

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202206068

王宇萧, 刘明庆, 李妍, 等, 2023. 肉桂醛对 NaCl 胁迫下番茄幼苗生长特性的影响 [J]. 广西植物, 43(6): 1088–1096.
WANG YX, LIU MQ, LI Y, et al., 2023. Effects of cinnamaldehyde on growth characteristics of tomato seedlings under NaCl stress [J]. *Guihaia*, 43(6): 1088–1096.



肉桂醛对 NaCl 胁迫下番茄幼苗生长特性的影响

王宇萧^{1,3}, 刘明庆², 李妍², 黄思杰^{2*}, 杨立飞^{1,3}

(1. 南京农业大学 园艺学院, 南京 210095; 2. 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042;
3. 南京农业大学和县新农村发展研究院, 安徽 和县 238200)

摘 要: 为探明肉桂醛对番茄幼苗耐盐性的影响, 该研究以番茄‘合作 903’为试验材料, 探究肉桂醛 (100 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) 对处于 100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫下番茄种子萌发与幼苗生长特性的影响。在试验中设置 4 组处理: 对照 (CK, 蒸馏水)、NaCl (100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)、NaCl+CA (100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl + 100 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ CA)、CA (100 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)。结果表明: (1) 在 100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫下, 添加 100 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的肉桂醛, 番茄种子的发芽势和发芽率均有所提升, 番茄幼苗的根长和鲜重均显著提高, 说明添加肉桂醛对 NaCl 胁迫下番茄种子的萌发与幼苗生长均有一定缓解作用。(2) 肉桂醛能够有效降低 NaCl 胁迫导致的番茄幼苗根尖总活性氧 (reactive oxygen species, ROS) 的过量累积, 缓解膜脂过氧化程度从而降低细胞死亡率。综上表明, 肉桂醛处理能够通过缓解幼苗的氧化损伤程度, 提高番茄萌发与幼苗时期的耐盐性, 肉桂醛作为一种新型制剂具有在田间生产应用的潜力。

关键词: 番茄, 肉桂醛, NaCl 胁迫, 生长特性, 耐盐性

中图分类号: Q945 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2023)06-1088-09

Effects of cinnamaldehyde on growth characteristics of tomato seedlings under NaCl stress

WANG Yuxiao^{1,3}, LIU Mingqing², LI Yan², HUANG Sijie^{2*}, YANG Lifei^{1,3}

(1. College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China; 3. Hexian New Rural Development Research Institute, Nanjing Agricultural University, Hexian 238200, Anhui, China)

Abstract: In order to investigate the effects of cinnamaldehyde (CA) on salt tolerance of tomato seedlings, we used tomato ‘Cooperative 903’ as experimental material, and investigated the characteristics of germination and seedling growth of tomato under NaCl (100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) stress compared with the treatment of adding CA (100 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$). We set up four groups of treatments in the experiment: Control (CK, distilled water), NaCl (100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$), NaCl+CA (100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl + 100 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ CA), and CA (100 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$). The results were as follows: (1) With the application of

收稿日期: 2022-11-21

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金 [CX(20)3166]; 现代农业产业技术体系专项资金 (CARS-23-B16)。

第一作者: 王宇萧 (1999-), 硕士研究生, 主要从事蔬菜栽培生理与生物技术研究, (E-mail) yxwang@stu.njau.edu.cn。

* 通信作者: 黄思杰, 硕士, 农艺师, 主要从事有机农业、生态农业栽培技术方面的研究, (E-mail) hsjofrc@126.com。

CA, the germination potential and the germination rate of tomato seeds were both improved. The root length and fresh weight of tomato seedlings were also significantly increased under NaCl ($100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) stress. (2) CA could effectively alleviate the excessive accumulation, oxidative damage and cell death of total ROS caused by salt stress in roots of tomato seedlings. To sum up, CA can improve the salt tolerance of tomato during germination and seedling stage by alleviating the degree of oxidative damage of seedlings, and CA has the potential in field production as a new preparation.

Key words: tomato (*Solanum lycopersicum*), cinnamaldehyde, NaCl stress, growth characteristics, salt tolerance

设施栽培自我国农业生产结构调整以来得到大范围的推广,“十三五”期间,我国设施蔬菜面积基本稳定,年均增长率为 1% 左右(周杰等,2021)。随着连续种植年限的延长与种植面积的扩大,设施土壤次生盐渍化现象加重(李燕等,2022)。土壤次生盐渍化主要现象为土壤表层结白霜,土壤板结。这影响了作物苗期生长,致使农产品质量、产量下降(王梅等,2021)。目前,我国的番茄生产主要以设施栽培为主,番茄已成为我国设施栽培面积最大的蔬菜种类之一(田永强和高丽红,2021)。番茄(*Solanum lycopersicum*),对盐中度敏感(Daliakopoulos et al., 2019),土壤盐渍化现象严重影响设施番茄栽培效益。

近年研究发现,缓解盐害的最有效方式之一是利用外源物质调控植物自身的生理过程,提高其抗盐性。外源水杨酸和硫化氢(H_2S)单一或复配处理皆可提高加工番茄幼苗的耐盐性(张雪蒙等,2022);外源褪黑素可促进侧根及主根的发育,提高棉花(*Gossypium* spp.)的耐盐性(段文静等,2022);外源茉莉酸甲酯可通过调控玉米(*Zea mays*)幼苗 AsA-GSH 循环提高其抗盐性(陈芳等,2021)。

肉桂醛(cinnamaldehyde, CA),一种醛类有机化合物,具有桂皮油和肉桂油的辛香气和烧焦芳香味,香气强烈持久,在肉桂等植物中含量较多(Yang et al., 2021)。肉桂醛具有广谱抑菌作用,能够预防和治疗细菌或真菌引起的病害(张文平等,2003)。在蔬菜作物的应用上,肉桂醛对辣椒(*Capsicum annuum*)疫霉菌表现出较强的体外抑菌作用,并能抑制辣椒疫霉菌的侵染和致病性(李丽娜等,2016)。肉桂醛也可以用于缓解盐胁迫与重金属离子胁迫对植物造成的毒害作用。外源添加肉桂醛可以提高烟草(*Nicotiana tabacum*)幼苗抵御盐胁迫的能力(刘晓涵等,2021);肉桂醛也能缓解烟草幼苗中重金属镉胁迫所引起的生长抑

制、氧化损伤和细胞死亡,并能减少烟草根尖中因镉胁迫而产生的多余 H_2S ,缓解重金属对幼苗的毒害(凌天孝,2017)。鉴于植物免疫抵抗生物胁迫和非生物胁迫的通用性,我们推测肉桂醛在提高番茄耐盐性方面可能同样具备潜力。现有的研究主要通过发芽率和抗氧化酶活性等指标探讨植物刺激素通过提高抗氧化能力来改善非生物胁迫下种子萌发及幼苗生长情况,鲜有研究通过根系化学染色和荧光染色更直观和综合地分析幼苗细胞膜氧化损伤程度、根系活性氧积累程度及细胞死亡情况。因此,本研究以番茄‘合作 903’为试验材料,从番茄种子的萌发状况及幼苗化学染色和荧光染色所反映的根系氧化损伤程度两方面探讨外源肉桂醛处理是否能通过调控番茄生理生化过程提高其抗盐性。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验材料番茄‘合作 903’购自上海虹桥天龙种业有限公司。

1.2 试验方法

本试验于 2021 年 1 月在江苏省农业科学院农产品质量安全与营养研究所进行。挑选外形大小一致、饱满的番茄种子,用 1% 次氯酸钠消毒 15 min,蒸馏水反复冲洗干净后将种子放入 55°C 蒸馏水中吸涨 40 min 后放在铺有双层滤纸的培养皿内。前期预试验设置了 0、50、100、150、200 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 5 个 NaCl 处理浓度,进行萌发试验,根据发芽率、发芽势、根长、鲜重 4 个指标确定 NaCl 胁迫对番茄的半抑制浓度为 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,在 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫下加入不同浓度的肉桂醛(0、50、100、150、200 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$),根据发芽率和发芽势确定肉桂醛对 NaCl 胁迫的最佳缓解浓度为

100 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 后续试验采用以下 4 组处理: 对照 (CK, 蒸馏水)、NaCl (100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)、NaCl+CA (100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl + 100 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ CA)、CA (100 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)。每个处理重复 3 次, 处理液均直接加入发芽试验的培养皿内 (每皿 10 mL 处理液, 50 颗种子)。发芽后 7 d 测定各项指标。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 发芽指数

(1) 发芽势 (%) = (3 d 内正常发芽种子数/供试种子数) $\times 100$;

(2) 发芽率 (%) = (7 d 内发芽种子数/供试种子数) $\times 100$ 。

1.3.2 胚根长度 直尺测量番茄幼苗胚根长度。

1.3.3 幼苗鲜重 各处理分别收集幼苗 30 株, 用滤纸吸干幼苗表面水分, 用天平称量幼苗鲜重 (以 10 株为单位)。

1.3.4 根毛密度及侧根数量 在电子显微镜下对比 4 组处理的根毛密度及长度进行拍照并计数 4 组处理的侧根数量。

1.3.5 番茄幼苗根尖总 ROS 的测定 幼苗根尖的总活性氧 (ROS) 使用特定的荧光探针 DCFH-DA 进行检测 (Foreman et al., 2003)。将番茄幼苗根用双蒸水冲洗 3 次后孵育在 10 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 DCFH-DA 溶液中 25 $^{\circ}\text{C}$ 避光处理 20 min, 双蒸水冲洗 3 次后在荧光显微镜 (激发光波长为 488 nm, 发射光波长为 525 nm) 下拍照。照片使用 Image-Pro Plus 6.0 进行荧光密度值统计。

1.3.6 番茄幼苗根尖脂质过氧化物的组织化学分析 植物根尖的脂质过氧化物通过 Schiff base 试剂进行检测 (Wang, 1987)。将番茄幼苗根用双蒸水冲洗 3 次后, 浸泡在 Schiff base 试剂中 20 min, 然后用 0.5% (W/V) $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 溶液 (含 0.05 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl) 进行冲洗固定直至根的颜色变鲜亮后使用相机拍照。

1.3.7 番茄幼苗根尖细胞膜完整性的组织化学分析 植物根尖的细胞膜完整性通过 Evans blue 试剂进行检测 (Yamamoto et al., 2002)。方法同 1.3.6, 浸泡液改为 0.025% (W/V) 的 Evans blue 溶液, 时间为 15 min, 反复冲洗至无蓝色析出后进行拍照。

1.3.8 番茄幼苗根尖细胞死亡的组织化学分析 幼苗根尖的细胞死亡使用特定的荧光探针碘化丙啶 (propidium iodide, PI) 进行检测 (Kellermeier et al., 2002)。方法同 1.3.5, 孵化液改为 10 $\mu\text{mol} \cdot$

L^{-1} PI 溶液, 荧光显微镜激发光波长为 535 nm, 发射光波长为 615 nm。

1.4 数据统计与分析

试验数据采用 IBM Statistics SPSS 23.0 统计软件单因素方差分析 (ANOVA) 和 Duncan 多重比较进行差异显著性检验, 使用 Graphpad Prism 8.0 进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 NaCl 对番茄种子萌发及幼苗生长的影响

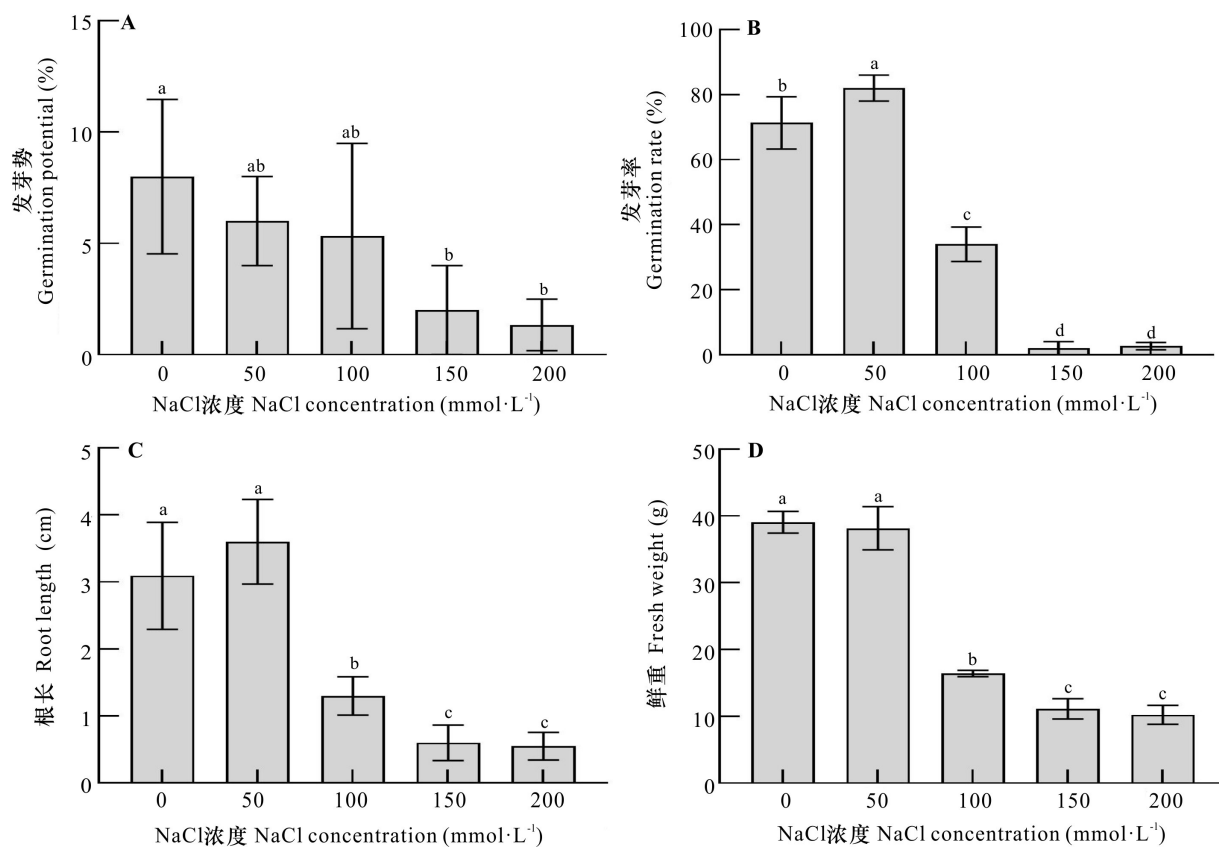
由图 1:A、B 可知, NaCl 胁迫在番茄种子的萌发过程中具有抑制作用。番茄种子发芽率总体随着盐胁迫浓度不断增加呈下降趋势, 但当盐浓度为 50 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 相较于 CK 发芽率提升了 14.95%, 说明低浓度的盐溶液对番茄种子萌发具有一定的促进作用。当盐浓度为 100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 发芽率下降了 52.34%, 显著抑制了番茄种子的萌发。当盐浓度为 150、200 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 发芽势与发芽率较 CK 均下降了 60% 以上, 说明高浓度的盐胁迫对番茄种子萌发过程有显著抑制作用, 并给种子造成了一定程度的致死伤害。

NaCl 胁迫对番茄幼苗的根长和鲜重也具有抑制作用。由图 1:C 可知, 当盐浓度为 100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 番茄幼苗根长相较于 CK 降低了 57.96%, 鲜重相较于 CK 下降了 57.95%, 均达到显著水平 ($P < 0.05$), 该浓度的 NaCl 处理显著抑制番茄幼苗的生长。由图 1:D 可知, 在 50 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫下, 番茄幼苗的根长与鲜重较 CK 差异均不显著, 表明番茄幼苗对低浓度的盐胁迫具有一定的适应性; 当 NaCl 浓度达到 150 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 番茄幼苗的根长、鲜重较 CK 分别下降了 80.59%、71.51%; 当 NaCl 浓度达到 200 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 幼苗的根长、鲜重较 CK 分别下降了 82.21%、73.76%, 差异均十分显著。

由图 1:C、D 可知, 在 100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaCl 浓度下番茄幼苗的根长与鲜重较 CK 均下降了 50% 左右, 因此该浓度即为 NaCl 对番茄幼苗生长的半抑制浓度, 后续试验选择该浓度作为盐处理浓度。

2.2 不同浓度肉桂醛对 NaCl 胁迫下番茄种子萌发及幼苗生长的影响

由图 2 可知, NaCl 胁迫抑制了番茄种子的萌发, 而不同浓度的肉桂醛溶液对此有不同程度的

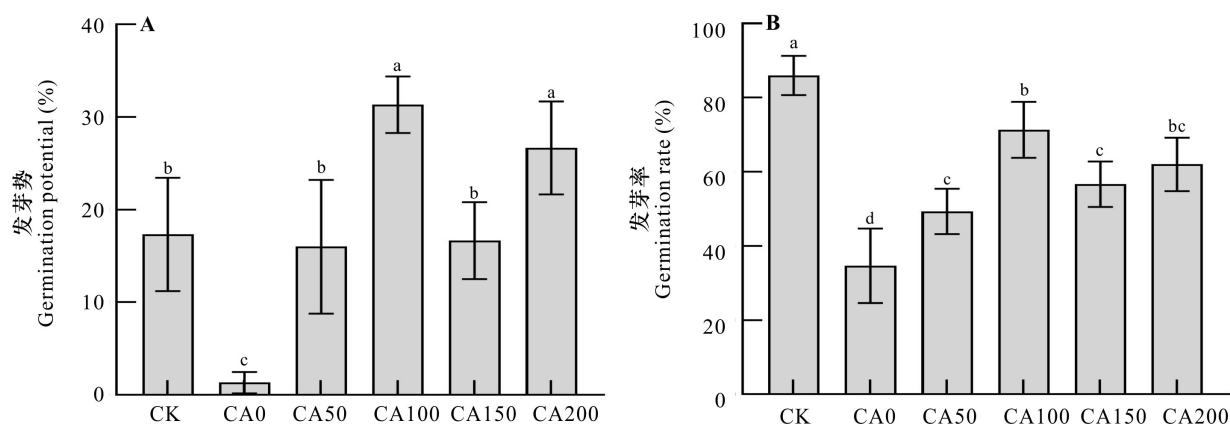


不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Different letters indicate significant differences between different treatments ($P < 0.05$). The same below.

图 1 不同浓度 NaCl 对番茄种子萌发及幼苗根长和鲜重的影响

Fig. 1 Effects of NaCl on tomato seed germination, root length and fresh weight of tomato seedlings



CA0、CA50、CA100、CA150、CA200 表示在 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 盐胁迫下分别添加 0、50、100、150、200 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的肉桂醛处理。

CA0, CA50, CA100, CA150, CA200 indicate 0, 50, 100, 150, 200 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ CA are added respectively under $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl salt stress.

图 2 不同浓度肉桂醛对 NaCl 胁迫下番茄种子萌发的影响

Fig. 2 Effects of different concentrations of cinnamaldehyde on tomato seed germination under NaCl stress

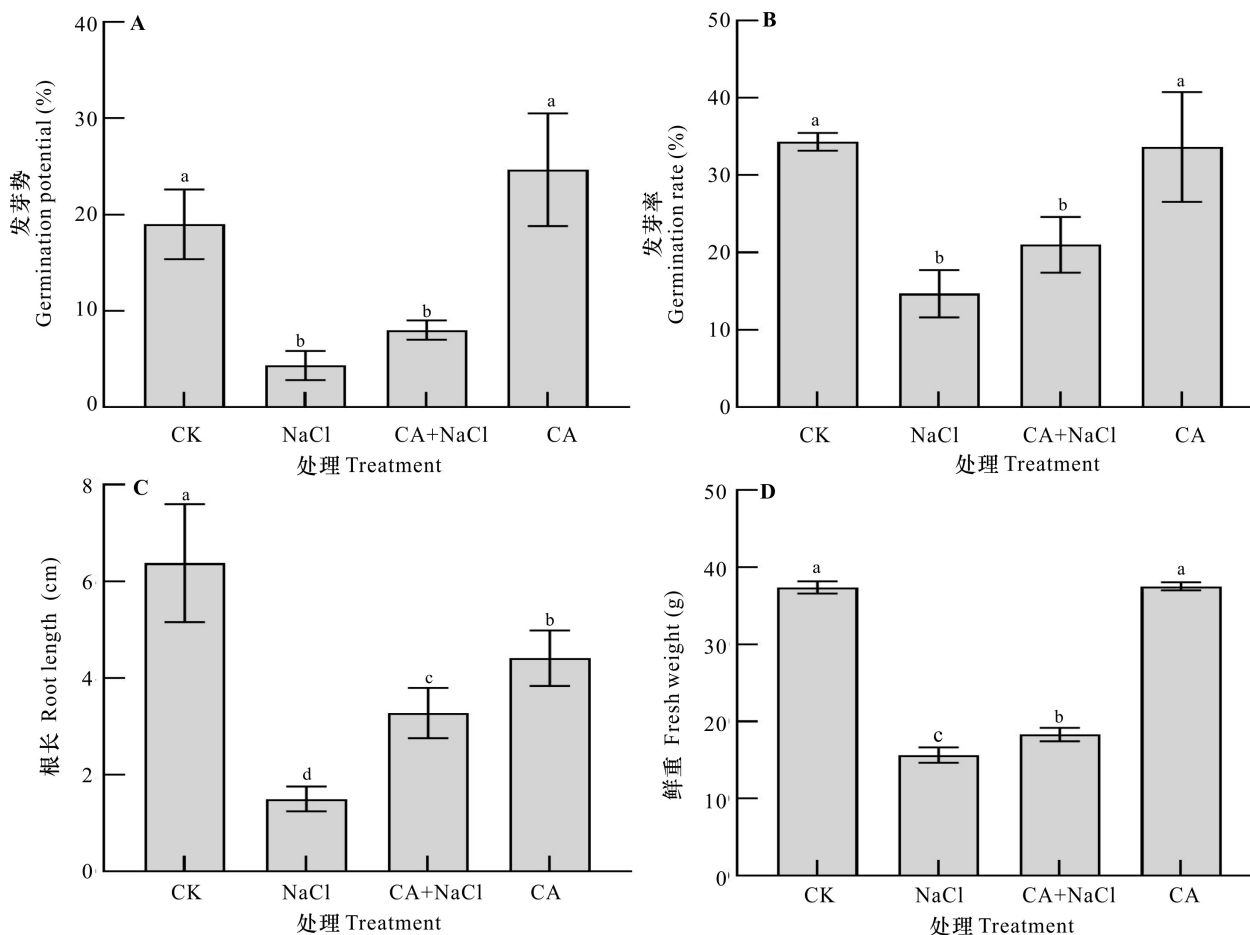


图 3 肉桂醛对 NaCl 胁迫下番茄种子萌发及幼苗根长和鲜重的影响

Fig. 3 Effects of cinnamaldehyde on tomato seed germination, root length and fresh weight of tomato seedlings under NaCl stress

缓解作用。随着肉桂醛浓度的提升,番茄种子的发芽势和发芽率均显著提高,在肉桂醛浓度为 $100 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时达到最大值,而在 150 、 $200 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时其发芽势和发芽率均降低,但仍然显著高于单独盐处理。由于 $100 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的肉桂醛能够表现出最佳的缓解盐胁迫抑制番茄种子萌发效应,因此后续试验采用 $100 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的肉桂醛所为最佳缓解浓度。

2.3 肉桂醛对 NaCl 胁迫下番茄种子萌发及幼苗生长的影响

由图 3:A、B 可知,单 NaCl 胁迫较对照显著抑制番茄种子萌发 ($P < 0.05$)。与单 NaCl 胁迫相比,肉桂醛处理提升了 84.61% 的发芽势和 43.18% 的发芽率,表明添加肉桂醛可以促进 NaCl 胁迫下番茄种子的萌发。NaCl 胁迫降低了番茄幼苗的根长和鲜重,肉桂醛处理对幼苗发育具有促进作用(图

3:C、D)。在正常条件下,添加肉桂醛对番茄萌发的促进效果不显著,而在 NaCl 胁迫下,添加肉桂醛显著缓解了 NaCl 胁迫对番茄幼苗生长的抑制 ($P < 0.05$),CA + NaCl 组合处理幼苗的根长和鲜重分别为 3.28 cm 和 18.33 mg,与单 NaCl 处理相比分别增加了 118.47% 和 17.23%,表明肉桂醛处理能显著缓解 NaCl 胁迫对番茄幼苗生长的抑制 ($P < 0.05$)。

2.4 肉桂醛对 NaCl 下番茄幼苗根尖根毛密度和侧根数量的影响

由图 4:A 可知,CK 的处理下,番茄幼苗根尖处是有部分根毛分化,而单 NaCl 处理下,几乎未见根毛分化,CA + NaCl 组合处理可以观察到根毛密度与长度均明显增加,说明肉桂醛可以从根系形态分化上缓解 NaCl 胁迫对番茄幼苗的伤害。

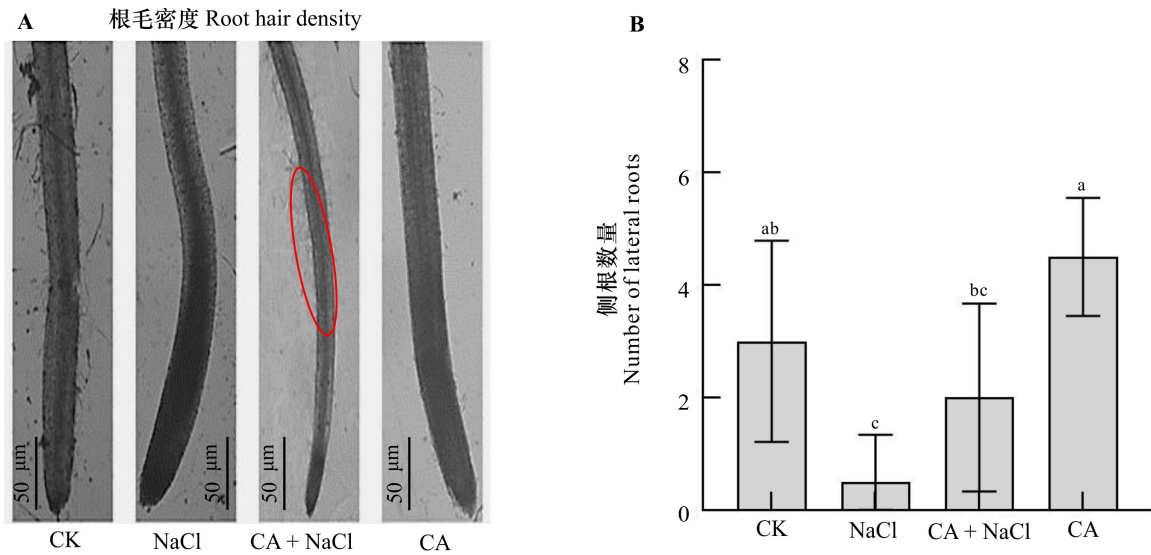


图 4 肉桂醛对 NaCl 胁迫下番茄幼苗根毛密度和侧根数量的影响

Fig. 4 Effects of cinnamaldehyde on root hair density and lateral root number of tomato seedlings under NaCl stress

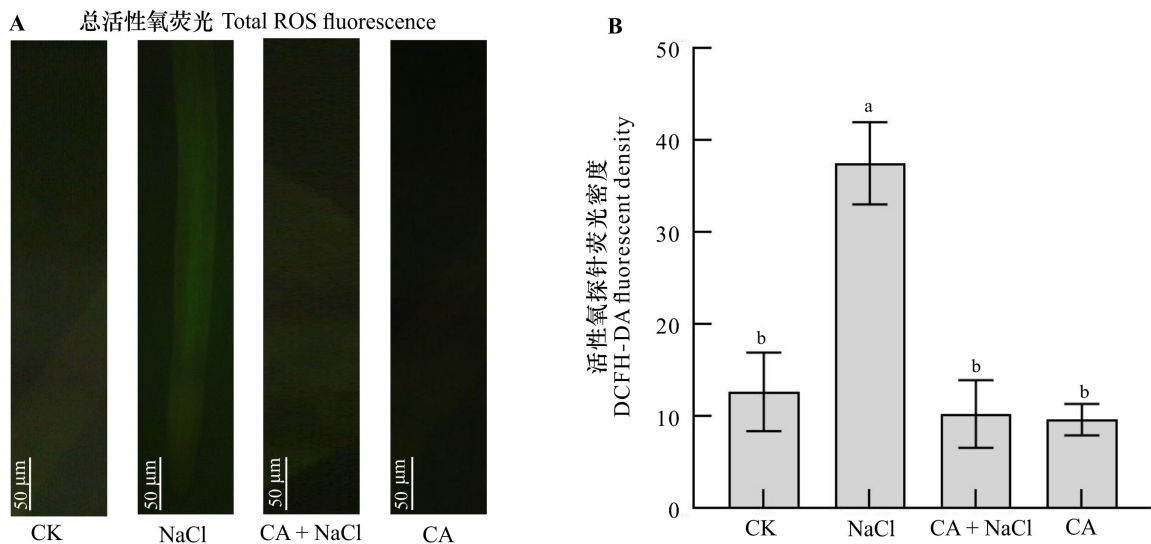


图 5 肉桂醛对 NaCl 胁迫下番茄幼苗根尖总活性氧 (ROS) 含量的影响

Fig. 5 Effects of cinnamaldehyde on total ROS content of tomato seedling roots under NaCl stress

由图 4:B 可知,在正常条件下,添加肉桂醛可以促进番茄幼苗侧根的发生。CA + NaCl 组合处理的侧根数量相比单 NaCl 胁迫增多,表明肉桂醛可能通过促进幼苗侧根的分枝缓解 NaCl 胁迫对植株造成的生理性干旱。

2.5 肉桂醛对 NaCl 胁迫下番茄幼苗根尖总活性氧的影响

采用活性氧探针 DCFH-DA 可以对根尖总活性氧 (ROS) 进行原位检测,研究肉桂醛对 NaCl 胁迫下番茄幼苗根尖总 ROS 含量的影响。由图

5:A 可知,与 CK 相比,NaCl 胁迫处理下的根尖荧光亮度较强,添加肉桂醛后其亮度减弱。由图 5:B 可知,NaCl 胁迫导致了番茄幼苗根尖总 ROS 的大量积累,其总 ROS 的含量相比 CK 增加了 1.97 倍,加入肉桂醛后总 ROS 的含量降低了 72.78%,差异显著 ($P < 0.5$)。单独经肉桂醛处理的番茄幼苗根尖总 ROS 含量虽略微低于 CK,但差异不显著。

2.6 肉桂醛对 NaCl 胁迫下番茄幼苗根尖膜透性和脂质过氧化的影响

使用 Evans blue 染色对根尖质膜透性进行检

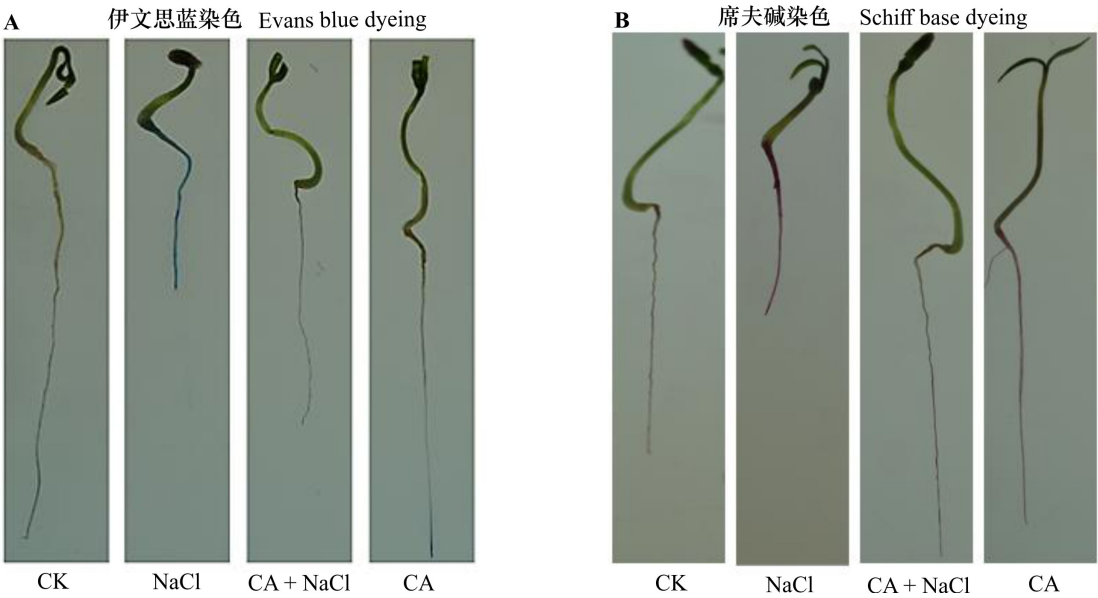


图 6 肉桂醛对 NaCl 胁迫下番茄幼苗根尖氧化损伤的影响

Fig. 6 Effects of cinnamaldehyde on oxidative loss of root tips from tomato seedlings under NaCl stress

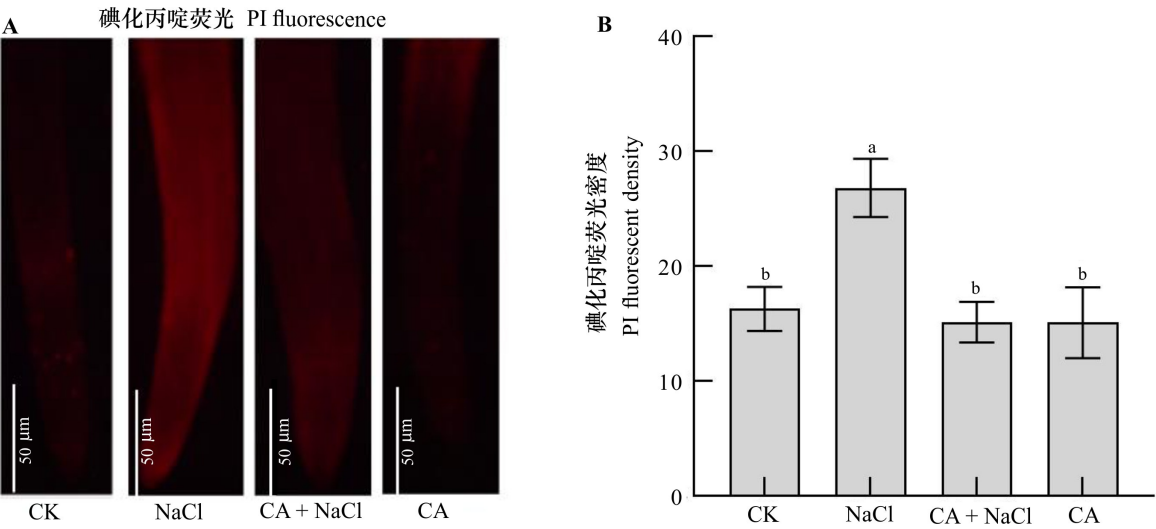


图 7 肉桂醛对 NaCl 胁迫下番茄幼苗细胞死亡的影响

Fig. 7 Effects of cinnamaldehyde on cell death of tomato seedlings under NaCl stress

测,蓝色越深代表细胞膜完整性越差、质膜透性越强、活性氧对细胞膜引起的损伤越严重。由图 6:A 可知,盐胁迫下番茄幼苗根尖蓝色比 CK 深,添加肉桂醛后,染色程度明显变浅,单独肉桂醛处理下的番茄幼苗根尖被染成的蓝色较 CK 稍浅一些。这表明肉桂醛可以缓解 NaCl 胁迫下大量活性氧对幼苗根尖细胞膜完整性的损伤。

使用 Schiff base 对番茄幼苗根尖进行染色,检

测根尖脂质过氧化程度,粉色越深代表脂质过氧化越严重。由图 6:B 可知,与 CK 相比,NaCl 胁迫下番茄幼苗根尖粉色较深,加入肉桂醛后,粉色明显变浅,单独的肉桂醛处理组比 CK 稍深一些。这表明肉桂醛可以缓解 NaCl 胁迫下大量活性氧所造成的根尖脂质过氧化的损伤。

2.7 肉桂醛对 NaCl 胁迫下番茄幼苗细胞死亡的影响

使用特定的荧光探针 PI 检测植物根尖细胞死

亡程度,已死亡的细胞会发出红色荧光,因此可以通过红色荧光密度反映细胞相对死亡的情况。由图 7:A 可知,NaCl 处理组荧光亮度明显高于 CK,添加肉桂醛后其荧光亮度明显降低。由图 7:B 可知,单独 NaCl 胁迫下细胞死亡率较 CK 提高了 64.77%,添加肉桂醛后,细胞死亡率降低了 43.79%,差异显著 ($P<0.5$)。

3 讨论与结论

天然植物源化合物肉桂醛在抑菌抗炎方面具有重要的作用,其药用价值一直被广泛地讨论 (Hermawan et al., 2021; Wang et al., 2021),但是肉桂醛对植物生理的调控与植物抗性方面的研究近几年才有报道。本研究以番茄‘合作 903’为试验材料,探讨外源肉桂醛处理是否能调控番茄生理生化过程来提高其抗盐性。

种子萌发是植物生长周期中最基本与最重要的环节,也是植物生长最敏感的阶段 (刘文瑜等, 2015)。盐胁迫主要通过渗透胁迫离子特异效应和氧化胁迫影响种子萌发,并且影响植物外部形态变化、内部结构建成及各种代谢过程 (方晶, 2014)。本研究发现添加肉桂醛后,盐胁迫下番茄种子的发芽势与发芽率均有所提升,番茄幼苗的根长与鲜重显著提升。结合番茄幼苗质膜透性染色情况的结果来看,这可能是因为肉桂醛可以通过维持细胞膜的完整性和减少电解质的渗漏来缓解盐胁迫对番茄幼苗造成的伤害 (耿书德等, 2022)。

种子萌发后,植物根系是首先感受逆境的器官,根系生长状况发生的变化可以反映植物对逆境的表现。本试验中发现,添加肉桂醛可以促进盐胁迫下番茄幼苗侧根的发生,有助于增加植物根系与土壤的接触面积,从而促进根系吸收水分。本研究发现,肉桂醛可以通过调控内源硫化氢促进辣椒幼苗侧根发生,这与 Xue 等 (2016) 的研究结果一致。同时,本研究结果表明,添加肉桂醛后,NaCl 胁迫下的番茄幼苗的根长、根毛密度与长度、侧根数量均显著提高,整个根系与环境接触面积增大,促进根系吸水,说明外源添加肉桂醛能够通过改变幼苗根系形态使番茄幼苗适应盐胁迫环境。

活性氧 (ROS) 是一类具有很强氧化能力、化学性质活泼的含氧物质及其衍生物质的总称。当

植物遭遇逆境胁迫的时候,ROS 的形成和清除之间的动态平衡遭到破坏,ROS 大量积累,引起氧化损伤。本研究发现在 NaCl 胁迫下,番茄幼苗根尖的总 ROS 含量相比对照显著提高,而添加了肉桂醛后,根尖总 ROS 含量显著下降,根尖膜脂过氧化程度与细胞死亡程度均显著下降,表明肉桂醛可以通过减少 NaCl 胁迫下植物体内 ROS 的大量积累,减少氧化损伤与细胞死亡程度,从而缓解 NaCl 胁迫给番茄幼苗造成的伤害。本课题组前期研究发现在低盐胁迫下,肉桂醛可以显著降低结球白菜根内 PAO 活性和 H_2O_2 水平 (杨会敏等, 2022)。PAO 代谢多胺产生 H_2O_2 是植物体内 ROS 产生的一个重要途径,鉴于植物抵抗非生物胁迫的通用性,我们推测肉桂醛提升番茄苗期耐盐性也是通过该途径减少逆境造成 ROS 的积累。

综上所述,本研究发现肉桂醛可以提高番茄种子在盐胁迫下的发芽率与发芽势,对番茄种子在盐胁迫环境中的萌发过程具有缓解作用。同时,肉桂醛可以通过改变番茄幼苗根系形态,促进根系的分化与生长,提升幼苗根系的吸水能力,从而提升番茄幼苗的耐盐能力。肉桂醛也可以抑制番茄幼苗根尖总 ROS 的大量积累并减少细胞死亡率,减轻番茄幼苗的氧化损伤,从而提升番茄幼苗的耐盐性。本研究初步证明了肉桂醛具有提高番茄幼苗耐盐性的能力,为肉桂醛田间的推广应用提供一定参考,也为后续相关生理与生化机理的探究提供一定理论基础。

参考文献:

- CHEN F, YANG SL, ZHANG L, et al., 2021. Effect of exogenous methyl jasmonate on AsA-GSH cycle in maize seedlings under salt stress [J]. Bull Biol, 56(11): 44-48. [陈芳, 杨双龙, 张莉, 等, 2021. 外源茉莉酸甲酯对盐胁迫下玉米幼苗 AsA-GSH 循环的影响 [J]. 生物学通报, 56(11): 44-48.]
- DALIAKOPOULOS IN, APOSTOLAKIS A, WAGNER K, et al., 2019. Effectiveness of *Trichoderma harzianum* in soil and yield conservation of tomato crops under saline irrigation [J]. Catena, 46(175): 144-153.
- DUAN WJ, MENG YJ, JIANG D, et al., 2022. Effects of exogenous melatonin on the morphology and antioxidant enzyme activities of cotton seedlings under salt stress [J]. Chin J Eco-Agric, 30(1): 92-104. [段文静, 孟妍君, 江丹, 等, 2022. 外源褪黑素对盐胁迫下棉花幼苗形态及抗氧化系统的影响 [J]. 中国生态农业学报 (中英

- 文), 30(1): 92-104.]
- FANG J, 2014. Effect of exogenous gibberellin on germination of oil sunflower under salt stress [J]. *Seed*, 33(4): 90-93. [方晶, 2014. 外源赤霉素对盐胁迫下油葵种子萌发的影响 [J]. *种子*, 33(4): 90-93.]
- FOREMAN J, DEMIDCHIK V, BOTHWELL JHF, et al., 2003. Reactive oxygen species produced by NADPH oxidase regulate plant cell growth [J]. *Nature*, 422 (6930): 442-446.
- GENG SD, WU Y, GAO QH, 2022. Effects of exogenous melatonin on seed germination and physiological characteristics of watermelon seedlings under salt stress [J]. *J Anhui Agric Sci*, 50(2): 52-55. [耿书德, 吴燕, 高青海, 2022. 盐胁迫下外源褪黑素浸种对西瓜种子萌发及幼苗生理特性的影响 [J]. *安徽农业科学*, 50(2): 52-55.]
- HERMAWAN A, PUTRI H, UTOMO RY, 2021. Exploration of targets and molecular mechanisms of cinnamaldehyde in overcoming fulvestrant-resistant breast cancer: a bioinformatics study [J]. *NetMAHIB*, 10(1): 1-14.
- KELLERMEIER F, CHARDON F, AMTMANN A, 2013. Natural variation of *Arabidopsis* root architecture reveals complementing adaptive strategies to potassium starvation [J]. *Plant Physiol*, 161(3): 1421-1432.
- LI LN, SHI ZQ, GAO T, et al., 2016. Mechanism research on cinnamaldehyde enhances pepper resistance to phytophthora capsica [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 36(1): 100-105. [李丽娜, 石志琦, 高弢, 等, 2016. 肉桂醛对增强辣椒疫霉病抗性的作用机制研究 [J]. *西北植物学报*, 36(1): 100-105.]
- LI Y, ZHANG QY, WANG DD, et al., 2022. A cultivation technique for summer and spring dandelions based on secondary salinization improvement of soils in a facility rapeseed [J]. *Vegetable*, 30(3): 35-36. [李燕, 张庆银, 王丹丹, 等, 2022. 基于设施菜地土壤次生盐渍化改良的夏秋蒲公英栽培技术 [J]. *蔬菜*, 30(3): 35-36.]
- LING TX, 2017. Mechanism of thymol and cinnamaldehyde alleviating cadmium stress in tobacco seedlings [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University: 24-35. [凌天孝, 2017. 麝香草酚和肉桂醛缓解烟草幼苗镉胁迫机制研究 [D]. 郑州: 河南农业大学: 24-35.]
- LIU WY, YANG HW, WEI XH, et al., 2015. Effects of exogenous nitric oxide on seed germination, physiological characteristics and active oxygen metabolism of *Medicago truncatula* under NaCl stress [J]. *Acta Pratac Sin*, 24(2): 85-95. [刘文瑜, 杨宏伟, 魏小红, 等, 2015. 外源 NO 调控盐胁迫下蒺藜苜蓿种子萌发生理特性及抗氧化酶的研究 [J]. *草业学报*, 24(2): 85-95.]
- LIU XH, LI XL, WANG YL, et al., 2021. Mechanism of exogenous cinnamaldehyde additive in enhancing resistance to salt stress for tobacco seedlings [J]. *Acta Tab Sin*, 27(4): 59-65. [刘晓涵, 李雪利, 王悦霖, 等, 2021. 外源添加肉桂醛提高烟草幼苗抵御盐胁迫机理的研究 [J]. *中国烟草学报*, 27(4): 59-65.]
- TIAN YQ, GAO LH, 2021. Theory and technology for facility cultivation of high-quality tomato [J]. *Chin Veg*, 40(2): 30-40. [田永强, 高丽红, 2021. 设施番茄高品质栽培理论与技术 [J]. *中国蔬菜*, 40(2): 30-40.]
- WANG M, XU Y, SHI J, et al., 2020. Effects of optimized fertilization and adding microbial agents on greenhouse tomato growth and soil microorganism in secondary salinized soil [J]. *Shandong Agric Sci*, 52(11): 111-114. [王梅, 徐钰, 石璟, 等, 2020. 优化施肥及增施微生物菌剂对次生盐渍化土壤设施番茄生长和土壤微生物的影响 [J]. *山东农业科学*, 52(11): 111-114.]
- WANG RJ, LI SL, JIA H, et al., 2021. Protective effects of cinnamaldehyde on the inflammatory response, oxidative stress, and apoptosis in liver of *Salmonella typhimurium*-challenged mice [J]. *Molecules*, 26(8): 2309.
- WANG W, 1987. Root elongation method for toxicity testing of organic and inorganic pollutants [J]. *Environ Toxicol Chem*, 6(5): 409-414.
- XUE YF, ZHANG M, QI ZQ, et al., 2016. Cinnamaldehyde promotes root branching by regulating endogenous hydrogen sulfide [J]. *J Sci Food Agric*, 96(3): 909-914.
- YAMAMOTO Y, KOBAYASHI Y, DEVI SR, et al., 2002. Aluminum toxicity is associated with mitochondrial dysfunction and the production of reactive oxygen species in plant cells [J]. *Plant Physiol*, 128(1): 63-72.
- YANG HM, WANG X, HAO YN, et al., 2022. Cinnamaldehyde ameliorates selenium stress by regulating PAO-H₂O₂ system in *Brassica rapa* [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 42(5): 787-795. [杨会敏, 王旭, 郝漪旎, 等, 2022. 肉桂醛调控不结球白菜多胺氧化酶-过氧化氢系统缓解硒胁迫的机理研究 [J]. *西北植物学报*, 42(5): 787-795.]
- YANG JL, HUANG CX, XU X, et al., 2021. Synthesis, optical properties, determination and imaging in living cells and bamboo of cinnamaldehyde derivatives [J]. *Spectrochim Acta A*, 255: 119730.
- ZHANG WP, FU YY, XIE XM, 2003. Study on antifungal mechanism of cinnamaldehyde citral and in aspergilli [J]. *J Acta Acad Med Jiangxi*, 43(6): 10-13. [张文平, 傅颖媛, 谢小梅, 2003. 柠檬醛、肉桂醛抗曲霉菌作用机制研究 [J]. *江西医学院学报*, 43(6): 10-13.]
- ZHANG XM, KANG C, TENG YX, et al., 2022. Effects of exogenous hydrogen sulfide and salicylic acid on growth and physiological characteristics of processing tomato seedlings under salt stress [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 42(2): 255-262. [张雪蒙, 亢超, 滕元旭, 等, 2022. 外源硫化氢和水杨酸对盐胁迫下加工番茄幼苗生长与生理特性的影响 [J]. *西北植物学报*, 42(2): 255-262.]
- ZHOU J, XIA XJ, HU ZJ, et al., 2021. Technological development and production of protected vegetable in China during 'The Thirteenth Five-Year Plan' and future prospect [J]. *China Veget*, 40(10): 20-34. [周杰, 夏晓剑, 胡璋健, 等, 2021. “十三五”我国设施蔬菜生产和科技进展及其展望 [J]. *中国蔬菜*, 40(10): 20-34.]

(责任编辑 李 莉 王登惠)