

外源亚精胺对盐胁迫下黄瓜根系多胺含量和抗氧化系统的影响

段九菊, 郭世荣, 康云艳, 焦彦生 (南京农业大学园艺学院, 江苏南京 210095)

摘要: 采用营养液栽培, 研究了外源亚精胺 (Spd) 对盐胁迫下抗盐能力不同的 2 个黄瓜品种“长春密刺”和“津春 2 号”幼苗根系生长以及根系中多胺 (PA s) 含量和抗氧化系统的影响。结果表明, 外源 Spd 提高了盐胁迫下黄瓜根系游离态 Spd 和精胺 (Spm)、酸可溶性结合态和酸不溶性结合态腐胺 (Put)、Spd 和 Spm 含量, 降低了游离态 Put 含量; 同时提高了超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 活性, 降低了超氧阴离子 ($O_2^{\cdot-}$) 产生速率、过氧化氢 (H_2O_2) 和丙二醛 (MDA) 含量及电解质渗透率, 明显促进了幼苗根系生长; 根系中酸不溶性结合态 Spd 含量与抗氧化酶活性间呈正相关性。表明黄瓜幼苗根系中较高的游离态 Spd 和 Spm、酸可溶性结合态和酸不溶性结合态 PA s 尤其是酸不溶性结合态 Spd 含量有利于提高植株抗氧化酶活性, 降低 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率和膜脂伤害, 增强植株抗盐性。

关键词: 多胺; 亚精胺; 抗氧化酶; 活性氧; 盐胁迫; 黄瓜

中图分类号: Q945.78; S642.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4831(2007)04-0011-07

Effects of Exogenous Spermidine on Polyamine Content and Antioxidant System in Roots of Cucumber Under Salinity Stress DUAN Jiu-ju, GUO Shi-rong, KANG Yun-yan, JIAO Yan-sheng (College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: A hydroponic experiment was carried out about cucumber seedlings of two different cultivars in salinity tolerance to explore the effects of exogenous spermidine on polyamine content and antioxidant system in roots of the seedlings under salinity stress. Results showed that under salinity stress, exogenous spermidine increased the contents of free spermidine and spermine, perchloric acid soluble conjugated (PS-conjugated) and perchloric acid insoluble conjugated (PIS-conjugated) putrescine, spermidine and spermine, and decreased the content of free putrescine in roots of cucumber. Besides, it also increased SOD, POD and CAT activities, decreased $O_2^{\cdot-}$ production rate, H_2O_2 and MDA contents and electrolyte leakage, thus significantly promoting root growth. Furthermore, positive correlation was observed of the content of PIS-conjugated spermidine in seedlings roots with antioxidant enzyme activity. The findings suggest that high levels of free spermidine and spermine, PS-conjugated and PIS-conjugated polyamines, particularly PIS-conjugated spermidine, may enhance antioxidant enzyme activity, decrease $O_2^{\cdot-}$ production rate and membrane damage, thus strengthening salinity tolerance of the plant.

Key words: polyamine; spermidine; antioxidant enzyme; reactive oxygen; salinity stress; cucumber (*Cucumis sativus*)

土壤盐渍化对农业的威胁是一个全球性问题。随着设施栽培面积的日益扩大, 温室土壤的次生盐渍化也已成为国内外设施栽培中普遍存在的问题^[1], 严重影响了设施蔬菜栽培的可持续高效发展。黄瓜是一种世界性的重要蔬菜作物, 是设施栽培的主要蔬菜作物之一, 设施土壤次生盐渍化对黄瓜植株生长造成一系列不良影响, 如株高降低、节间缩短、叶面积减少、叶色加深、产量下降等^[2]。研究表明, 盐胁迫下导致植物细胞氧化损伤及程序性细胞死亡的重要原因是植物体活性氧 (ROS) 代谢失

衡^[3], 控制游离自由基的产生是提高植物抗盐性的主要途径之一^[4]。

多胺 (PA s) 是生物代谢过程中产生的一类具有生物活性的相对分子质量较低的脂肪族含氮碱, 广泛作用于高等植物生长、形态建成、防止衰老、抵抗环境胁迫等方面。盐胁迫下, PA s 可以诱导植物体

基金项目: 高校博士点基金科研项目 (20050307031); 江苏省农业三项工程项目 [SX (2005) 088]

收稿日期: 2007-03-28

通讯联系人

SOS 响应,提高抗盐性^[5]。植物体内常见的 PA_s 包括腐胺 (Put)、亚精胺 (Spd) 和精胺 (Spm) 等,其中 Spd 与逆境胁迫抗性关系更为密切^[6],其在植物抗逆性中不仅作为直接的胁迫保护物质,而且在胁迫信号转导中作为信号分子,有利于植物胁迫抗性机制的构建^[7]。外施适宜浓度的 Spd 能在一定程度上缓解水稻^[4]、松树^[8]、滨藜^[9] 等植物的盐胁迫伤害,但目前关于盐胁迫下黄瓜体内 PA_s 变化及其相关作用机理了解尚少,研究 PA_s 对黄瓜抗盐性的影响对减轻设施栽培中黄瓜盐害有着重要意义。为此,本试验以抗盐能力具有明显差异的 2 个黄瓜品种为试材,研究了外源 Spd 对盐胁迫下黄瓜幼苗根系生长、根系中不同种类和不同形态的 PA_s 含量、ROS 含量及抗氧化酶活性的影响,以探讨 PA_s 在黄瓜盐胁迫逆境适应中的生理调节作用,为使用外源 PA_s 减轻植株盐伤害提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与处理

以筛选出的抗盐能力较强的“长春密刺” (Changchun mici) 和抗盐能力较弱的“津春 2 号” (Jinchun No. 2) 黄瓜 (*Cucumis sativus*) 品种^[10] 为材料。种子经消毒、浸种、催芽后,播于装有石英砂的育苗盘中育苗,温室昼温 25 ~ 30 °C、夜温 15 ~ 18 °C。幼苗 2 叶 1 心时,挑选整齐一致的植株定植于装有 1 个剂量日本山崎黄瓜配方营养液的 50 L 水槽内进行预培养,调节营养液 pH 值为 6.5 ± 0.1、EC (电导率) 为 2.2 ~ 2.5 mS · cm⁻¹,气泵间歇通气 (40 min · h⁻¹)。幼苗 3 叶 1 心时,将 2 个品种幼苗各分成 4 组进行处理:(1)对照:营养液栽培;(2)对照 + Spd 处理:营养液添加 Spd (Sigma 公司产品),使 Spd 终浓度为 0.1 mmol · L⁻¹;(3)盐胁迫处理:营养液添加 NaCl (分析纯),使 Na⁺ 终浓度为 50 mmol · L⁻¹;(4)盐胁迫 + Spd 处理:营养液同时添加 NaCl 和 Spd,使 Na⁺ 终浓度为 50 mmol · L⁻¹,Spd 终浓度为 0.1 mmol · L⁻¹。为保证处理浓度的稳定,处理期间每 2 d 更换 1 次营养液。分别于处理后 0、1、3、5、7 d 取幼苗根系中部进行 PA_s 含量、抗氧化酶活性及活性氧含量的测定,每个处理每次取样 3 株,试验重复 3 次。于处理后第 8 天进行根系分析及干重、鲜重测定。试验数据采用 SAS 软件 Duncan's 多重比较法进行统计分析。

1.2 测定方法

1.2.1 鲜重、干重测定

处理 8 d 后各组均取 15 株幼苗根系,用蒸馏水冲洗干净,吸干表面水分后称鲜重,然后 115 °C 杀青 15 min,75 °C 烘至恒重,称干重。

1.2.2 根系扫描分析

用台式扫描仪 (EPSON EXPERSION 1680) 将新鲜的幼苗根系扫描存入电脑,再用图像分析软件 WinRHIZO (加拿大 Regent Instruments 公司) 分析总根长、总根表面积、总根体积、平均单根直径和总根尖数。每项指标测定重复 15 次,取平均值。

1.2.3 PA_s 含量测定

参考高洪波等^[11] 的方法提取游离态、酸可溶性结合态和酸不溶性结合态 PA_s。用 Dionex P680 型高压液相色谱分析仪检测,流动相体积分数为 64% 的甲醇,Kromasil 反相 C₁₈ 柱 (250 mm × 4.6 mm),流速 0.8 mL · min⁻¹,柱温 25 °C,检测波长 254 nm。以 Put、Spd 和 Spm (Sigma 公司产品) 作标准曲线。

1.2.4 抗氧化酶活性测定

超氧化物歧化酶 (SOD) 活性测定采用氮蓝四唑 (NBT) 光还原法^[12],以抑制 NBT 光还原的 50% 为 1 个酶活力单位 (U);过氧化物酶 (POD) 活性采用 KOCHBA 等^[13] 的方法测定,以 D_{470 nm} 1 min 增加 1 为 1 个酶活力单位 (U);过氧化氢酶 (CAT) 活性采用 AEBI 等^[14] 的方法测定,以 D_{240 nm} 1 min 减少 0.1 为 1 个酶活力单位 (U)。酶活性 (以蛋白质质量计) 均以 U · mg⁻¹ 表示。蛋白质含量采用 BRADFORD^[15] 的考马斯亮蓝 G-250 法测定。

1.2.5 活性氧含量测定

超氧阴离子 (O₂⁻) 产生速率 (以根系鲜质量计) 参照王爱国等^[16] 的方法测定,以 nmol · min⁻¹ · g⁻¹ 表示;过氧化氢 (H₂O₂) 含量 (以根系鲜质量计) 参照 UCHIDA 等^[17] 的方法测定,以 μmol · g⁻¹ 表示。

1.2.6 膜脂过氧化测定

丙二醛 (MDA) 含量 (以根系鲜质量计) 采用 HODGES 等^[18] 的方法测定,以 nmol · g⁻¹ 表示;电解质渗透率采用 GONG 等^[19] 的电导率仪法测定。

2 结果与分析

2.1 外源 Spd 对黄瓜根系生长的影响

盐胁迫下,2 个黄瓜品种幼苗根系生长与对照相比均显著降低,“津春 2 号”降低幅度大于“长春密刺” (表 1);外源 Spd 缓解了盐胁迫对幼苗根系生

长的抑制,“长春密刺”根系鲜重、干重、总根长、总根表面积、总根体积、平均单根直径和总根尖数较纯盐胁迫分别提高了 15.69%、17.86%、22.73%、16.99%、18.95%、14.60%和 20.97%，“津春 2 号”分别提高了 29.21%、36.00%、32.90%、30.61%、

22.93%、39.04%和 39.16%,表明盐胁迫下,外源 Spd对“津春 2 号”根系生长抑制的缓解作用大于“长春密刺”。对照条件下,外源 Spd对根系生长无明显影响。

表 1 外源亚精胺 (Spd)对盐胁迫下黄瓜幼苗根系鲜重、干重和根系生长的影响

Table 1 Effects of exogenous spermidine on fresh weight, dry weight and growth of roots of cucumber seedlings under salinity stress

| 品种编号 | 处理 | 鲜重 / (g·株 ⁻¹) | 干重 / (g·株 ⁻¹) | 总根长 / (cm·株 ⁻¹) | 总根表面积 / (cm ² ·株 ⁻¹) | 总根体积 / (cm ³ ·株 ⁻¹) | 平均单根直径 / mm | 总根尖数 |
|------|-----------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|---|--|-----------------|----------------|
| 1 | 对照 | 9.32 ±0.32 a | 0.35 ±0.04 a | 1051.29 ±79.34 a | 314.84 ±8.23 a | 12.96 ±1.02 a | 1.059 ±0.058 a | 13981 ±804 a |
| | 对照 + Spd | 9.37 ±0.22 a | 0.36 ±0.05 a | 1068.90 ±60.72 a | 317.14 ±10.23 a | 13.08 ±0.23 a | 1.060 ±0.036 a | 13832 ±287 a |
| | 盐胁迫 | 7.52 ±0.52 b | 0.28 ±0.02 b | 778.94 ±13.07 b | 231.57 ±5.30 c | 10.29 ±0.35 b | 0.822 ±0.029 b | 9538 ±279 b |
| | 盐胁迫 + Spd | 8.70 ±0.35 a | 0.33 ±0.03 a | 956.02 ±23.31 a | 270.92 ±18.49 b | 12.24 ±0.89 a | 0.942 ±0.063 ab | 11538 ±1229 ab |
| 2 | 对照 | 9.50 ±0.30 a | 0.38 ±0.06 a | 1553.13 ±131.04 a | 299.27 ±16.36 a | 12.42 ±0.79 a | 0.873 ±0.031 a | 10925 ±817 a |
| | 对照 + Spd | 9.61 ±0.27 a | 0.39 ±0.05 a | 1569.33 ±36.87 a | 303.80 ±7.83 a | 12.47 ±0.26 a | 0.880 ±0.026 a | 11001 ±795 a |
| | 盐胁迫 | 6.95 ±0.24 b | 0.25 ±0.02 c | 1006.29 ±113.60 b | 203.70 ±8.16 b | 9.68 ±0.80 b | 0.602 ±0.017 b | 7010 ±221 b |
| | 盐胁迫 + Spd | 8.98 ±0.40 a | 0.34 ±0.02 b | 1337.39 ±77.57 a | 266.05 ±18.43 a | 11.90 ±0.67 a | 0.837 ±0.054 a | 9755 ±383 a |

1号品种为“长春密刺”,2号品种为“津春 2 号”,同一列中不同英文小写字母表示黄瓜品种各处理间差异显著 (P < 0.05)。

2.2 外源 Spd对黄瓜根系游离态 PA_s含量的影响

盐胁迫下,3种 PA_s含量均不同程度升高,“津春 2 号”Put含量升高幅度明显大于“长春密刺”,而“长春密刺”Spd和 Spm含量升高幅度明显大于“津春 2 号”;盐胁迫下,施加外源 Spd显著降低了 Put含量,提高了 Spd和 Spm含量,且“津春 2 号”根系 Put的降低幅度及 Spd和 Spm的升高幅度大于“长春密刺”(图 1)。对照组黄瓜幼苗根系游离态 Put、Spd和 Spm含量处理期间均保持相对稳定;对照条件下,外源 Spd的加入提高了根系内 Spd和 Spm含量,降低了 Put含量,但与对照相比差异不显著。

2.3 外源 Spd对黄瓜根系酸可溶性结合态 PA_s含量的影响

盐胁迫下,随胁迫时间延长,3种 PA_s含量均呈先上升后下降的变化趋势,“长春密刺”升高幅度大于“津春 2 号”;盐胁迫下,施加外源 Spd进一步提高了 3种多胺含量,且对“津春 2 号”的提高幅度大于“长春密刺”,峰值处“津春 2 号”根系酸可溶性结合态 Put、Spd和 Spm含量较纯盐胁迫分别提高了 36.03%、107.66%和 92.01%，“长春密刺”分别提高了 32.10%、71.11%和 23.68%(图 2)。对照组黄瓜幼苗根系酸可溶性结合态 Put、Spd和 Spm含量处理期间基本保持不变;对照条件下,施加外源 Spd对 3种 PA_s含量无明显影响。

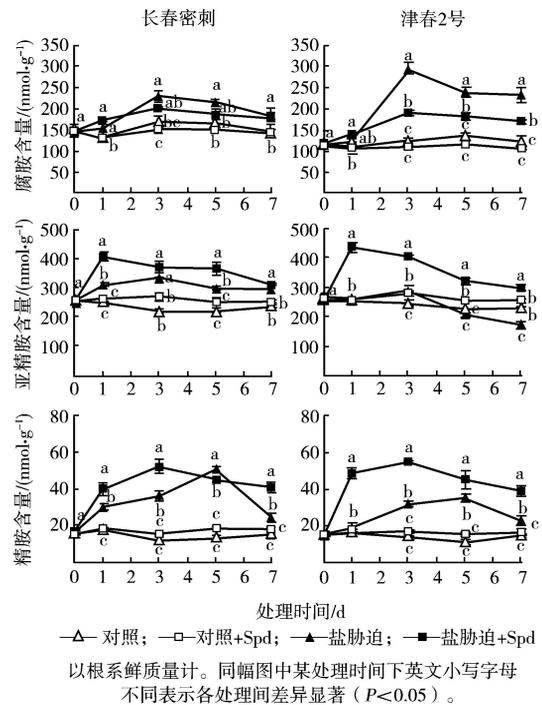


图 1 外源亚精胺 (Spd)对盐胁迫下黄瓜幼苗根系游离态多胺 (PA_s)含量的影响

Fig 1 Effects of exogenous spermidine on free polyamine contents in roots of cucumber seedlings under salinity stress

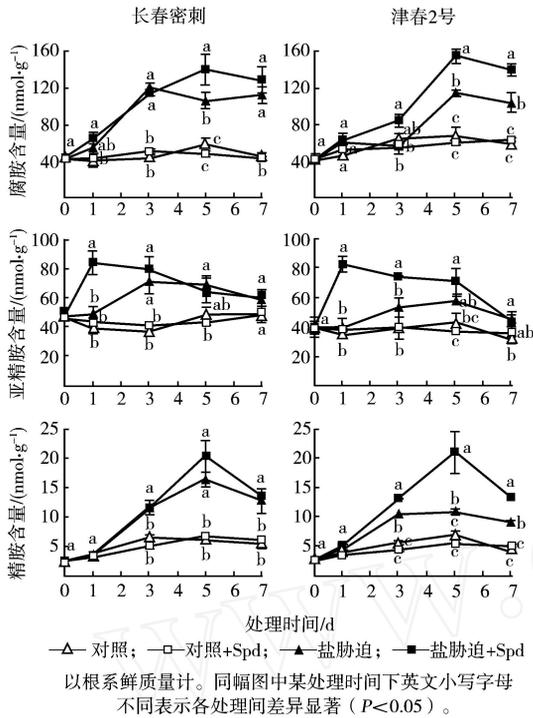


图 2 外源亚精胺 (Spd)对盐胁迫下黄瓜幼苗根系酸可溶性结合态多胺 (PA s)含量的影响

Fig 2 Effects of exogenous spermidine on perchloric acid soluble conjugated polyamine contents in roots of cucumber seedlings under salinity stress

2.4 外源 Spd对黄瓜根系酸不溶性结合态 PA s含量的影响

盐胁迫下,3种 PA s含量均不同程度升高,“长春密刺”升高幅度明显大于“津春 2号”;盐胁迫下,施加外源 Spd显著提高了“津春 2号”根系酸不溶性结合态 Put、Spd和 Spm 含量,峰值处较纯盐胁迫分别提高了 168.80%、76.32%和 55.45%，“长春密刺”仅提高了 15.71%、14.71%和 9.5% (图 3)。对照组黄瓜幼苗根系酸不溶性结合态 Put、Spd和 Spm 含量处理期间保持相对稳定;对照条件下,施加外源 Spd对 3种 PA s含量无明显影响。

2.5 外源 Spd对黄瓜根系 SOD、POD和 CAT活性的影响

盐胁迫下,随胁迫时间延长,黄瓜根系中 SOD、POD和 CAT均呈先上升后下降的变化趋势,且“长春密刺”升高幅度明显大于“津春 2号”;盐胁迫下,施加外源 Spd提高了 SOD、POD和 CAT活性,“津春 2号”提高幅度大于“长春密刺”,峰值处“津春 2号”

根系 SOD、POD和 CAT活性较纯盐胁迫分别提高了 33.93%、100.10%和 50.30%，“长春密刺”仅提高了 1.23%、15.41%和 21.16% (图 4)。对照组黄瓜幼苗根系 SOD、POD和 CAT活性处理期间基本保持稳定;对照条件下,外源 Spd的施加提高了 POD活性,但与对照相比差异不显著。

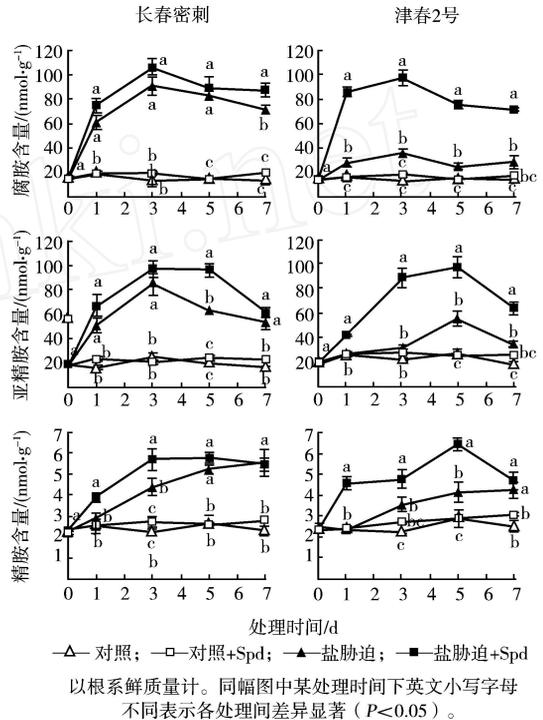


图 3 外源亚精胺 (Spd)对盐胁迫下黄瓜幼苗根系酸不溶性结合态多胺 (PA s)含量的影响

Fig 3 Effects of exogenous spermidine on perchloric acid insoluble conjugated polyamine contents in roots of cucumber seedlings under salinity stress

2.6 外源 Spd对黄瓜根系 O₂⁻产生速率和 H₂O₂含量的影响

盐胁迫下,2个黄瓜品种根系 O₂⁻产生速率和 H₂O₂含量均显著升高,且“津春 2号”升高幅度明显大于“长春密刺”;盐胁迫下,外源 Spd显著降低了根系 O₂⁻产生速率和 H₂O₂含量,且“津春 2号”降低幅度大于“长春密刺” (图 5)。处理期间对照组黄瓜幼苗根系 O₂⁻产生速率和 H₂O₂含量保持相对稳定,显著低于纯盐胁迫处理;对照条件下,施加外源 Spd降低了 O₂⁻产生速率,但与对照相比差异不显著。

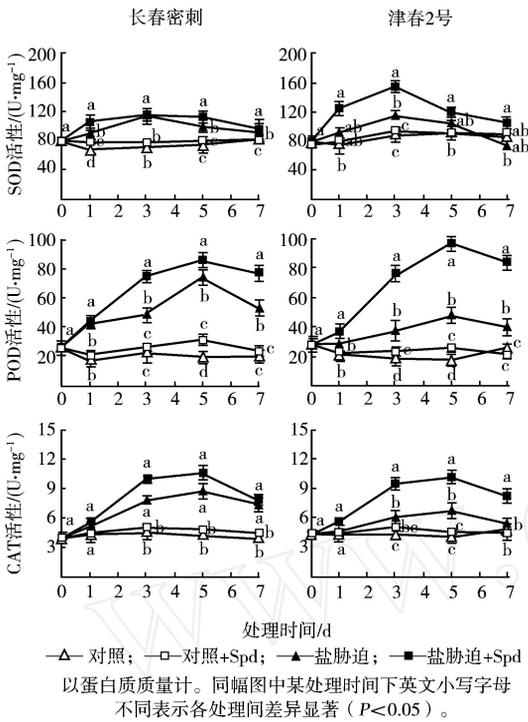


图 4 外源 Spd 对盐胁迫下黄瓜幼苗根系 SOD、POD 和 CAT 活性的影响

Fig 4 Effects of exogenous spermidine on SOD, POD and CAT activities in roots of cucumber seedlings under salinity stress

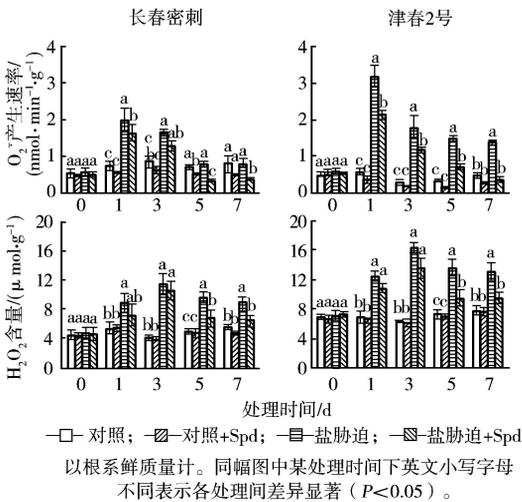


图 5 外源 Spd 对盐胁迫下黄瓜幼苗根系 O₂^{·-} 产生速率和 H₂O₂ 含量的影响

Fig 5 Effects of exogenous spermidine on O₂^{·-} production rate and H₂O₂ content in roots of cucumber seedlings under salinity stress

2.7 外源 Spd 对黄瓜根系 MDA 含量和电解质渗透率的影响

盐胁迫下,2个黄瓜品种根系 MDA 含量显著升高,“津春 2 号”升高幅度大于“长春密刺”,电解质渗透率仅“津春 2 号”显著升高;盐胁迫下,施加外源 Spd 降低了 MDA 含量和电解质渗透率,且“津春 2 号”降低幅度明显大于“长春密刺”(图 6)。对照组黄瓜幼苗根系 MDA 含量和电解质渗透率处理期间基本保持不变;对照条件下,施加外源 Spd 对 2 者无明显影响。

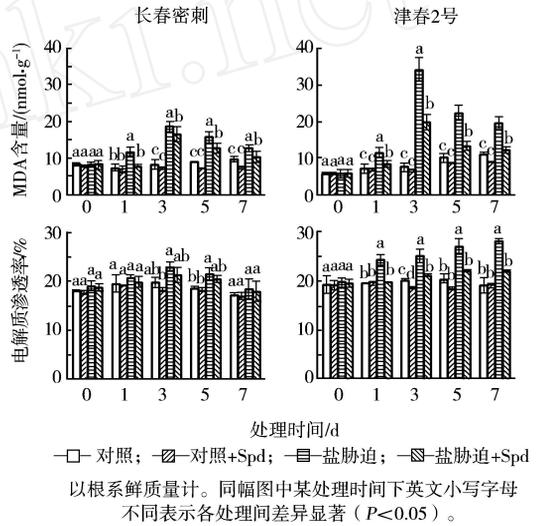


图 6 外源 Spd 对盐胁迫下黄瓜幼苗根系 MDA 含量和电解质渗透率的影响

Fig 6 Effects of exogenous spermidine on MDA content and electrolyte leakage in roots of cucumber seedlings under salinity stress

3 讨论

盐胁迫引起的植物生长抑制与细胞内 ROS 积累引起的氧化伤害有关^[20]。本试验结果表明,50 mmol·L⁻¹ NaCl 胁迫下,黄瓜根系 O₂^{·-} 产生速率、H₂O₂ 和 MDA 含量、电解质渗透率显著增加(图 5 和图 6),根系生长受到显著抑制(表 1),表现出盐伤害。同时根系中 SOD、POD 和 CAT 活性与对照相比有所升高(图 4),表明黄瓜幼苗可通过提高自身抗氧化酶活性来减少或清除 ROS,以适应盐胁迫逆境。外源 Spd 显著提高了盐胁迫下黄瓜根系 SOD、POD 和 CAT 活性(图 4),降低了 O₂^{·-} 产生速率、H₂O₂ 和 MDA 含量及电解质渗透率(图 5 和图 6),

明显降低了盐胁迫对根系生长的抑制(表 1)。表明盐胁迫下,外源 Spd 可以通过提高黄瓜幼苗体内抗氧化酶活性和 ROS 清除能力来稳定生物膜,提高植株抗盐性,这与前人研究结果相一致^[4,21]。

PA_s代谢的特征之一是植物体受到非生物胁迫时,体内 PA_s含量迅速发生变化,并且不同种类、不同形态的 PA_s可以相互转化^[22]。研究表明,抗性植物在盐胁迫下一般能够积累较高含量的 PA_s^[23]。本试验研究发现,50 mmol·L⁻¹ NaCl 胁迫下,抗盐能力较强的“长春密刺”黄瓜幼苗根系游离态 Spd 和 Spm、酸可溶性结合态和酸不溶性结合态 PA_s含量显著增加,而抗盐性较弱的“津春 2 号”黄瓜幼苗根系游离态 Put 显著积累(图 1 至图 3),而施加外源 Spd 能进一步提高游离态 Spd 和 Spm、酸可溶性结合态和酸不溶性结合态 PA_s含量,降低游离态 Put 含量(图 1 至图 3)。表明黄瓜幼苗根系较高的游离态 Spd 和 Spm、酸可溶性结合态和酸不溶性结合态 PA_s含量以及较低的游离态 Put 含量可能有利于抗盐性的提高,外源 Spd 参与了盐胁迫下黄瓜体内 PA_s代谢的调节。根系吸收 Spd 后,一方面游离态 Spd 含量提高,促进游离态 Spd 向 Spm 转化,而高含量的游离态 Spd 负反馈抑制了其合成前体 Put 的形成;另一方面,游离态 Spd 和 Spm 含量增加有利于其与小分子和大分子物质的结合,从而引起酸可溶性结合态和酸不溶性结合态 PA_s含量的增加。

PA_s的种类和相互间的转化是影响植物抗逆性的重要因素。一些研究表明,植物体过度积累游离态 Put 可导致膜的去极化,增加 K⁺的渗漏^[24],而高含量的游离态 Spd 和 Spm 有利于抗盐性的提高^[25],在清除氧自由基方面,Spd 和 Spm 的作用也大于 Put^[26];并且,游离态 PA_s与肉桂酸等结合转变为酸可溶性结合态 PA_s后,可以提高烟草植株对盐、干旱、真菌性萎蔫的抗性^[27];游离态 PA_s与蛋白质、膜脂等结合转变为酸不溶性结合态 PA_s后,通过维持线粒体膜、质膜、原生质膜的完整性从而提高小麦幼苗渗透胁迫抗性^[28-30],通过维持类囊体膜的结构和功能从而保护烟草叶片光合机构免受臭氧污染伤害^[31]。本试验结果表明,外源 Spd 的施入降低了盐胁迫下黄瓜体内 ROS 水平和膜脂伤害程度,幼苗根系生长抑制得到明显缓解。其原因可能是:一方面,由于 PA_s在生理 pH 下具有多聚阳离子特性,游离态 Spd 和 Spm 含量的增加可以直接清除 ROS^[32];另一方面,盐胁迫下,施加外源 Spd 引起黄瓜幼苗根系

游离态 Spd 和 Spm、酸可溶性结合态和酸不溶性结合态 PA_s含量提高的同时,抗氧化酶活性也相应提高。进一步分析表明,不同种类和不同形态 PA_s中,酸不溶性结合态 Spd 含量与抗氧化酶活性间存在正相关性,其与 SOD、POD 和 CAT 活性间的相关系数 *r* 值在“长春密刺”幼苗根系中分别为 0.981^{***}、0.849^{*}和 0.919^{**},”津春 2 号”幼苗根系中分别为 0.693、0.920^{*}和 0.991^{***}。酸不溶性结合态 PA_s含量的增加,有利于 PA_s与酶蛋白的结合,从而稳定蛋白结构和功能、阻止蛋白降解,促进抗氧化酶活性增强^[28],进而提高幼苗抗氧化能力。

不同黄瓜品种抗盐能力不同,对盐分逆境胁迫的生理反应也有很大差异。本试验结果表明,在相同的盐胁迫逆境下,“长春密刺”幼苗根系中游离态 Spd 和 Spm、酸可溶性结合态和酸不溶性结合态 Put Spd 和 Spm 含量升高幅度大于“津春 2 号”,而游离态 Put 含量升高幅度小于“津春 2 号”,同时“长春密刺”幼苗根系抗氧化酶活性升高幅度也明显大于“津春 2 号”,ROS 积累速度和膜脂过氧化程度相对较低,幼苗根系生长受盐胁迫的抑制较小,进一步证实了“长春密刺”黄瓜品种具有较强的抗盐胁迫能力。

综上所述,盐胁迫下,黄瓜幼苗根系 PA_s含量和 ROS 代谢之间存在着密切联系,PA_s可能作为抗氧化物质清除植物体内 ROS,抑制膜脂过氧化,施用外源 Spd 可明显降低黄瓜幼苗根系游离态 Put 含量,提高游离态 Spd 和 Spm、酸可溶性结合态和酸不溶性结合态 PA_s含量,提高植株抗氧化酶活性,降低 ROS 伤害,从而增强植株抗盐性。

参考文献:

- [1] 童有为,陈淡飞. 温室土壤次生盐渍化的形成和治理途径研究[J]. 园艺学报, 1991, 18(2): 159 - 162.
- [2] 李海云,王秀峰,魏珉,等. 不同阴离子对黄瓜光合特性及产量的影响[J]. 中国蔬菜, 2003(4): 4 - 6.
- [3] KATSUHARA M, KAWASAKI T. Salt Stress Induced Nuclear and DNA Degradation in Meristematic Cells of Barley Roots[J]. Plant and Cell Physiology, 1996, 37(2): 169 - 173.
- [4] CHATTOPADHAYAY M K, TWARIB S, CHATTOPADHAYAY G, et al. Protective Role of Exogenous Polyamines on Salinity-Stressed Rice (*Oryza sativa*) Plants[J]. Physiologia Plantarum, 2002, 116(2): 192 - 199.
- [5] KM I G, OH T J. SOS Induction of the *recA* Gene by UV⁻, ⁻Irradiation and Mitomycin C is Mediated by Polyamines in *Escherichia coli* K-12[J]. Toxicology Letters, 2000, 116(1): 143 - 149.
- [6] HE Li-xiong, NADA K, KASUKABE Y, et al. Enhanced Suscepti-

- bility of Photosynthesis to Low-Temperature Photoinhibition Due to Interruption of Chill-Induced Increase of *S*-Adenosylmethionine Decarboxylase Activity in Leaves of Spinach (*Spinacia oleracea* L.) [J]. *Plant and Cell Physiology*, 2002, 43 (2): 196 - 206
- [7] KASUKABE Y, HE Li-xiong, NADA K, *et al* Overexpression of Spermidine Synthase Enhances Tolerance to Multiple Environmental Stresses and Up-Regulates the Expression of Various Stress-Regulated Genes in Transgenic *Arabidopsis thaliana* [J]. *Plant and Cell Physiology*, 2004, 45 (6): 712 - 722
- [8] TANG Wei, NEWTON R J. Polyamines Reduce Salt-Induced Oxidative Damage by Increasing the Activities of Antioxidant Enzymes and Decreasing Lipid Peroxidation in Virginia Pine [J]. *Plant Growth Regulation*, 2005, 46 (1): 31 - 43.
- [9] 江行玉,赵可夫,龚君霞,等. NaCl胁迫下外源亚精胺和二环己胺对滨藜内源多胺含量和抗盐性的影响 [J]. *植物生理学通讯*, 2001, 37 (1): 6 - 9.
- [10] 王素平,郭世荣,李璟,等. 盐胁迫对不同基因型黄瓜幼苗生长的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2006 (2): 76 - 79.
- [11] 高洪波,刘艳红,郭世荣,等. 低氧胁迫下钙对网纹甜瓜幼苗多胺含量及多胺氧化酶活性的影响 [J]. *植物生态学报*, 2005, 29 (4): 652 - 658.
- [12] DHANSA R S, PLUMB-DHANSA P, THORPE T A. Leaf Senescence: Correlated With Increased Levels of Membrane Permeability and Lipid Peroxidation and Decreased Levels of Superoxide Dismutase and Catalase [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1981, 32 (1): 93 - 101.
- [13] KOCHBA J, LAVEE S, SPIEGEL-ROY P. Differences in Peroxidase Activity and Isozymes in Embryogenic and Non-Embryogenic⁺ Shamouti Orange Ovular Callus Lines [J]. *Plant and Cell Physiology*, 1977, 18 (2): 463 - 467.
- [14] AEB IH. Catalase in Vitro [M] // PACKER L. *Methods in Enzymology* (Volume 105). New York: Academic Press, 1984: 121 - 126
- [15] BRADFORD M M. A Rapid and Sensitive Method for the Quantification of Microgram Quantities of Protein Utilizing the Principle of Protein-Dye Binding [J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72 (7): 248 - 254.
- [16] 王爱国,罗广华. 植物的超氧自由基与羟胺反应的定量关系 [J]. *植物生理学通讯*, 1990, 26 (6): 55 - 57.
- [17] UCHIDA A, JAGENDORF A T, HIBINO T, *et al* Effects of Hydrogen Peroxide and Nitric Oxide on both Salt and Heat Stress Tolerance in Rice [J]. *Plant Science*, 2002, 163 (33): 515 - 523.
- [18] HODGES D M, DELONG IM, FORNEY C F, *et al* Improving the Thiobarbituric Acid-Reactive-Substances Assay for Estimating Lipid Peroxidation in Plant Tissues Containing Anthocyanin and Other Interfering Compounds [J]. *Planta*, 1999, 207 (4): 604 - 611.
- [19] GONG M, LI Y J, CHEN S Z. Abscisic Acid-Induced Thermotolerance in Maize Seedlings Is Mediated by Calcium and Associated With Antioxidant Systems [J]. *Journal of Plant Physiology*, 1998, 153 (4): 488 - 496.
- [20] ALLEN R D. Dissection of Oxidative Stress Tolerance Using Transgenic Plants [J]. *Plant Physiology*, 1995, 107 (4): 1049 - 1054.
- [21] 王学,施国新,马广岳,等. 外源亚精胺对苜蓿抗 Hg^{2+} 胁迫能力的影响 [J]. *植物生理与分子生物学学报*, 2004, 30 (1): 69 - 74.
- [22] ZHAO Fu-geng, SUN Cheng, LU You-liang, *et al* Effects of Salinity Stress on the Levels of Covalently and Noncovalently Conjugated Polyamines in Plasma Membrane and Tonoplast Isolated From Barely Seedlings [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2000, 42 (9): 920 - 926.
- [23] SAOWARATH J, PRKKOM M, PAULA M, *et al* Content and Biosynthesis of Polyamines in Salt and Osmotically Stressed Cells of *Synechocystis* sp. PCC 6803 [J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2003, 228 (1): 129 - 135.
- [24] BURCED A F, KAUR-SAWHNEY R, GALSTON A W. Polyamine Metabolism [M] // MILLER B J, LEA P J. *The Biochemistry of Plants, Intermediary Nitrogen Metabolism* (Volume 16). New York: Academic press, 1990: 283 - 325.
- [25] ROY M, WU R. Overexpression of *S*-Adenosylmethionine Decarboxylase Gene in Rice Increases Polyamine Level and Enhances Sodium Chloride-Stress Tolerance [J]. *Plant Science*, 2002, 163 (5): 987 - 992.
- [26] BOUCHEREAU A, AZIZ A, LARHER F, *et al* Polyamines and Environmental Challenges: Recent Developments [J]. *Plant Science*, 1999, 140 (2): 103 - 125.
- [27] WAIEB, RAJAM M V. Effect of Increased Polyamine Biosynthesis on Stress Responses in Transgenic Tobacco by Introduction of Human *S*-Adenosylmethionine Gene [J]. *Plant Science*, 2003, 164 (5): 727 - 734.
- [28] LU H P, YU B J, ZHANG W H, *et al* Effect of Osmotic Stress on the Activity of H^{+} -ATPase and the Levels of Covalently and Noncovalently Polyamines in Plasma Membrane Preparation From Wheat Seedling Roots [J]. *Plant Science*, 2005, 168 (6): 1599 - 1607.
- [29] LU Huai-pan, LU Jun, ZHANG Yan-yan, *et al* Relationship Between ATPase Activity and Conjugated Polyamines in Mitochondrial Membrane From Wheat Seedling Roots Under Osmotic Stress [J]. *Journal of Environmental Science*, 2004, 16 (5): 712 - 716.
- [30] LU H P, LU Y L, YU B J. Increased Polyamines Conjugated to Tonoplast Vesicles Correlate With Maintenance of the H^{+} -ATPase and H^{+} -PPase Activities and Enhanced Osmotic Stress Tolerance in Wheat [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2004, 23 (2): 156 - 165.
- [31] NAVA KOUDES E, LUTZ C, LANGEBARTELS C, *et al* Ozone Impact on the Photosynthetic Apparatus and the Protective Role of Polyamines [J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 2003, 1621 (2): 160 - 169.
- [32] DROLET G, DUMBROFF E B, LDGGER L, *et al* Radical Scavenging Properties of Polyamines [J]. *Phytochemistry*, 1986, 25 (2): 367 - 371.

作者简介:段九菊(1981—),女,山西晋城人,博士生,主要从事设施蔬菜逆境生理生态研究。