC2 自身的解磷能力。通常植物对微量元素的需要量很少,但任何一个元素的缺乏都会影响植物的正常生长^[30]。CJLC2 菌株处理后,根系铜、铁和锌等元素含量提高,促进了番茄叶绿素生成、碳水化合物形成,以及一些生理代谢反应。

乙烯普遍存在于高等植物中,在应对生物胁迫和非生物胁迫过程中具有重要的作用。关于乙烯调控与植物抗逆性形成相关的生理生化过程有两种推测。一种认为植物合成乙烯是植物受害后的症状表现,高浓度的乙烯会抑制植株的生长,因而,可以通过降低乙烯释放量提高植物的抗逆性;另一种则认为植物合成乙烯是植物在逆境中的一种适应现象,可通过启动和调节某些与逆境适应相关的生理生化过程诱导植物的抗逆性^[31]。Mayak 等^[25, 32]研究也发现有些根围促生菌能降低番茄幼苗的乙烯水平,从而调节植物生长,并认为乙烯的产生涉及到信号转导途径。本试验中盐胁迫增加了乙烯的释放量,并且乙烯释放量随胁迫时间的延长而增加,而巨大芽胞杆菌处理后降低了番茄在盐胁迫后的乙烯释放量,提高了植株对盐胁迫的适应能力。

本试验初步揭示了巨大芽孢杆菌 CJLC2 菌株增强番茄耐盐能力的生理生化机制。CJLC2 菌株能不同程度地缓解盐胁迫对番茄幼苗的影响,促进植株生长,提高番茄耐盐性。芽孢杆菌与植物互作,防治植物病害和提高植物的抗逆性是一个非常复杂的过程,与其在植物根际的定殖部位、密度和互作时间等密切相关,因此,有关巨大芽孢杆菌提高番茄耐盐能力的机制还有待进一步研究。

参考文献(References)

- [1] 闫道良,连俊方,任燕燕,等. 盐胁迫下施氮对海滨锦葵营养生长期生长的影响. 浙江农林大学学报,2012,29(6): 817-821
- [2] Munns R. Genes and salt tolerance: bringing them together. *New Phytologist*, 2005, 167(3): 645-663
- [3] 刘永信,王玉珍. 盐碱地区域化种植耐盐植物可行性研究. 宁夏农林科技,2011,52(5):49-50
- [4] 王丽媛,丁国华,黎莉. 脯氨酸代谢的研究进展. 哈尔滨师范大学自然科学学报,2010(2):84-89
- [5] 谢永丽,徐志伟,马莉贞,等. 青海北山林场桦树根围芽孢杆菌分子鉴定及其拮抗活性分析. 植物保护学报,2012,39(3):246-252
- [6] 刘卹洲,陈志谊,刘永锋,等. 枯草芽孢杆菌 sf 628 对梨炭疽病的控制作用. 植物保护学报,2012,39(6):492-496
- [7] 黄庶识,黄曦,张荣灿,等. 枯草芽孢杆菌对离体荔枝果实霜疫霉病、炭疽病的防治效果. 植物保护学报,2011,38(3): 247-252
- [8] 刘伟,沈小英,段军娜,等. 抗烟草青枯病菌的芽孢杆菌筛选和鉴定. 植物保护学报,2013,40(1):95-96
- [9] Bochow H, El-Sayed S F, Junge H, et al. Use of *Bacillus subtilis* as biocontrol agent. IV. Salt-stress tolerance induction by *Bacillus subtilis* FZB24 seed treatment in tropical vegetable field crops, and its mode of action. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz*, 2001, 108(1): 21-30
- [10] Woiatke M, Junge H, Schnitzler W H. *Bacillus subtilis* as growth promotor in hydroponically grown tomatoes under saline conditions. *Acta Horticulturae*, 2004, 659(1): 363-369
- [11] 闫海霞,郭世荣,刘伟. 枯草芽孢杆菌对盐胁迫条件下黄瓜根际酶活性的影响. 华北农学报,2010,25(4): 209-212
- [12] 尹汉文,郭世荣,刘伟,等. 枯草芽孢杆菌对黄瓜耐盐性的影响. 南京农业大学学报,2006,29(3):18-22
- [13] 赵雅峰,陶晶,武占省,等. 组合生防菌与解盐促生菌复配对棉花的促生效应. 中国农业科学,2010,43(22): 4754-4760
- [14] 陈凯,李纪顺,杨合同,等. 巨大芽孢杆菌 P1 的解磷效果与发酵条件研究. 中国土壤与肥料,2010(4):73-76
- [15] 胡小加,江木兰,张银波. 巨大芽孢杆菌在油菜根部定殖和促生作用的研究. 土壤学报,2004,41(6): 946-948
- [16] Kildea S, Ransbotyn V, Khan M R, et al. *Bacillus megaterium* shows potential for the biocontrol of septoria tritici blotch of wheat. *Biological Control*, 2008, 47(1): 37-45
- [17] Kong Q, Shan S H, Liu Q Z, et al. Biocontrol of *Aspergillus flavus* on peanut kernels by use of a strain of marine *Bacillus megaterium*. *International Journal of Food Microbiology*, 2010, 139(1/2): 31-35
- [18] 牟琳,王红宁,邹立扣. 巨大芽孢杆菌表达外源蛋白的特点及其研究进展. 中国生物工程杂志,2008,28(4): 93-97
- [19] 吴伟,瞿建宏,胡庚东,等. 巨大芽孢杆菌对池塘微碱性水体中磷的形态和含量的影响. 农业环境科学学报,2008,27(4):1508-1513
- [20] 王琳,李季,张鹏岩. 巨大芽孢杆菌对富营养化景观水体的净化效果. 生态环境学报,2009,18(1): 75-78
- [21] 张莹,刘萍,孙君社等. 巨大芽孢杆菌发酵降解亚硝酸盐动力学研究. 中国酿造,2011(10):24-28
- [22] 罗庆云,於丙军,刘友良. NaCl胁迫下Cl⁻和Na⁺对大豆幼苗胁迫作用的比较. 中国农业科学,2003,36(11): 1390-1394
- [23] 王宝山,赵可夫. 小麦叶片中Na,K提取方法的比较. 植物生理学通讯,1995,31(1): 50-52
- [24] 王彩云,黄普乐,陈红锋,等. 盆栽对节白蜡叶片中主要矿质元素含量的年变化. 植物生理学通讯,2000,36(3): 227
- [25] Mayak S, Tirosh T, Glick B R. Plant growth-promoting bacteria confer resistance in tomato plants to salt stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2004, 42(6): 565-572
- [26] Parida A K, Das A B. Effects of NaCl stress on nitrogen and phosphorous metabolism in a true mangrove *Bruguiera parviflora* grown under hydroponic culture. *Journal of Plant Physiology*, 2004, 161(8): 921-928
- [27] 汪贵斌,曹福亮,游庆方,等. 盐胁迫对4树种叶片中K⁺、Na⁺的影响及其耐盐能力的评价. 植物资源与环境学报,2001,10(1):30-34
- [28] El-Samad H M A, Shaddad M A K. Salt tolerance of soybean cultivars. *Biologia Plantarum*, 1997, 39(2): 263-269
- [29] 刘艳,陈贵林,蔡贵芳,等. 干旱胁迫对甘蓝幼苗生长和渗透调节物质含量的影响. 西北植物学报,2011,31(11): 2259-2264
- [30] Hu Y C, Schmidhalter U. Drought and salinity: a comparison of their effects on mineral nutrition of plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2005, 168(4): 541-549
- [31] 魏源文,胡春锦,李杨瑞. 乙烯在植物应答水分胁迫和病原菌浸染中的作用. 植物生理学通讯,2006,42(5): 981-985
- [32] Mayak S, Tirosh T, Glick B R. Plant growth-promoting bacteria that confer resistance to water stress in tomatoes and peppers. *Plant Science*, 2004, 166(2): 525-530

(责任编辑:吴竞一)