

刘灵锐, 曾梓健, 年海, 等. 纳米氧化锌缓解大豆铝胁迫生理机制 [J]. 华南农业大学学报, 2023, 44(5): 787-793.

LIU Lingrui, ZENG Zijian, NIAN Hai, et al. Physiological mechanisms of zinc oxide nanoparticles alleviating aluminum stress in soybean[J]. Journal of South China Agricultural University, 2023, 44(5): 787-793.

纳米氧化锌缓解大豆铝胁迫生理机制

刘灵锐[†], 曾梓健[†], 年海, 连腾祥[✉]

(华南农业大学 农学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】探究在铝 (Al) 胁迫下不同含量的纳米氧化锌 (Zinc oxide nanoparticles, ZnO NPs) 对大豆 *Glycine max* (Linn.) Merr. 生理特性的影响, 为金属纳米材料在农业上的应用提供一定参考。【方法】采用盆栽试验, 选择耐 Al 品种 ‘华春 2 号’ 和普通品种 ‘华春 6 号’, 在 0.3 g/kg Al 胁迫处理下, 施加不同剂量的 ZnO NPs (0、25、50、100 和 150 mg/kg), 探究 ZnO NPs 对大豆生理指标 (鲜质量、根长和叶绿素含量)、总超氧化物歧化酶 (Total superoxide dismutase, T-SOD) 活性和丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 浓度的影响。【结果】Al 胁迫显著降低了 ‘华春 6 号’ 的鲜质量和根长, 显著增加了其 MDA 浓度。对于 ‘华春 2 号’, Al 胁迫显著增加了其叶绿素 a 和叶绿素 b 含量, 而对其他指标无明显影响。无 Al 胁迫条件下施用 ZnO NPs, 均提高了 ‘华春 6 号’ 和 ‘华春 2 号’ 的鲜质量、根长和 T-SOD 活性。而在 Al 胁迫下施加不同剂量的 ZnO NPs 使 ‘华春 6 号’ 的鲜质量和根长分别增加 13.2%~100.4% 和 7.8%~35.8%, 而 ‘华春 2 号’ 的鲜质量在 150 mg/kg ZnO NPs 处理下达到最高值。在 25 mg/kg ZnO NPs 处理下, ‘华春 6 号’ 和 ‘华春 2 号’ 的叶绿素 a 含量均达到最高值。不同含量的 ZnO NPs 对 ‘华春 6 号’ 的叶绿素 b 含量无显著影响, 而显著降低了 ‘华春 2 号’ 的叶绿素 b 含量, 在 100 mg/kg ZnO NPs 下达到最低值 (3.5 mg/g) 。 ‘华春 6 号’ 的 T-SOD 活性随 ZnO NPs 含量的增加而增加, ‘华春 2 号’ 的 T-SOD 活性在 50 mg/kg ZnO NPs 时达到峰值 (820 U/g), 之后随 ZnO NPs 含量的增加出现下降的趋势。 ‘华春 6 号’ 和 ‘华春 2 号’ 的 MDA 浓度最小值分别出现在 25 和 50 mg/kg ZnO NPs 处理。【结论】Al 胁迫严重影响大豆的生长发育, 施用 ZnO NPs 可以在一定程度上缓解 Al 胁迫对大豆植株产生的负面作用, 改善植株的生长发育。

关键词: 铝胁迫; 生理特性; 大豆; 纳米氧化锌

中图分类号: S565.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2023)05-0787-07

Physiological mechanisms of zinc oxide nanoparticles alleviating aluminum stress in soybean

LIU Lingrui[†], ZENG Zijian[†], NIAN Hai, LIAN Tengxiang[✉]

(College of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】 This study evaluated the effects of different zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) contents on the growth and physiological characteristics of *Glycine max* (Linn.) Merr. under aluminum (Al) stress, aiming to provide some reference for the application of metal nanomaterials in agriculture. 【Method】 In a pot experiment, Al resistant cultivar ‘Huachun 2’ and Al sensitive cultivar ‘Huachun 6’ were selected and treated with ZnO NPs in various dosages of (0, 25, 50, 100 and 150 mg/kg) under 0.3 g/kg Al stress conditions,

收稿日期: 2022-05-31 网络首发时间: 2023-05-11 09:28:04

首发网址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20230510.1527.010.html>

作者简介: 刘灵锐, 硕士研究生, 主要从事作物-土壤-微生物互作研究, E-mail: 709625793@qq.com; 曾梓健, 主要从事作物-土壤-微生物互作研究, E-mail: 1589284840@qq.com; [†]表示同等贡献; 通信作者: 连腾祥, 副教授, 博士, 主要从事作物-土壤-微生物互作、大豆根瘤菌结瘤机理和农田分子生态等研究, E-mail: liantx@scau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD1000900)

to investigate the effects of ZnO NPs on soybean physiological indicators (fresh weight, root length and chlorophyll content), total superoxide dismutase (T-SOD) activity and malondialdehyde (MDA) concentration. 【Result】 Al stress significantly reduced the fresh weight and root length of ‘Huachun 6’, and increased its MDA concentration. For ‘Huachun 2’, a significant increase in its chlorophyll a and chlorophyll b content was observed, while there was no significant effect on other indicators. Application of ZnO NPs under no Al stress conditions increased the fresh weight, root length and SOD activity of both ‘Huachun 6’ and ‘Huachun 2’. When ZnO NPs were applied at various dosages under Al stress, ‘Huachun 6’ gained 13.2%–100.4% in fresh weight and 7.8%–35.8% in root length, respectively, while ‘Huachun 2’ reached its highest fresh weight at 150 mg/kg ZnO NPs. The chlorophyll a content of both ‘Huachun 6’ and ‘Huachun 2’ reached the highest value under 25 mg/kg ZnO NPs treatment under Al stress. Different levels of ZnO NPs had no significant effect on the chlorophyll b content of ‘Huachun 6’ and significantly reduced the chlorophyll b content of ‘Huachun 2’, reaching the lowest value (3.5 mg/g) at 100 mg/kg ZnO NPs. As ZnO NPs content increased, the T-SOD activity of ‘Huachun 6’ increased, and that of ‘Huachun 2’ reached the peak (820 U/g) at 50 mg/kg ZnO NPs, and then showed a decreasing trend. The minimum MDA concentration of ‘Huachun 6’ and ‘Huachun 2’ occurred at 25 and 50 mg/kg of ZnO NPs treatment, respectively. 【Conclusion】 Al stress severely affects the growth and development of soybean, while the application of ZnO NPs, to some extent, can alleviate the negative effects of Al stress on soybean, and improve the growth and development of the plants.

Key words: Aluminum stress; Physiological characteristic; *Glycine max* (Linn.) Merr.; Zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs)

酸性土壤 ($\text{pH} \leq 5$) 占全球耕地面积的 30%^[1-2]。铝 (Al) 毒害是酸性土壤中作物生长的主要限制因子^[3], 在酸性条件下, 难溶性 Al 会加速溶解, 而含量在微摩尔水平的 Al^{3+} 就可以抑制根系生长及其对水分和养分的吸收^[4]。随着 Al^{3+} 在植物体内的转移, 在植物的生长过程中光合色素的合成会明显受阻, 造成光合产物含量下降。同时, 植物细胞内大量分布的 Al^{3+} 会诱导产生大量的活性氧离子 (Reactive oxygen species, ROS), 给植物带来氧化压力, 造成植物细胞内脂质的过氧化, 进而破坏植物细胞质膜等结构, 给植物的生长带来更进一步的伤害, 最终导致作物产量下降^[5]。近年来, 土壤酸化现象越来越严重, 尤其是工业化活动产生酸雨和大量施用生理酸性肥料, 导致土壤中碱性盐基离子减少, Al^{3+} 和 H^{+} 增加, 进一步对作物的生长造成负面影响^[6]。

大豆 *Glycine max* (Linn.) Merr. 是对 Al 胁迫敏感的作物之一, 特别是在我国质地黏重、肥力差、酸性强的砖红壤和赤红壤上种植的大豆, Al 毒害严重阻碍它们的生长^[7-9]。不同的大豆品种对 Al 耐受性有较大的差异, 耐 Al 品种在 Al 胁迫下的反应更加迅速, 有机酸 (柠檬酸盐等) 的分泌量和抗氧化酶 (SOD、CAT 和 POD 等) 活性相比于 Al 敏感品种均显著上升^[10-12]。目前已经在许多植物中鉴定出与耐

Al 相关的基因, 包括与有机酸分泌相关的 ALMT 基因家族和与有毒物质排出相关的 MATE 基因家族等^[13]。然而, 培育耐 Al 性强且适宜大面积推广的大豆品种需要较长的周期, 因此, 仍需要更高效的方法缓解 Al 胁迫。

纳米技术作为一个新兴的领域, 在提高农业投入有效性和作物产量、改善粮食安全等方面展示出良好的效果和广阔的前景^[14]。纳米氧化锌 (Zinc oxide nanoparticles, ZnO NPs) 是目前应用较广泛的纳米粒子^[15], 其特殊的纳米结构和纳米特性, 吸引了众多科学家的关注, 也逐渐在农业生产当中表现出积极效应, 例如促进种子萌发、幼苗生长, 缓解非生物胁迫和提高植物抗性等^[16-18]。然而, ZnO NPs 带来的负面影响不可忽视, 有研究表明, ZnO NPs 存在剂量效应: 高剂量的 ZnO NPs 不利于植物的生长, 会抑制植物的发芽和叶绿素的生物合成, 减少生物量的积累, 在植物体内产生氧化应激信号等^[19]。作为一种具有超微粒径的颗粒, ZnO NPs 可以从生理、生化以及分子层面对植物产生显著的影响, 其作用大小主要取决于植物品种、生长阶段、生长环境以及 ZnO NPs 的施用方法等^[20]。

综上所述, 一定浓度的 ZnO NPs 可以促进植物生长发育和缓解植物非生物胁迫, 然而目前关于 ZnO NPs 能否缓解大豆 Al 胁迫从而促进大豆生长

发育的研究还鲜有报道。基于此, 本研究利用耐 Al 性不同的大豆品种, 探索不同含量的 ZnO NPs 对不同基因型大豆生长生理指标的影响, 综合评价其在缓解大豆 Al 胁迫中的作用。

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验于 2021 年 3 月在广东省广州市华南农业大学校内 (23°9'N、113°21'E) 开展, 所用土壤采集自校内砂壤土, 土壤基本农化性状为 pH 4.58(水、土质量比为 2.5:1), 有机碳 56.37 g/kg, 铵态氮 37.69 mg/kg, 硝态氮 91.9 mg/kg, 有效磷 87.11 mg/kg 和速效钾 62.98 mg/kg。盆栽培养期间日平均温度为 21 ℃。

1.2 试验材料

耐 Al 品种 ‘华春 2 号’ 和普通品种 ‘华春 6 号’^[21] 由华南农业大学农学院国家大豆改良中心广东分中心提供; w(ZnO NPs)> 99.6%; 使用十八水合硫酸铝 [(Al₂(SO₄)₃·18H₂O)] 模拟 Al 胁迫。

1.3 试验方法

1.3.1 盆栽试验 普通盆栽试验用盆规格为高 150 mm、顶部直径 200 mm、底部直径 150 mm, 每盆装入供试土壤 1 kg。Al 胁迫处理 Al 含量为 0.3 g/kg (Al³⁺/土壤, m/m)。ZnO NPs 含量分别为 0、25、50、100 和 150 mg/kg(ZnO NPs/土壤, m/m)。大豆播种前, 分少量多次, 均匀拌入 Al₂(SO₄)₃·18H₂O 和 ZnO NPs。选择饱满一致、无虫蛀、发芽率高的 ‘华春 2 号’ 和 ‘华春 6 号’ 种子播种, 出苗 6 d 后定植, 每盆 4 株, 生长期间保持土壤含水量 (ω) 为 70% 左右。每个处理设 3 次重复。生长 30 d 后, 测定幼苗期大豆的株高、鲜质量、根长。取叶片测叶绿素含量、总超氧化物歧化酶 (Total superoxide dismutase, T-SOD) 活性和丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 浓度。

1.3.2 大豆鲜质量与根长测定 采用直尺 (单位: mm) 测量幼苗株高 (植株根颈部到顶部心叶之间的距离) 和根长 (植株根颈部到主根根尖的距离)。将植株用去离子水洗净并吸干表面水分, 使用电子天平测定鲜质量。

1.3.3 叶绿素含量测定 随机摘取新鲜的成熟叶片, 取 0.5 g 叶片洗净剪碎放入研钵中, 加入少许 CaCO₃、石英砂及 3 mL 无水丙酮, 研成匀浆, 再加入 10 mL 无水丙酮继续研磨充分, 于黑暗条件下静置 2 h。随后用滤纸和漏斗将提取液转移至 50 mL 容量瓶中, 用无水丙酮冲洗研钵、研棒和残渣, 最后定容至 50 mL 并且摇匀。取叶绿素提取液在紫外分光光度计上测定 $D_{663\text{ nm}}$ 和 $D_{645\text{ nm}}$, 随后根据朗博-

比尔定律计算叶片中的叶绿素 a 和叶绿素 b 含量^[22]。

叶绿素a含量/(mg·g⁻¹) = 12.7 $D_{663\text{ nm}}$ - 2.69 $D_{645\text{ nm}}$,
(1)

叶绿素b含量/(mg·g⁻¹) = 22.9 $D_{645\text{ nm}}$ - 4.68 $D_{663\text{ nm}}$ 。
(2)

1.3.4 T-SOD 活性及 MDA 浓度测定 使用购买自南京建成生物研究所的 T-SOD 试剂盒 (货号: A001-1) 和 MDA 试剂盒 (货号: A003-1) 测定 T-SOD 活性和 MDA 浓度, 测定方法分别为黄嘌呤氧化酶法^[23] 和硫代巴比妥酸法^[24]。

SOD 活性: 准确称量新鲜的大豆根系 0.1 g, 加入 5 mL 磷酸盐缓冲溶液 (pH = 7.4) 在冰水浴下进行研磨, 制成组织匀浆后, 于 3 500 r/min 离心 10 min, 上清液即为待测样品。准备 2 支试管, 分别为测定管和对照管。在测定管中依次加入试剂一应用液 1 mL、样品 0.05 mL、试剂二 0.1 mL、试剂三 0.1 mL 和试剂四应用液 0.1 mL; 在对照管内依次加入试剂一应用液 1 mL、蒸馏水 0.05 mL、试剂二 0.1 mL、试剂三 0.1 mL 和试剂四应用液 0.1 mL。用旋涡混匀器充分混匀, 置 37 ℃ 恒温水浴 40 min。加入显色剂后室温放置 10 min, 用紫外分光光度计测量 $D_{550\text{ nm}}$, 按下列公式进行换算。

T-SOD活性 = $\frac{(D_{550\text{ nm, 对照}} - D_{550\text{ nm, 测定}})}{D_{550\text{ nm, 对照}}} \div$
 $50\% \times \frac{\text{反应液总体积}}{\text{取样体积}} \div \text{匀浆液质量浓度},$ (3)

匀浆液质量浓度 = $\frac{\text{组织湿质量}}{\text{匀浆介质体积}}。$ (4)

MDA 浓度: 准确称量新鲜的大豆根系 0.1 g, 加入 5 mL 磷酸盐缓冲溶液 (pH = 7.4) 在冰水浴下进行研磨, 制成组织匀浆后, 于 3 500 r/min 离心 10 min, 上清液即为待测样品。准备 4 支试管, 分别为空白管、标准管、测定管和对照管。在空白管内依次加入无水乙醇溶液 0.2 mL、试剂一 0.2 mL、试剂二应用液 3 mL 和试剂三应用液 1 mL; 在标准管内依次加入 10 nmol/mL 四乙氧基丙烷溶液 0.2 mL、试剂一 0.2 mL、试剂二应用液 3 mL 和试剂三应用液 1 mL; 在测定管内依次加入样品 0.2 mL、试剂一 0.2 mL、试剂二应用液 3 mL 和试剂三应用液 1 mL; 在对照管内依次加入样品 0.2 mL、试剂一 0.2 mL、试剂二应用液 3 mL 和 50%(φ) 冰醋酸溶液 1 mL。加入所有试剂后, 用旋涡混匀器混匀, 95 ℃ 水浴 40 min 后用自来水冷却。以 3 500 r/min 离心 10 min, 取上清液, 用紫外分光光度计测量 $D_{532\text{ nm}}$ 。按下列公式计算 MDA 浓度。

$$\text{MDA 浓度} = \frac{(D_{532 \text{ nm, 测定}} - D_{532 \text{ nm, 对照}})}{(D_{532 \text{ nm, 标准}} - D_{532 \text{ nm, 空白}})} \times \text{标准品浓度} \times \text{样本稀释倍数}.$$

1.4 数据分析

试验数据采用 SPSS 20.0 数据处理系统和 Excel 2019 进行统计分析, 试验结果经方差分析后进行 Duncan’s 多重比较和 *t* 检验比较各处理间的差异。

2 结果与分析

2.1 ZnO NPs 对 Al 胁迫条件下大豆植株鲜质量和根长的影响

在未添加 ZnO NPs 情况下, 对不同品种施加 0.3 g/kg 的 Al 处理, Al 显著抑制了 ‘华春 6 号’ 的鲜质量和根长, 而对 ‘华春 2 号’ 的鲜质量和根长无显著影响 (图 1)。对 Al 胁迫下的 2 个品种施加不同含量的 ZnO NPs, 当 ZnO NPs 为 150 mg/kg 时, ‘华春 6 号’ 和 ‘华春 2 号’ 的鲜质量达到最大值, 同没有 ZnO NPs 处理相比, 分别提高了 100.6% 和 42.7%((图 1A、1B))。根长方面, 150 mg/kg ZnO NPs 处理后, ‘华春 6 号’ 的根长达到最大值 (27.0 cm), ‘华春 2 号’ 的根长也达到 27.2 cm; 当 ZnO NPs 含量为 50 和 100 mg/kg 时, ‘华春 2 号’ 的根长显著低于无 ZnO NPs 处理的 (图 1C、1D)。

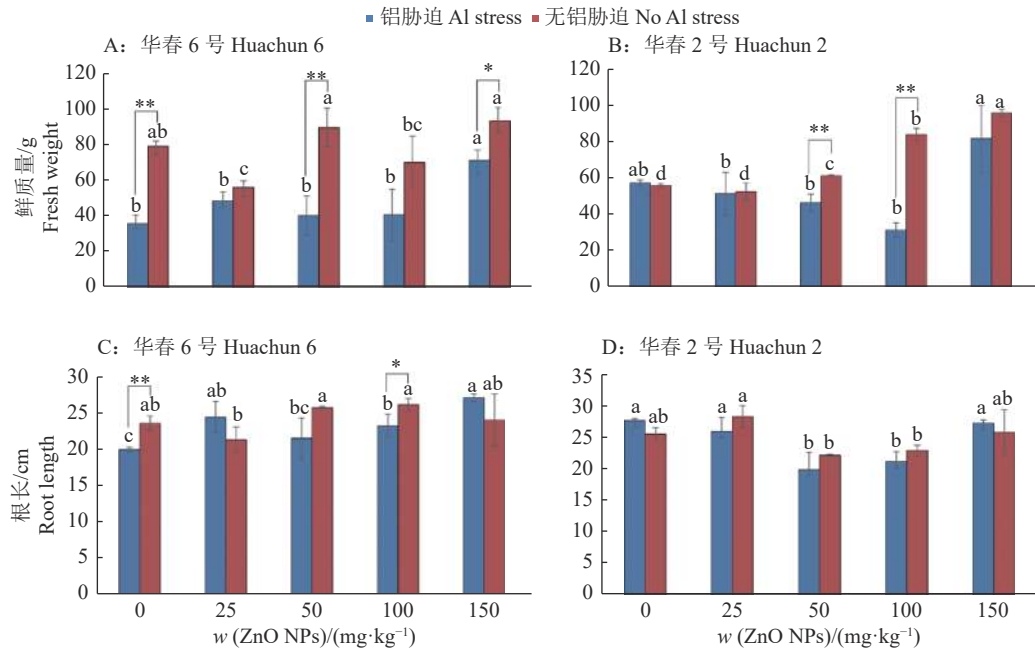
由此说明在 Al 胁迫下, 150 mg/kg 的 ZnO NPs 有助于提高大豆植株的鲜质量和根长, 从而改善大豆的生长。

2.2 ZnO NPs 对 Al 胁迫条件下大豆植株叶绿素含量的影响

由图 2 所示, 随着 ZnO NPs 含量的增加, Al 胁迫的存在对 2 个品种叶绿素 a 和叶绿素 b 含量的影响不同。在未添加 ZnO NPs 情况下, Al 胁迫对 ‘华春 6 号’ 的叶绿素 a 和叶绿素 b 含量无明显影响, 而显著增加了 ‘华春 2 号’ 的叶绿素 a 和叶绿素 b 含量, 分别达到 12.8 和 7.7 mg/g。Al 胁迫下, 当 ZnO NPs 含量为 25 mg/kg 时, ‘华春 6 号’ 和 ‘华春 2 号’ 的叶绿素 a 含量达到最高水平, 相比于未添加 ZnO NPs 处理分别上升了 20.3% 和 2.9%(图 2A、2B)。不同含量的 ZnO NPs 处理对 ‘华春 6 号’ 的叶绿素 b 含量变化影响不明显; ‘华春 2 号’ 中, ZnO NPs 处理显著降低了叶绿素 b 含量, 在 ZnO NPs 含量为 100 mg/kg 时达到最低 (3.5 mg/g) (图 2C、2D)。

2.3 ZnO NPs 对 Al 胁迫条件下大豆 T-SOD 活性和 MDA 浓度的影响

T-SOD 是植物体内重要的抗氧化酶, 其活性的高低直接反映植物细胞的抗氧化能力。当不添加 ZnO NPs 时, Al 胁迫对 ‘华春 6 号’ 和 ‘华春 2 号’ 的 T-SOD 活性均无显著影响 (图 3A、3B)。

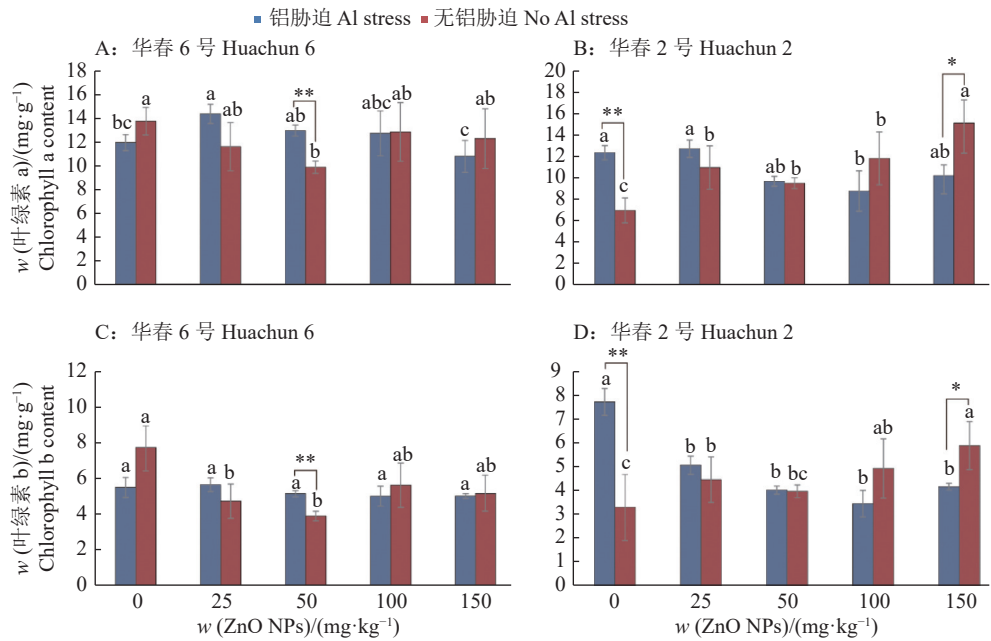


柱子上不同小写字母表示在相同 Al 处理下 ZnO NPs 处理间差异显著 ($P < 0.05$, Duncan’s 法); “*” 和 “**” 分别表示相同含量 ZnO NPs 处理下相同品种无 Al 胁迫和 Al 胁迫之间在 0.05 和 0.01 水平差异显著 (*t* 检验)

Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among ZnO NPs treatments under the same Al treatment ($P < 0.05$, Duncan’s method); “*” and “**” respectively indicate significant differences at 0.05 and 0.01 levels between no Al and Al stresses of the same variety under the same content of ZnO NPs (*t* test)

图 1 ZnO NPs 对 Al 胁迫条件下大豆植株鲜质量和根长的影响

Fig. 1 Effect of ZnO NPs on fresh weigh and root length of soybean plantlets under Al stress

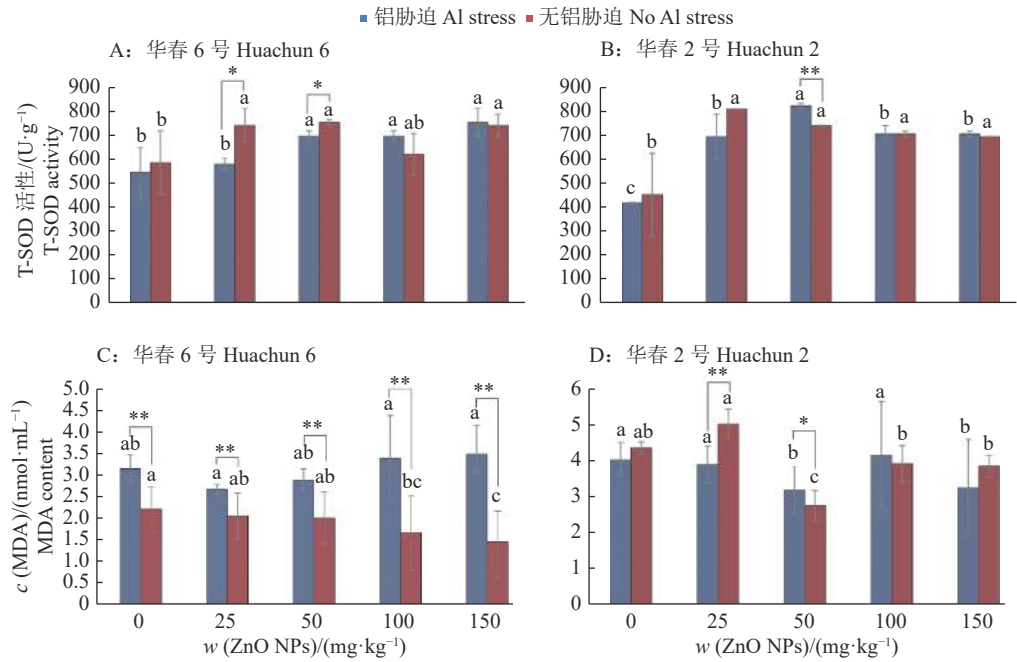


柱子上不同小写字母表示在相同 Al 处理下 ZnO NPs 处理间差异显著 ($P < 0.05$, Duncan's 法); “*” 和 “**” 分别表示相同含量 ZnO NPs 处理下相同品种无 Al 胁迫和 Al 胁迫之间在 0.05 和 0.01 水平差异显著 (t 检验)

Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among ZnO NPs treatments under the same Al treatment ($P < 0.05$, Duncan's method); “*” and “**” respectively indicate significant differences at 0.05 and 0.01 levels between no Al and Al stresses of the same variety under the same content of ZnO NPs (t test)

图 2 ZnO NPs 对 Al 胁迫条件下大豆植株叶绿素 a 和叶绿素 b 含量的影响

Fig. 2 Effect of ZnO NPs on chlorophyll a and chlorophyll b contents of soybean plantlets under Al stress



柱子上不同小写字母表示在相同 Al 处理不同 ZnO NPs 处理间差异显著 ($P < 0.05$, Duncan's 法); “*” 和 “**” 分别表示相同含量 ZnO NPs 相同品种无 Al 胁迫和 Al 胁迫之间在 0.05 和 0.01 水平差异显著 (t 检验)

Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among ZnO NPs treatments under the same Al treatment ($P < 0.05$, Duncan's method); “*” and “**” respectively indicate significant differences at 0.05 and 0.01 levels between no Al and Al stresses of the same variety under the same content of ZnO NPs (t test)

图 3 ZnO NPs 对 Al 胁迫下大豆 T-SOD 活性及 MDA 浓度的影响

Fig. 3 Effect of ZnO NPs on T-SOD activity and MDA concentration of soybean plantlets under Al stress

当添加不同含量的 ZnO NPs 后, ‘华春 6 号’ 的 T-SOD 活性随着 ZnO NPs 含量增加而升高, 150 mg/kg 处理时达到最大值, 而 ‘华春 2 号’ 中 T-SOD 活

性最大值出现在 50 mg/kg 处理中。无论哪个品种, 在 Al 胁迫条件下添加 ZnO NPs 处理后, T-SOD 的活性均高于未添加 ZnO NPs 处理, 说明 ZnO

NPs 处理有利于提高大豆根系中 T-SOD 的活性, 增强大豆的抗氧化能力, 从而应对外界造成的氧化伤害。

当 ZnONPs 含量为 0 时, Al 胁迫显著增加了‘华春 6 号’的 MDA 浓度, 而对‘华春 2 号’的 MDA 浓度无显著影响(图 3C、3D)。当添加不同含量的 ZnO NPs 后, ‘华春 6 号’的 MDA 浓度随 ZnO NPs 含量增加而上升, 可能是由于 ZnO NPs 与 Al³⁺协同作用对大豆植株造成了损害。而‘华春 2 号’呈相反趋势, 随着 ZnO NPs 含量上升, ‘华春 2 号’中 MDA 浓度呈下降-升高-下降的变化, 并在 ZnO NPs 含量为 50 mg/kg 时达到最低水平, 与无 ZnO NPs 处理相比下降了 20.9%, 此时能有效抵抗 Al³⁺对‘华春 2 号’的损伤。综上, Al 胁迫使 2 种大豆的 MDA 水平升高, 当施用的 ZnO NPs 含量小于 100 mg/kg 时, 能有效控制 2 种大豆的 MDA 浓度, 从而降低植物细胞内脂质过氧化水平, 达到保护植物细胞的目的。

3 讨论与结论

低浓度的 ZnO NPs 对植物的生长具有促进作用^[25]。在其对植物的生长具有毒性的报道中, 试验处理的纳米颗粒的质量浓度大多都达到了较高的水平(≥ 1 000 mg/L)^[26-27]。金属纳米材料在使用过程中, 离子会部分释放并被植物吸收, 发挥营养元素的功能, 当浓度过量时会不可避免地激活植物自身的防御机制, 如增加木质素和胍胍质的生物合成, 进而限制植物的生长^[28-29]。本研究表明 Al 胁迫显著抑制耐 Al 性较弱的‘华春 6 号’的鲜质量和根长, 这与前人观察到的结果^[30]一致。而 ZnO NPs 对 Al 胁迫下‘华春 6 号’的根长具有显著促进作用, 说明低含量的金属纳米颗粒具有改善处于 Al 胁迫条件下的大豆的生长发育的潜力。此外, Al 胁迫增加了耐 Al 品种‘华春 2 号’的叶绿素含量, 而敏感品种‘华春 6 号’的叶绿素含量受到 Al 胁迫的明显抑制。这与前人的研究结果存在一定差异, 前期研究普遍认为随着 Al³⁺在植物体内的积累, 在植物生长后期, Al 胁迫会抑制光合色素的生物合成, 影响植物光合作用, 最终导致叶片黄化和产量下降^[31]。本研究主要集中在大豆苗期, Al 胁迫对光合色素的影响较小或许和处理周期较短有关。ZnO NPs 促进了‘华春 2 号’叶绿素 a 的生物合成, 这进一步说明了低剂量条件下 ZnO NPs 可促进植物生长。也有研究尝试将 ZnO NPs 和有机改良剂一起作为叶面喷肥在小麦中使用, 发现 ZnO NPs 可以和有机改良剂协同作用, 促进小麦生长,

如提高生物量和叶绿素含量等^[32]。

Al³⁺诱导植物细胞产生的过量 ROS 会破坏正常的细胞结构。这一过程中植物 SOD 的活性会增强, 消除过量的 ROS, 保护植物细胞。不同作物对 Al 胁迫的反应程度有所不同, 受到的伤害也有区别^[33]。本研究中, Al 胁迫增加了大豆根系中 MDA 浓度, 表明 Al 胁迫加剧了大豆根系中脂质的过氧化, 但是 Al 处理后大豆根系中的 T-SOD 活性没有显著升高。当 ZnO NPs 加入土壤后, 大豆根系中的 T-SOD 活性显著增强, MDA 浓度基本随之下降。前期研究在镉污染的水稻中发现, ZnO NPs 可以通过提高 SOD 活性以及降低 MDA 浓度从而保护水稻正常生长^[34]。这说明 ZnO NPs 可以通过激活植物体内的 SOD, 提高植物抗氧化能力, 降低植物细胞内脂质的过氧化水平, 从而保护植物细胞, 促进植物生长^[34]。

综上, Al 胁迫严重影响大豆的生长发育, 施用 ZnO NPs 可在一定程度上缓解 Al 胁迫对植株产生的负面作用。低剂量的 ZnO NPs(50 mg/kg) 可以显著增加大豆 SOD 活性, 降低 MDA 浓度, 降低细胞脂质过氧化程度, 提高植物抗氧化能力, 增强大豆对含 Al 土壤的耐受性; 而较高剂量的 ZnO NPs 或将对大豆的生长造成不利的影响。因此, 合理施用 ZnO NPs 是缓解植物 Al 胁迫、改善植物生长的关键。

参考文献:

[1] HODSON M E, DONNER E. Managing adverse soil chemical environments[M]//GREGORY P J, NORTCLIFF S. Soil conditions and plant growth. Blackwell Publishing Ltd, 2013: 195-237.

[2] KUNITO T, ISOMURA I, SUMI H, et al. Aluminum and acidity suppress microbial activity and biomass in acidic forest soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 97: 23-30.

[3] 郑开敏, 肖家昶, 马俊英, 等. 柠檬酸对铝胁迫下豆瓣菜生长及生理的影响[J]. *江苏农业学报*, 2022, 38(2): 476-485.

[4] ZHANG X, LONG Y, HUANG J, et al. Molecular mechanisms for coping with Al toxicity in plants[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, 20(7): 1551. doi: 10.3390/ijms20071551.

[5] 渠心静. 磷缓解油茶幼苗铝胁迫的生理机制研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021.

[6] 谢会雅, 陈舜尧, 张阳, 等. 中国南方土壤酸化原因及土壤酸性改良技术研究进展[J]. *湖南农业科学*, 2021(2): 104-107.

[7] CHEN Z C, LIAO H. Organic acid anions: An effective defensive weapon for plants against aluminum toxicity and phosphorus deficiency in acidic soils[J]. *Journal of Genetics and Genomics*, 2016, 43(11): 631-638.

[8] YANG T, LIU G, LI Y, et al. Rhizosphere microbial

communities and organic acids secreted by aluminum-tolerant and aluminum-sensitive soybean in acid soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 48(1): 97-108.

[9] 金婷婷, 刘鹏, 黄朝表, 等. 铝胁迫下大豆根系分泌物对根际土壤微生态的影响[J]. *土壤学报*, 2008(3): 526-534.

[10] LI W, SUN Y, WANG B, et al. Transcriptome analysis of two soybean cultivars identifies an aluminum responsive antioxidant enzyme GmCAT1[J]. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 2020, 84(7): 1394-1400.

[11] 吴彩玉, 陈珠, 李育军, 等. 不同浓度铝胁迫下水分胁迫对大豆幼苗生理代谢的影响[J]. *长江蔬菜*, 2018(14): 39-44.

[12] 周莹. 铝胁迫下大豆 (*Glycine Max* L.) 根系柠檬酸分泌相关基因功能分析[D]. 长春: 吉林大学, 2018.

[13] 邓晓霞, 李月明, 姚堃妹, 等. 植物适应酸铝胁迫机理的研究进展[J]. *生物工程学报*, 2022, 38(8): 2754-2766.

[14] 陈士勇, 王锐, 陈志青, 等. 纳米锌和离子锌对水稻产量形成及籽粒锌含量的影响[J]. *作物杂志*, 2022(4): 107-114.

[15] CHANG Y, ZHANG M, XIA L, et al. The toxic effects and mechanisms of CuO and ZnO nanoparticles[J]. *Materials*, 2012, 5(12): 2850-2871.

[16] 方清. 纳米氧化锌对镉胁迫下水稻生长及吸收镉的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020.

[17] 陈娟妮, 鲁梅, 丁伟. 纳米氧化锌对烟草霉菌菌的抑菌作用研究[J]. *植物医生*, 2021, 34(2): 34-40.

[18] 孙露莹, 宋凤斌, 李向楠, 等. 纳米氧化锌对玉米种子萌发及根系碳代谢的影响[J]. *土壤与作物*, 2020, 9(1): 40-49.

[19] NAIR R. Effects of nanoparticles on plant growth and development[M]//KOLE C, KUMAR D S, KHODAKOVSKAYA M V. *Plant Nanotechnology*. Switzerland: Springer International Publishing, 2016, Chapter 5: 95-118.

[20] RIZWAN M, ALI S, QAYYUM M F, et al. Effect of metal and metal oxide nanoparticles on growth and physiology of globally important food crops: A critical review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 322: 2-16.

[21] CAI Z, CHENG Y, XIAN P, et al. Fine-mapping QTLs and the validation of candidate genes for aluminum tolerance using a high-density genetic map[J]. *Plant and Soil*, 2019, 444(1/2): 119-137.

[22] 邱念伟, 王修顺, 杨发斌, 等. 叶绿素的快速提取与精密测定[J]. *植物学报*, 2016, 51(5): 667-678.

[23] 张凤翔. 黄嘌呤氧化酶法测定血清中超氧化物歧化酶活力的影响因素[J]. *云南医药*, 2001(6): 473-474.

[24] GARCIA Y J, RODRÍGUEZ-MALAVAR A J, PEÑALOZA N. Lipid peroxidation measurement by thiobarbituric acid assay in rat cerebellar slices[J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 2005, 144(1): 127-135.

[25] SINGH A, PRASAD S M, SINGH S. Impact of nano ZnO on metabolic attributes and fluorescence kinetics of rice seedlings[J]. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 2018, 9: 42-49.

[26] KHAN M R, ADAM V, RIZVI T F, et al. Nanoparticle-plant interactions: Two-way traffic[J]. *Small*, 2019, 15(37): 1901794. doi: 10.1002/sml.201901794.

[27] KARUNAKARAN G, SURIYAPRABHA R, RAJENDRAN V, et al. Influence of ZrO₂, SiO₂, Al₂O₃ and TiO₂ nanoparticles on maize seed germination under different growth conditions[J]. *IET Nanobiotechnology*, 2016, 10(4): 171-177.

[28] YANG Z, CHEN J, DOU R, et al. Assessment of the phytotoxicity of metal oxide nanoparticles on two crop plants, maize (*Zea mays* L.) and rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(12): 15100-15109.

[29] VAN DE MORTEL J E, VILLANUEVA L A, SCHATH H, et al. Large expression differences in genes for iron and zinc homeostasis, stress response, and lignin biosynthesis distinguish roots of *Arabidopsis thaliana* and the related metal hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*[J]. *Plant Physiology*, 2006, 142(3): 1127-1147.

[30] NEOGY M, DATTA J, ROY A K, et al. Studies on phytotoxic effect of aluminium on growth and some morphological parameters of *Vigna radiata* L. Wilczek[J]. *Journal of Environmental Biology*, 2002, 23(4): 411-416.

[31] ZHANG X B, LIU P, YANG Y S, et al. Effect of Al in soil on photosynthesis and related morphological and physiological characteristics of two soybean genotypes[J]. *Botanical Studies*, 2007, 48(4): 435-444.

[32] BASHIR A, RIZWAN M, ALI S, et al. Effect of composted organic amendments and zinc oxide nanoparticles on growth and cadmium accumulation by wheat; A life cycle study[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(19): 23926-23936.

[33] PIRZADAH T B, MALIK B, TAHIR I, et al. Aluminium stress modulates the osmolytes and enzyme defense system in *Fagopyrum* species[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2019, 144: 178-186.

[34] LI Y, LIANG L, LI W, et al. ZnO nanoparticle-based seed priming modulates early growth and enhances physio-biochemical and metabolic profiles of fragrant rice against cadmium toxicity[J]. *Journal of Nanobiotechnology*, 2021, 19(1): 75. doi: 10.1186/s12951-021-00820-9.

【责任编辑 李庆玲】