

L-天冬氨酸纳米钙促进油菜生长的机理机制

侯佳玉, 闫磊, 程锦, 曾紫君, 张雅茹, 鲁克嵩, 姜存仓

引用本文:

侯佳玉, 闫磊, 程锦, 曾紫君, 张雅茹, 鲁克嵩, 姜存仓. L-天冬氨酸纳米钙促进油菜生长的机理机制[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1408–1416.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1414>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

外源L-天冬氨酸纳米钙抑制棉花生长的效应及潜在机制

刘亚林, 闫磊, 曾钰, 贾志贤, 姜存仓

农业环境科学学报. 2020, 39(1): 62–69 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0802>

纳米铜对小油菜(*Brassica chinensis* L.)种子发芽和幼苗生理生化特性的影响

付宇童, 孙彤, 王林, 徐应明, 梁学峰, 孙约兵

农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2524–2531 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0189>

钒胁迫对紫花苜蓿生长及钒积累与转移的影响

武振中, 杨金燕, 张有贤

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1198–1207 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1165>

ZnO NPs对四种豆科种子发芽及幼苗生长的影响

彭晴晴, 杨静雅, 钟民正, 邢洋洋, 李紫燕, 毛晖, 周莉娜

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1174–1182 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1462>

微塑料与铅复合污染对水稻幼苗根系生长和氧化应激的影响

刘玲, 洪婷婷, 胡倩男, 谢瑞丽, 周颖, 王玲, 汪承润

农业环境科学学报. 2021, 40(12): 2623–2633 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0523>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

侯佳玉, 闫磊, 程锦, 等. L-天冬氨酸纳米钙促进油菜生长的机理机制[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1408–1416.

HOU J Y, YAN L, CHENG J, et al. Mechanistic mechanism of calcium L-aspartate nanoparticles to promote the growth of rape[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(7): 1408–1416.



开放科学 OSID

L-天冬氨酸纳米钙促进油菜生长的机理机制

侯佳玉¹, 闫磊^{1,2}, 程锦¹, 曾紫君¹, 张雅茹¹, 鲁克嵩¹, 姜存仓^{1,3*}

(1. 华中农业大学资源与环境学院微量元素研究中心, 武汉 430070; 2. 华中农业大园艺林学学院园艺植物生物学教育部重点实验室, 武汉 430070; 3. 石河子大学农学院新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆 石河子 832000)

摘要:为揭示外源L-天冬氨酸纳米钙[Ca(L-asp)-NPs]对作物生长的影响,以油菜为供试材料,通过水培试验,研究了不同浓度(0、25、50、75、100 mg·L⁻¹)的Ca(L-asp)-NPs和钙离子[1.18 g·L⁻¹ Ca(NO₃)₂·4H₂O]对植株生物量、根系形态、钙含量、叶绿素、光合参数、丙二醛和可溶性蛋白含量的影响。结果表明:较低浓度(25、50 mg·L⁻¹)的Ca(L-asp)-NPs对油菜生长影响不显著,较高浓度(100 mg·L⁻¹)的Ca(L-asp)-NPs会提高植株生物量(如株高和根长)。与不施钙相比,Ca(L-asp)-NPs施用会促进油菜根系的生长,增加叶绿素含量,提高叶片光合速率,100 mg·L⁻¹ Ca(L-asp)-NPs处理下油菜总根长、总表面积和根尖数分别增加了76.08%、30.78%和1107.31%;净光合速率、胞间CO₂浓度、气孔导度和蒸腾速率则分别提高了295.31%、31.90%、1158.03%和376.74%。另外,Ca(L-asp)-NPs的施用会降低叶片丙二醛含量,提高可溶性蛋白含量。研究表明,外源Ca(L-asp)-NPs可以作为纳米肥料为油菜补充钙营养,100 mg·L⁻¹ Ca(L-asp)-NPs对油菜生长的促进效果最佳,油菜长势最接近于适宜钙水平。Ca(L-asp)-NPs具有作为新型纳米钙肥料在农业生产中推广的潜力。

关键词:L-天冬氨酸纳米钙;油菜;生长情况;生理特性

中图分类号:S565.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2022)07-1408-09 **doi:**10.11654/jaes.2021-1414

Mechanistic mechanism of calcium L-aspartate nanoparticles to promote the growth of rape

HOU Jiayu¹, YAN Lei^{1,2}, CHENG Jin¹, ZENG Zijun¹, ZHANG Yaru¹, LU Kesong¹, JIANG Cuncang^{1,3*}

(1. Microelement Research Center, School of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Key Laboratory of Horticultural Plant Biology, Ministry of Education, School of Horticulture and Forestry, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 3. School of Agriculture, Key Laboratory of Oasis Ecological Agriculture, Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi University, Shihezi 832000, China)

Abstract: An experiment was carried out in a green-house at Huazhong Agricultural University to reveal the effects of exogenous L-aspartate nano-calcium[Ca(L-asp)-NPs] on the growth of rape (*Brassica napus*) grown hydroponically. We applied six treatments: different concentrations of Ca(L-asp)-NPs(0, 25, 50, 75, 100 mg·L⁻¹) and ionic calcium[1.18 g·L⁻¹ Ca(NO₃)₂]. The dry and fresh weight, root morphological parameters, calcium content, chlorophyll, photosynthetic parameters, MDA, and soluble protein content were determined. The results showed that lower concentrations of Ca(L-asp)-NPs(25, 50, 75 mg·L⁻¹) had no significant effect on the growth of rape but a higher concentration of Ca(L-asp)-NPs(100 mg·L⁻¹) increased plant biomass, including plant height and root length. Compared with NPS-0, the application of Ca(L-asp)-NPs promoted the growth of rape roots, enhanced the chlorophyll content of leaves,

收稿日期:2021-12-06 录用日期:2022-03-18

作者简介:侯佳玉(1998—),女,山西长治人,硕士研究生,从事植物营养与施肥研究。E-mail:hjy0813@webmail.hzau.edu.cn

*通信作者:姜存仓 E-mail:jcc2000@mail.hzau.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41271320);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2017PY055)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41271320); The Fundamental Research Funds for the Central Universities(2017PY055)

and improved the photosynthetic rate of leaves. Applying $<100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Ca(L-asp)-NPs, the total root length, total surface area, and apical number increased significantly by 76.08%, 30.78%, and 1 107.31%, respectively; net photosynthetic rate, intercellular CO_2 concentration, stomatal conductance, and transpiration rate also increased significantly by 295.31%, 31.90%, 1 158.03%, and 376.74%, respectively. In addition, the application of Ca(L-asp)-NPs decreased MDA levels in rape leaves, while increasing the content of soluble protein in the plants. The research shows that exogenous Ca(L-asp)-NPs can be used as a nano fertilizer to supplement calcium nutrition for rape. The optimum concentration of Ca(L-asp)-NPs is $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ as this showed the best growth potential, while the growth of rape treated with $<100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Ca(L-asp)-NPs has the closest to the appropriate calcium level. Ca(L-asp)-NPs has the potential to be popularized as a new nano calcium fertilizer in agricultural production.

Keywords: calcium L-aspartate nanoparticles; rape; growth; physiological characteristic

天然或人工生产的纳米材料因其独有的声、光、热、力、电化学性质及比表面积大的特点,被广泛应用于电子、医药、涂料、环境修复、农业等领域^[1]。与此同时,纳米材料被释放到土壤中,附着在植物根系表面,进而被吸收、转运、积累在植物各组织中,影响植物的生长发育^[2]。近年来研究发现,纳米材料应用到农业上会对种子萌发、幼苗活力、根系生长和光合作用等产生影响,可以通过调控植物体内关键代谢酶活性及相关基因和蛋白的表达,进而提高植物对环境的适应性^[3],而且纳米材料对植物生长产生的影响受其粒径、浓度和作用时间的影响^[4]。已有研究表明,适宜浓度纳米材料对植物的生长产生促进作用,而高浓度纳米材料对植物的生长产生抑制作用。纳米二氧化钛会促进油松(*Pinus tabulaeformis* Carrière)^[5]、黑麦草(*Lolium perenne*)、高羊茅(*Festuca elatior* Keng ex E. Alexeev)^[6]、苦草(*Vallisneria spiralis* (L.) L.)^[7]、黄瓜(*Cucumis sativus* L.)^[8]和杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)^[9]的植株生长和种子萌发,相反,当纳米二氧化钛浓度较高时会抑制植物生长。 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 纳米氧化铁会对豇豆(*Vigna unguiculata* (Linn.) Walp.)幼苗生长产生促进作用,而当浓度达到 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时则会产生抑制作用,并且会在豇豆茎部积累纳米氧化铁^[10]。近期有研究指出,高浓度纳米氧化锌会抑制樱桃萝卜(*Raphanus sativus* L.)^[11]、绿豆芽(*Vigna radiata* (L.) R. Wilczak)^[12]、花叶芦竹(*Arundo donax*)^[13]、黑麦草^[13-14]及玉米(*Zea mays* L.)^[15]植株生长,且其对植株产生的毒害作用随浓度的增加而增强。

钙(Ca)是植物生长所必需的元素之一,在调控植物生长发育和响应环境胁迫方面具有重要的作用^[16],其在植物体内以长距离运输为主,运输能力与蒸腾强度的大小有关,因此老叶部位常有Ca积累,幼嫩部位出现缺Ca现象,严重影响幼叶的生长发育,故及时供应钙肥可以缓解作物缺钙^[17]。常见的钙肥有

硫酸钙(CaSO_4)、磷酸一钙 $[\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}]$ 、氯化钙(CaCl_2)和碳酸钙(CaCO_3)等。磷酸一钙易转化为磷酸二钙、磷酸三钙,供钙强度较低;氯化钙会造成土壤盐渍化;碳酸钙在酸性土壤中才能发挥良好的补钙作用^[18]。因此,螯合钙作为一种新型肥料逐渐受到重视。据报道,叶面喷施螯合钙可以显著提高葡萄(*Vitis vinifera* L.)^[19]、黄金梨(*Pyrus pyrifolia* ‘Whangkeumbae’)^[20]、蓝莓(*Vaccinium* Spp.)^[21]、苹果(*Malus pumila* Mill.)^[22]的产量和品质,提升烤烟(Flue cured Tobacco)烟叶品质,增加烤后烟叶的经济效益^[23]。

L-天冬氨酸纳米钙[Ca(L-asp)-NPs]溶解性好、结构稳定、易于吸收,是一种纳米级氨基酸螯合钙,与普通螯合钙相比,对环境风险小且广泛应用于人体钙强化剂^[24],但是它作物生长的影响以及能否作为新型纳米肥料应用在农业生产中尚需研究。刘亚林等^[25-26]研究发现,施用Ca(L-asp)-NPs会抑制棉花生长,但 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Ca(L-asp)-NPs显著促进枳壳砧木的生长。然而Ca(L-asp)-NPs对油菜生长的影响鲜有研究,因此本研究通过探究不同浓度Ca(L-asp)-NPs对油菜生长及生理特性的效应,明确适宜油菜生长的Ca(L-asp)-NPs浓度,进一步解析其在植物体内的生理机制,为新型纳米肥料应用于生产提供相关依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验于2021年在华中农业大学温室进行,试验材料为“大地199”甘蓝型油菜(*Brassica napus*)。挑选300颗饱满一致的种子放在铺有一层滤纸的培养皿中,自来水浸泡2 h后倒出,加1/3培养皿的超纯水,用锡箔纸包住盖好的培养皿后在4℃冰箱春化4 h。将春化好的种子放在30℃恒温培养箱中,黑暗条件下培养24 h。待种子发芽后,均匀移在纱布上,用纯水

培养。光照培养室温度设定为 22 ℃,光照周期设定为 14 h(光照)/10 h(黑暗),光照强度设定为 300~320 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ [27]。待根长至 4~5 cm,将长势均匀的幼苗移栽到 4 L 的黑色塑料盆中培养。

1.2 试验设计

共设 6 个处理, Ca(L-asp)-NPs 分别为 NPS-0(0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、NPS-25(25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、NPS-50(50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、NPS-75(75 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、NPS-100(100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)以及 Ca^{2+} [1.18 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$][25],每个处理 3 次重复,每个重复 4 株植物。水培方法参考 HOAGLAND 等[28]配方并略作修改: 0.51 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ KNO_3 , 0.49 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.14 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ KH_2PO_4 , 1.78 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 0.07 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 0.23 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.02 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ $\text{Na}_2\text{MoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 9.18 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Fe-EDTA, 1.54 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ H_3BO_3 ,所有纳米钙处理的营养液中加入 NaNO_3 以保持 NO_3^- 浓度一致。分别用 1/4 和 1/2 全营养液培养 3 d 后,再用全量营养液进行培养,每隔 3 d 换一次营养液,全量营养液培养 4 周,植株出现明显差异,进行收获及相关指标的测定。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 植物生长指标的测定

收获时,各处理随机选取 3 株植物,用直尺测量植株株高和根长。用超纯水冲洗干净后,将植株分为地上部和地下部,称其鲜质量。将植株地上部和地下部放入 55 ℃ 烘箱中烘干至恒质量,称其干质量。用 Epson Perfection V700 型根系分析仪扫描根系,利用 WinRHIZO 系统进行分析,得到总根长(Total root length, TRL),根表面积(Total surface area, TSA),根体积(Total volume, TV),根平均直径(Average diameter, AD),根尖数(Apical number, AN)等指标[29]。

1.3.2 植株 Ca 含量的测定

用干灰化-原子吸收分光光度法测定油菜根、叶片的 Ca 含量[30]。即称取 0.2 g 干燥样品于研钵中充分研磨,电炉碳化后转入马弗炉 500 ℃ 干灰化 4 h,冷却后,加入 10 mL 0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 HCl 浸提 30~60 min,溶解后过滤用原子吸收光谱仪(AAS, AGILENT 204DUO)测定植物中 Ca 含量。

1.3.3 叶绿素含量及叶片光合参数(气体交换参数)

将新鲜叶片(0.2 g)剪碎后,放入装有 25 mL 95% 乙醇的比色管(50 mL)中,遮光放置 24 h,然后以 95% 乙醇为空白,分别在 665、649、470 nm 处测量其吸光度[29]。叶绿素 a(*Chl a*)、叶绿素 b(*Chl b*)和类胡萝卜素(*C_{car}*)含量($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)按下式计算:

$$\text{Chl } a = 13.95A_{665} - 6.88A_{649} \quad (1)$$

$$\text{Chl } b = 24.96A_{649} - 7.32A_{665} \quad (2)$$

$$C_{\text{car}} = \frac{1\,000A_{470} - 2.05\text{Chl } a - 114.8\text{Chl } b}{245} \quad (3)$$

在收获当日 9:00—11:00,使用便携式光合测定系统(CIRAS-3, USA)测定油菜倒四叶的净光合速率(A)、蒸腾速率(E)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和水分利用率(WUE)。测定时,叶室流速设置为 300 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$,光强设置为 1 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ [31]。

1.3.4 丙二醛(MDA)含量、可溶性蛋白含量测定

新鲜根样品 0.5 g 用 5 mL pH 为 7.8 的 50 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷酸缓冲液(PBS)在低温条件下研磨,然后在 4 ℃ 且转速为 10 000 $\times g$ 条件下离心 20 min,过滤后取上清液作为提取物[32-33]。MDA 含量用分光光度计(UV-1800, MAPADA)测量后计算得出[34]。可溶性蛋白用考马斯亮蓝 G250 染色法测定[32]。

1.4 数据分析

使用 SPSS 26.0 对数据进行方差分析(ANOVA)。采用 Duncan 多重比较试验法进行差异显著性检验。用 Origin 2020 制图。

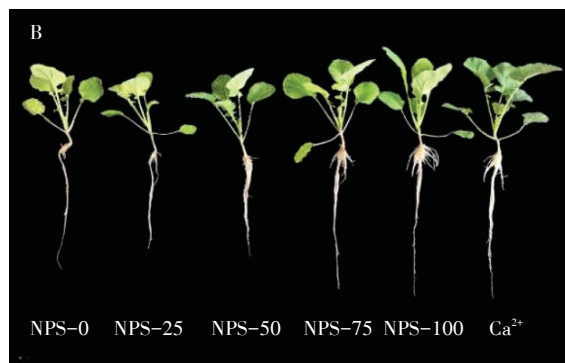
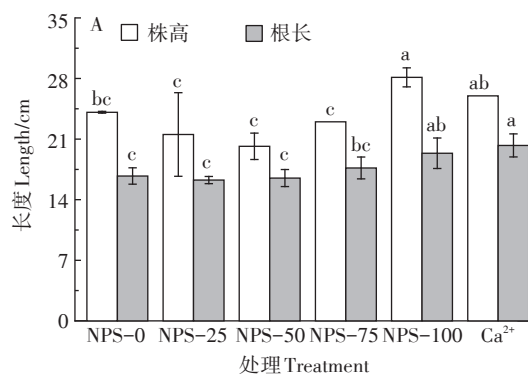
2 结果与分析

2.1 不同处理对油菜生长的影响

不同浓度 Ca(L-asp)-NPs 对油菜生长的影响如图 1 所示。结果表明,较低浓度的 Ca(L-asp)-NPs 对油菜的生长影响差异不显著,但是 Ca(L-asp)-NPs 浓度的升高会促进油菜生长。与 NPS-0 处理相比, 25、50、75 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Ca(L-asp)-NPs 处理对油菜生长无显著促进作用, 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Ca(L-asp)-NPs 和 1.18 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ Ca^{2+} 显著促进了油菜的生长,其根长分别增加 16.74% 和 7.88%,株高分别增加 15.74% 和 17.43%,但是这两个处理之间油菜长势无明显差异。

2.2 不同处理对油菜植株生物量的影响

随着施用 Ca(L-asp)-NPs 浓度的不同,油菜植株地下部和地上部的质量存在显著性差异(表 1)。NPS-0 处理的油菜地下部鲜质量(RFW)、地上部鲜质量(SFW)、总鲜质量(TFW)和地下部干质量(RDW)是最低的,随着 Ca(L-asp)-NPs 浓度的增加,上述指标呈现增加趋势。与 NPS-0 相比, NPS-100 处理油菜的 RFW、SFW、TFW 和 RDW 分别增加了 116.05%、31.03%、43.37% 和 140.00%, Ca^{2+} 处理上述指标分别增加了 88.89%、37.32%、44.62% 和 80.00%;施用 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Ca(L-asp)-NPs 的各指标与施用 1.18 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$



图中不同的小写字母表示在 $P<0.05$ 时各处理间的显著性差异(邓肯多重比较检验法)。下同

Different lowercase letters in the figure represent significant differences at $P<0.05$ (Duncan's multiple comparison test). The same below

图1 不同浓度Ca(L-asp)-NPs对油菜幼苗生长状况的影响

Figure 1 Effects of different concentrations of Ca(L-asp)-NPs on rape seedlings growth

表1 不同浓度Ca(L-asp)-NPs对油菜幼苗生物量的影响

Table 1 Effects of different concentrations of Ca(L-asp)-NPs on seedlings biomass of rape

处理 Treatment	鲜质量 Fresh weight/g			干质量 Dry weight/g			根冠比 Root shoot ratio
	地下部 Root fresh weight	地上部 Shoot fresh weight	总鲜质量 Total fresh weight	地下部 Root dry weight	地上部 Shoot dry weight	总干质量 Total dry weight	
NPS-0	0.81±0.08c	4.77±0.34c	5.58±0.40b	0.05±0.01c	0.52±0.05a	0.57±0.06a	0.17±0.01b
NPS-25	1.24±0.05abc	5.43±1.55abc	6.66±1.58ab	0.07±0.03bc	0.51±0.14a	0.58±0.13a	0.24±0.07ab
NPS-50	1.16±0.16bc	5.00±0.38bc	6.16±0.40b	0.07±0.02bc	0.47±0.05a	0.54±0.04a	0.23±0.04ab
NPS-75	1.58±0.38ab	5.21±0.49abc	6.79±0.25ab	0.09±0.02ab	0.56±0.15a	0.65±0.13a	0.31±0.10a
NPS-100	1.75±0.49a	6.25±0.40ab	8.00±0.75a	0.12±0.03a	0.53±0.01a	0.65±0.03a	0.28±0.07ab
Ca²⁺	1.53±0.30ab	6.55±0.51a	8.07±0.80a	0.09±0.01ab	0.61±0.07a	0.70±0.08a	0.23±0.03ab

注:数值代表每个处理三次重复的平均值±标准差。表格中不同字母表示不同处理在 $P<0.05$ 时的显著性差异。下同。

Note: Numerical values represent the mean of three replicates per treatment $\pm$ SD. Different letters within a column represent significant differences at $P<0.05$. The same below.

Ca(NO₃)₂·4H₂O无明显差异。不同浓度Ca(L-asp)-NPs对油菜SDW和TDW无显著影响。缺钙条件下,植株的根冠比降低,但是施用不同浓度的Ca(L-asp)-NPs对油菜的根冠比影响不显著。

2.3 不同处理对油菜根系形态指标的影响

总根长(TRL)、总表面积(TRA)、平均直径(AD)、根系总体积(RV)和根尖数(AN)可以反映根系生长状况。结果表明(表2),不同浓度Ca(L-asp)-NPs对

油菜根系形态影响不同,TRL、TSA和AN随着浓度的增加而增加,AD随着浓度的增加而减少,RV则在25 mg·L⁻¹ Ca(L-asp)-NPs处理时达到最大值,之后随着浓度的增加而降低。与NPS-0处理相比,NPS-25和NPS-50对植株的TRL、TSA、RV和AD无显著影响,NPS-100处理的油菜TRL、TSA和AN分别增加了76.08%、30.78%和1107.31%,AD和RV降低了25.79%和2.83%;1.18 g·L⁻¹ Ca²⁺处理的油菜TRL、TSA

表2 不同浓度Ca(L-asp)-NPs对油菜幼苗根系形态指标的影响

Table 2 Effects of different concentrations of Ca(L-Asp)-NPs on the root morphological characteristics of rape seedlings

处理 Treatment	总根长 Total root length/cm	总表面积 Total surface area/cm ²	平均直径 Average diameter/mm	根系总体积 Root volume/cm ³	根尖数 Apical number
NPS-0	878.50±45.80d	223.04±5.71b	0.81±0.02a	4.51±0.06a	943.33±50.65d
NPS-25	920.45±119.01cd	237.05±22.94b	0.82±0.03a	4.86±0.33a	1199.33±89.44d
NPS-50	997.03±14.93cd	240.81±2.71b	0.77±0.01ab	4.63±0.06a	3082.33±1175.13c
NPS-75	1133.00±207.88c	253.59±22.66b	0.72±0.08b	4.55±0.26a	7762.33±1909.09b
NPS-100	1546.90±193.04b	291.69±37.94a	0.60±0.02c	4.38±0.64a	11389.00±809.33a
Ca²⁺	1890.29±64.17a	321.67±13.84a	0.54±0.02c	4.36±0.35a	12505.33±324.15a

和AN最大,AD和RV最小。

2.4 不同处理对油菜根系和叶片中Ca含量的影响

如图2所示,不同浓度Ca(L-asp)-NPs均显著增加根系和叶片中的Ca含量,与不施钙相比,25、50、75 mg·L⁻¹ Ca(L-asp)-NPs的油菜根系和叶片中的Ca含量分别增加了35.84%、76.77%、31.92%和92.97%、64.95%、77.47%,其最大值出现在100 mg·L⁻¹ Ca(L-asp)-NPs处理,分别增加了59.48%和126.12%,但100 mg·L⁻¹ Ca(L-asp)-NPs处理的植株Ca含量显著低于Ca²⁺处理,根系和叶片分别降低了55.72%和36.74%。

2.5 不同处理对油菜叶绿素的影响

如图3所示,油菜叶片叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量和SPAD值随着施用Ca(L-asp)-NPs浓度的增加而增加,较低浓度的Ca(L-asp)-NPs对叶片Chl a、Chl b、C_{car}和SPAD值无显著影响,当施用量超过75 mg·L⁻¹时,Chl a、Chl b、C_{car}显著上升,100 mg·L⁻¹ Ca(L-asp)-NPs处理的植株叶片叶绿素含量最高。

2.6 不同处理对油菜光合参数的影响

对不同浓度Ca(L-asp)-NPs的油菜叶片光合参

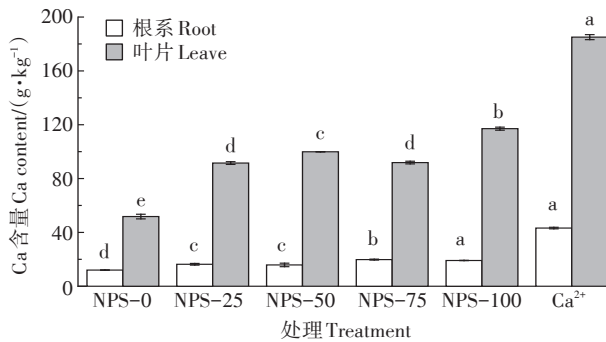


图2 不同浓度Ca(L-asp)-NPs对油菜幼苗根系和叶片中Ca含量的影响

Figure 2 Effects of different concentrations of Ca(L-asp)-NPs on Ca contents in roots and leaves of rape seedlings

表3 不同浓度Ca(L-asp)-NPs对油菜光合参数的影响

Table 3 Effects of different concentrations of Ca(L-Asp)-NPs on light parameters of rape seedlings

处理 Treatment	净光合速率 Net photosynthetic rate/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ concentration/($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	气孔导度 Stomatal conductance/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 Evapotranspiration rate/ ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	饱和水汽压差 Vapor pressure difference/kPa	水分利用率 Water use efficiency/%
NPS-0	6.40±1.15d	240.33±11.93b	64.33±7.02c	1.82±0.16d	2.84±0.06a	3.50±0.33a
NPS-25	19.37±5.25c	328.00±19.00a	786.67±510.70b	6.80±1.96bc	1.40±0.44bc	2.86±0.06a
NPS-50	17.80±0.79c	297.67±47.34a	429.67±200.77bc	6.13±1.50c	1.85±0.47b	3.02±0.71a
NPS-75	20.07±4.80bc	302.67±14.01a	475.00±202.63bc	6.53±1.36bc	1.77±0.35b	3.06±0.13a
NPS-100	25.30±0.20ab	317.00±3.00a	809.33±45.50b	8.68±0.34ab	1.46±0.02bc	2.92±0.14a
Ca ²⁺	29.90±2.04a	326.67±9.24a	1 619.67±603.87a	10.27±0.71a	1.16±0.19c	2.91±0.10a

数进行测定,结果表明(表3),施用Ca(L-asp)-NPs和Ca²⁺显著增加了油菜的净光合速率(A)、胞间CO₂浓度(Ci)、气孔导度(Gs)和蒸腾速率(E),降低了饱和水汽压(VPD)。其中,25、50、75 mg·L⁻¹ Ca(L-asp)-NPs处理的植株A、Ci、Gs、E、VPD和WUE差异不显著。与NPS-0处理相比,100 mg·L⁻¹ Ca(L-asp)-NPs处理的植株A、Ci、Gs、E显著增加,分别增加了295.31%、31.90%、1 158.03%、376.74%,VPD显著降低48.65%;Ca²⁺处理的植株上述指标分别显著增加了367.19%、35.92%、2417.62%、464.29%;VPD显著降低了59.32%。

2.7 不同处理对油菜MDA和可溶性蛋白含量的影响

如图4A所示,施用Ca(L-asp)-NPs后,油菜根系的MDA含量增加,而叶片中MDA含量下降。不同浓度Ca(L-asp)-NPs处理的根系MDA含量低于Ca²⁺处理,而叶片中MDA含量高于Ca²⁺处理。与NPS-0处理相比,100 mg·L⁻¹ Ca(L-asp)-NPs处理的油菜叶片MDA含量降低了54.82%,根系MDA含量无显著差异,Ca²⁺处理的油菜叶片MDA含量降低了60.05%,根系MDA含量增加了237.80%。

对不同浓度Ca(L-asp)-NPs处理的油菜植株可溶性蛋白含量进行分析(图4B),结果显示,施用Ca(L-asp)-NPs增加了油菜根系和叶片的可溶性蛋白含量,与NPS-0处理相比,在100 mg·L⁻¹ Ca(L-asp)-NPs处理的条件下,根系和叶片中可溶性蛋白分别增加了115.39%和62.61%,而在Ca²⁺处理条件下分别增加了82.92%和94.46%。

3 讨论

3.1 不同浓度外源Ca(L-asp)-NPs对油菜生长的影响

纳米粒子通过根系吸收进入植物体内,能促进或抑制植物的生长发育^[35],且纳米粒子对植物的影响与

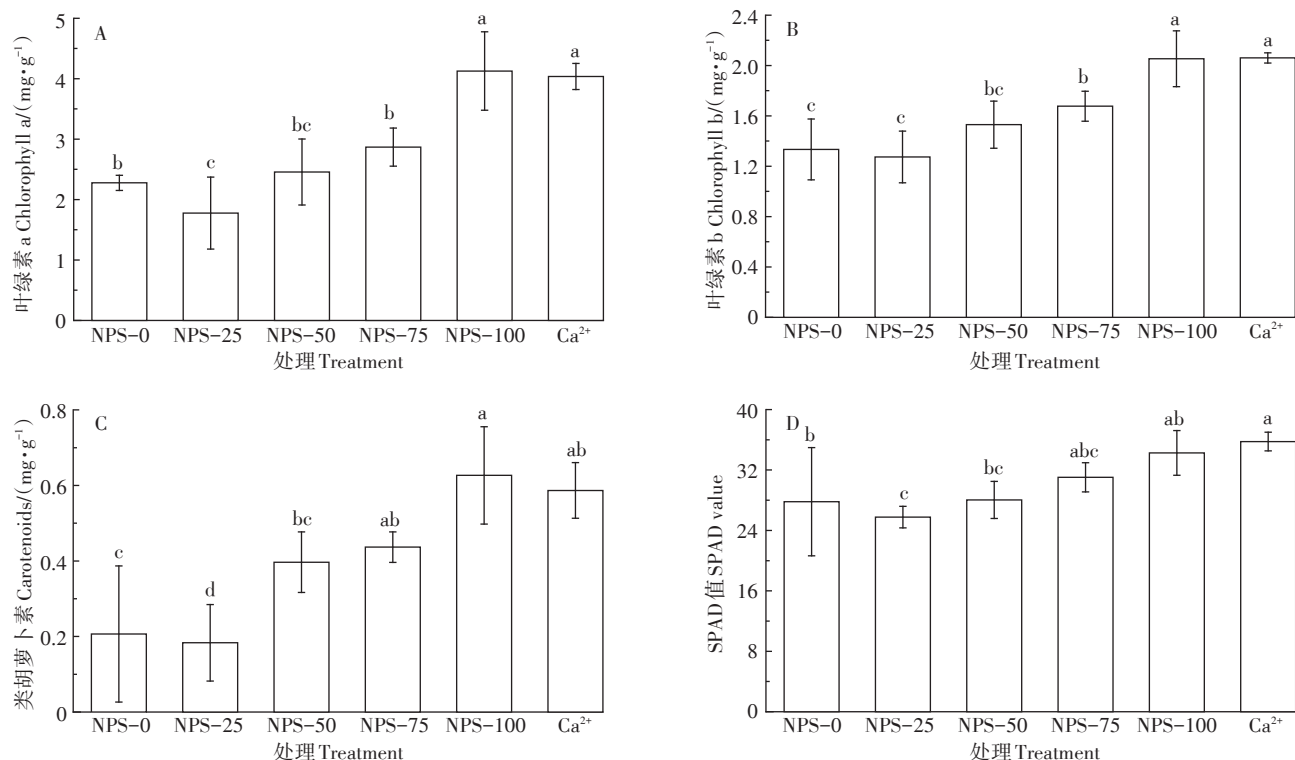


图3 不同浓度Ca(L-asp)-NPs对油菜叶绿素含量的影响

Figure 3 Effects of different concentrations of Ca(L-Asp)-NPs on chlorophyll contents in leaves of rape seedlings

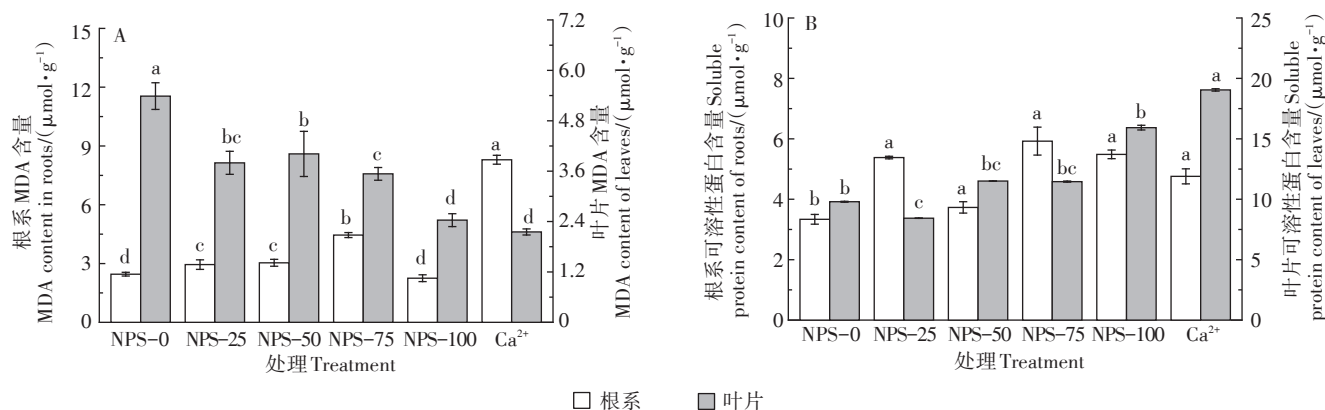


图4 不同浓度Ca(L-asp)-NPs对油菜MDA和可溶性蛋白含量的影响

Figure 4 Effects of different concentrations of Ca(L-Asp)-NPs on MDA and soluble protein content of rape seedlings

其浓度密切相关^[36]。本研究表明,施用较低浓度(25、50 mg·L⁻¹)的Ca(L-asp)-NPs不会显著促进油菜的生长,而随着浓度的升高,植株株高和根长增加,当浓度达到100 mg·L⁻¹时,油菜的株高和根长显著增加,促进植株生物量增加,说明施用100 mg·L⁻¹Ca(L-asp)-NPs可以显著促进油菜的生长。TRL、TSA、AD、RV和AN是衡量根系生长的重要指标。近期研究发现,施用不同浓度Ca(L-asp)-NPs会抑制棉花根系生长,显著降低其TRL、TSA和RV等根系形态指标^[25],但低浓度

(10、80 mg·L⁻¹)的Ca(L-asp)-NPs会促进枳壳根系的生长,高浓度(160、320 mg·L⁻¹)对枳壳幼苗根系产生毒害效应^[26]。而本研究发现,油菜根系生长随着Ca(L-asp)-NPs浓度的增加,TRL、TSA、AD和AN逐渐上升,说明纳米材料对植物根系的影响与植物种类及处理浓度有关^[37-38]。根系是植物进行养分吸收的重要器官,其生长情况直接决定植物吸收养分的能力。本研究中,植株根系和叶片中的钙含量随Ca(L-asp)-NPs浓度的升高而升高,说明根系的良

好生长会促进植物对钙元素的吸收与转运;然而Ca(L-asp)-NPs处理的植株根系和叶片的钙含量显著低于Ca²⁺处理,原因可能是纳米颗粒小粒径的团聚效果,使其不易穿过细胞壁和细胞膜,使得根系吸收的钙减少,通过韧皮部或木质部向上运输的钙减少,导致叶片中钙减少^[39-40]。

3.2 不同浓度外源Ca(L-asp)-NPs对油菜叶片光合特性的影响

光合作用是植物代谢过程的基础,纳米材料可以改变植物叶片的气孔开放程度、CO₂消耗状况、蒸腾速率及叶绿素含量,进而对植物的光合作用产生影响^[41]。本研究显示,施用Ca(L-asp)-NPs显著增加油菜叶片的Chl a和Chl b含量,进而提高叶片对光能的吸收、传递和转化,激活叶绿体光化学反应^[42];这与GOPINATH等^[43]和CAMBROLLE等^[44]的研究结果一致,说明Ca(L-asp)-NPs促进油菜幼苗的生长机制可能是其提高了植株叶绿素含量和光合作用。在本研究中,Ca(L-asp)-NPs的施用提高油菜叶片光合参数,其中100 mg·L⁻¹Ca(L-asp)-NPs对叶片光合作用的效果最佳。叶绿素含量和气孔导度是影响叶片光合效率的主要因素^[45]。Ca(L-asp)-NPs的施用增加了油菜叶片叶绿素含量,进而提高了光合速率;另外,钙是植物体内的信号分子,作为第二信使参与植物光合作用光合磷酸化和电子传递等重要的生理生化过程,促进叶片对于光能的吸收利用^[46]。且Ca(L-asp)-NPs可能参与植物体内碳氮代谢,进而提高光合作用,促进植株生长^[47-48]。

3.3 不同浓度外源Ca(L-asp)-NPs对油菜抗逆性指标的影响

纳米材料会对植物体内的抗逆指标产生不同程度的影响。MDA是细胞膜脂质过氧化的主要产物之一,其含量表示脂质过氧化程度^[49]。研究表明,施用不同浓度Ca(L-asp)-NPs可以提高油菜根系MDA含量,但Ca(L-asp)-NPs处理的植株根系MDA含量显著低于Ca²⁺处理,这可能是由于纳米颗粒聚集在细胞壁和细胞膜上,进而对根系膜脂产生不利影响^[50]。油菜叶片中MDA含量随着施用浓度的增加而下降,这是因为随着Ca(L-asp)-NPs浓度的增加,叶片叶绿素含量增加,光合作用增强,促进叶片的生长,保护细胞免受过氧化损伤。可溶性蛋白作为渗透调节物质维持细胞内外渗透势的平衡,提高细胞膜的稳定性^[51]。植株体内可溶性蛋白含量随着Ca(L-asp)-NPs浓度的增加呈现上升的趋势,说明施用外源Ca

(L-asp)-NPs促进植物体内可溶性蛋白含量的增加,为植物生长提供能量和碳骨架,提高植物的抗逆能力^[52]。

4 结论

(1)外源L-天冬氨酸纳米钙[Ca(L-asp)-NPs]可以促进植株根系生长,提高植株叶片叶绿素含量和光合速率,降低叶片丙二醛含量,增加植株体内可溶性蛋白的积累,有利于植株生长。

(2)100 mg·L⁻¹的Ca(L-asp)-NPs对植物生长促进效果最佳,植株生长情况与1.18 g·L⁻¹Ca(NO₃)₂·4H₂O处理相比无显著差异,但其用量大约是钙离子用量的1/12。因此Ca(L-asp)-NPs可以作为一种纳米肥料为油菜生长补充钙元素。

参考文献:

- [1] GOSWAMI L, KIM K H, DEEP A, et al. Engineered nano particles: Nature, behavior, and effect on the environment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 196: 297-315.
- [2] RASTOGI A, ZIVCAK M, SYTAR O, et al. Impact of metal and metal oxide nanoparticles on plant: A critical review[J]. *Frontiers in Chemistry*, 2017, 5: 78.
- [3] CAPALDI A, SANDRA C, DINIZ S, et al. Nanoparticles applied to plant science: A review[J]. *Talanta*, 2015, 131: 693-705.
- [4] HUSSAIN I, SINGH A, SINGH N B, et al. Plant-nanocerium interaction: Toxicity, accumulation, translocation and biotransformation[J]. *South African Journal of Botany*, 2019, 121: 239-247.
- [5] 谢寅峰, 姚晓华. 纳米TiO₂对油松种子萌发及幼苗生长生理的影响[J]. *西北植物学报*, 2009, 29(10): 2013-2018. XIE Y F, YAO X H. Effects of Nano-TiO₂ on germination and growth physiology of *Pinus tabulaeformis*[J]. *Northwest Botanical Journal*, 2009, 29(10): 2013-2018.
- [6] 高梦迪, 盛茂银. 纳米TiO₂对2种草本植物种子萌发与幼苗生长的影响[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 38(4): 69-74. GAO M D, SHENG M Y. Effects of Nano-TiO₂ on seed germination and seedling growth of two herbaceous plants[J]. *Journal of Guizhou Normal University(Natural Science Edition)*, 2020, 38(4): 69-74.
- [7] 宋羿. 纳米TiO₂对水生生物生长的影响研究[J]. *农业与技术*, 2014, 34(10): 6-7. SONG Y. Study on the effect of Nano-TiO₂ on the growth of aquatic organisms[J]. *Agriculture and Technology*, 2014, 34(10): 6-7.
- [8] SERVIN A D, CASTILLO-MICHEL H, HERNANDEZ-VIEZCAS J A, et al. Synchrotron micro-XRF and micro-XANES confirmation of the uptake and translocation of TiO₂ nanoparticles in cucumber (*Cucumis sativus*) plants[J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, 46(14): 7637-7643.
- [9] 李艳娟, 庄正, 刘青青, 等. 纳米TiO₂对杉木种子萌发和幼苗生长及生理的影响[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(5): 1259-1264. LI Y J,

- ZHUANG Z, LIU Q Q, et al. The effects of Nano-TiO₂ on seed germination, seedling growth and physiology of fir[J]. *Journal of Ecology*, 2017, 36(5):1259-1264.
- [10] 赵铭, 甘秋良, 李俊丽, 等. 纳米氧化铁对豇豆生长及其抗氧化系统的影响[J]. 西南农业学报, 2017, 30(3):547-555. ZHAO M, GAN Q L, LI J L, et al. Effect of Nano-iron oxide on growth of cowpea seedlings and relevant antioxidant response[J]. *Southwest Agricultural Journal*, 2017, 30(3):547-555.
- [11] 林茂宏, 沈玫玫, 吴佳妮, 等. 纳米氧化锌对两种蔬菜种子发芽及幼苗生长的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(1):72-78. LIN M H, SHEN M M, WU J N, et al. Effects of zinc oxide nanoparticles on germination and seedling growth of two vegetables[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(1):72-78.
- [12] 王振红, 罗专溪, 颜昌宙, 等. 纳米氧化锌对绿豆芽生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(4):619-624. WANG Z H, LUO Z X, YAN C Z, et al. Effects of Nano-ZnO particles on the growth of green bean sprouts[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(4):619-624.
- [13] 曹冲, 黄娟, 王宁, 等. 纳米氧化锌对湿地植物种子萌发的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(2):416-420. CAO C, HUANG J, WANG N, et al. Effect of Nano zinc oxide on seed germination of wetland plants[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2017, 47(2):416-420.
- [14] 王宁. 纳米氧化锌对湿地植物的胁迫效应[D]. 南京:东南大学, 2016. WANG N. Stress effect of Nano zinc oxide on wetland plants [D]. Nanjing:Southeast University, 2016.
- [15] 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. SUN L Y, SONG F B, LI X N, et al. Effects of Nano zinc oxide on seed germination and root carbon metabolism of maize[J]. *Soil and Crops*, 2020, 9(1):40-49.
- [16] HEPLER P K. Calcium: A central regulator of plant growth and development[J]. *Plant Cell*, 2005, 17(8):2142-2155.
- [17] 陆景陵. 植物营养学(上册)[M]. 北京:北京农业出版社, 2003:65-66. LU J L. Plant nutrition (Volume I)[M]. Beijing:China Agriculture Press, 2003:65-66.
- [18] 蔡良. 钙肥综述[J]. 磷肥与复肥, 2000(6):69-71. CAI L. Review of calcium fertilizer[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2000(6):69-71.
- [19] 黄艳, 文露, 庞亚卓, 等. 喷施钙肥对‘夏黑’葡萄果实糖酸积累的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(2):166-172. HUANG Y, WEN L, PANG Y Z, et al. Effect of spraying calcium on sugar and acid accumulation in summer black grape[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(2):166-172.
- [20] 张泽杰, 李冬梅, 周君, 等. 喷钙对‘黄金梨’钙动态及亚细胞分布的影响[J]. 植物生理学报, 2019, 55(8):1259-1266. ZHANG Z J, LI D M, ZHOU J, et al. Effects of spraying calcium on calcium dynamics and subcellular distribution in ‘Whangkeumbae’ pear[J]. *Plant Physiology Journal*, 2019, 55(8):1259-1266.
- [21] 张贤聪. 喷施钙肥对蓝莓品质及果胶降解的影响[D]. 成都:四川农业大学, 2019. ZHANG X C. Effects of calcium fertilizer spraying on blueberry quality and pectin degradation[D]. Chengdu:Sichuan Agricultural University, 2019.
- [22] 裴健翔, 李燕青, 程存刚, 等. 不同钙制剂对‘寒富’苹果果实硬度及相关细胞壁代谢物质的影响[J]. 果树学报, 2018, 35(9):1059-1066. PEI J X, LI Y Q, CHENG C G, et al. Effects of different calcium agents on fruit firmness and related cell wall metabolites in ‘Han-fu’ apple[J]. *Journal of Fruit Science*, 2018, 35(9):1059-1066.
- [23] 高加明, 黄广华, 任晓红, 等. 氨基酸钙对烤烟生长及烟叶品质的影响[J]. 现代农业科技, 2020(12):23-24, 26. GAO J M, HUANG G H, REN X H, et al. Effects of amino acid calcium on growth and quality of flue-cured tobacco[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2020(12):23-24, 26.
- [24] 戎舜城, 毕靖芳. L-天冬氨酸钙的技术指标及其建立方法[J]. 中国食品添加剂, 2002(2):92-94. RONG S C, BI J F. Technical index and establishment method of L-aspartate calcium[J]. *Chinese Food Additives*, 2002(2):92-94.
- [25] 刘亚林, 闫磊, 曾钰, 等. 外源L-天冬氨酸纳米钙抑制棉花生长的效应及潜在机制[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(1):62-69. LIU Y L, YAN L, ZENG Y, et al. Effects of exogenous calcium L-aspartate nanoparticles on cotton growth and its potential mechanisms [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(1):62-69.
- [26] 刘亚林. 硼钙缺乏及外源L-纳米天冬氨酸钙对枳壳砧木根系生长影响的初步机制[D]. 武汉:华中农业大学, 2020. LIU Y L. Preliminary mechanism of boron and calcium deficiency and exogenous L-Nano calcium aspartate on root growth of trifoliate orange rootstock [D]. Wuhan:Huazhong Agricultural University, 2020.
- [27] 吴涛, 曾妮, 李巍, 等. 甘蓝型油菜扩展蛋白家族的全基因组鉴定及其对缺硼胁迫响应的差异分析(英文)[J]. 植物科学学报, 2021, 39(1):59-75. WU T, ZENG N, LI W, et al. Genome-wide identification of the expansin gene family and differences in transcriptional responses to boron deficiency in *Brassica napus* L.[J]. *Journal of Plant Science*, 2021, 39(1):59-75.
- [28] HOAGLAND D R, ARNON D I. The water-culture method for growing plants without soil[J]. *California Agricultural Experiment Station Circular*, 1950, 347(2):1-32.
- [29] LIU Y L, RIAZ M, WU X W, et al. Boron and calcium homeostasis affects trifoliate rootstock (*Poncirus trifoliata*) root configuration and nutrient utilization[J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2019, 21(2):359-366.
- [30] HEITKEMPER D T, KAINE L A, JACKSON D S, et al. Practical applications of element-specific detection by inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy and inductively coupled plasma mass spectrometry to ion chromatography of foods[J]. *Journal of Chromatography A*, 1994, 671(1/2):101-108.
- [31] 潘勇辉, 陆志峰, 鲁剑巍, 等. 缺钾对越冬期油菜光合特性和叶绿体超微结构的影响[J]. 中国油料作物学报, 2015, 37(5):688-693. PAN Y H, LU Z F, LU J W, et al. Photosynthetic characteristics and chloroplast ultrastructure of wintering oilseed rape under potassium deficiency[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2015, 37(5):688-693.
- [32] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术(第2版)[M]. 北京:高等教育出版社, 2019.

- 育出版社, 2006: 278–279. WANG X K. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment (2nd Edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 278–279.
- [33] GIANNOPOLITIS C N, RIES S K. Superoxide dismutases: I. occurrence in higher plants[J]. *Plant Physiology*, 1977, 59(2): 309–314.
- [34] ERNST L, NORDENBRAND K, ORRENIUS S, et al. Microsomal lipid peroxidation[J]. *Biological Chemistry*, 1968, 349(11): 1604–1605.
- [35] RASTOGI A, ZIVCAK M, SYTAR O, et al. Impact of metal and metal oxide nanoparticles on plant: A critical review[J]. *Frontiers in Chemistry*, 2017, 5: 78.
- [36] ELMER W, DE LA T R, PAGANO L, et al. Effect of metalloid and metal oxide nanoparticles on fusarium wilt of watermelon[J]. *Plant Disease*, 2018, 102(7): 1394–1401.
- [37] YOUSSEF M S, ELANAWIR M. Evaluation of phytotoxicity, cytotoxicity, and genotoxicity of ZnO nanoparticles in *Vicia faba*[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2018, 27: 18972–18984.
- [38] DERBALAH A, SHENASHEN M, HAMZA A, et al. Antifungal activity of fabricated mesoporous silica nanoparticles against early blight of tomato[J]. *Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2018, 5: 145–150.
- [39] PAIVA E A S. Are calcium oxalate crystals a dynamic calcium store in plants?[J]. *New Phytologist*, 2019, 223(4): 1707–1711.
- [40] LIN D, XING B. Phytotoxicity of nanoparticles: Inhibition of seed germination and root growth[J]. *Environment Pollution*, 2007, 150: 243–250.
- [41] HAGHIGHI M, PESSARAKLI M. Influence of silicon and Nano-silicon on salinity tolerance of cherry tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) at early growth stage[J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 161: 111–117.
- [42] QI M F, LIU Y F, LI T L. Nano-TiO₂ improve the photosynthesis of tomato leaves under mild heat stress[J]. *Biological Trace Element Research*, 2013, 156: 323–328.
- [43] GOPINATH K, GOWRI S, KARTHIKA V, et al. Green synthesis of gold nanoparticles from fruit extract of *Terminalia arjuna*, for the enhanced seed germination activity of *Gloriosa superba*[J]. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 2014, 4(3): 115.
- [44] CAMBROLLÉ J, MANCILLA-LEYTÓN J M, MUÑOZ-VALLE S, et al. Effects of copper sulfate on growth and physiological responses of *Limoniastrum monopetalum*[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(12): 8839–8847.
- [45] 金小琬, 朱茜, 黄进, 等. 硒对叶绿体及光合作用的影响[J]. 分子植物育种, 2019, 17(1): 288–294. JIN X W, ZHU X, HUANG J, et al. Effects of selenium on chloroplast and photosynthesis[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2019, 17(1): 288–294.
- [46] 周君, 肖伟, 陈修德, 等. 外源钙对‘黄金梨’叶片光合特性及果实品质的影响[J]. 植物生理学报, 2018, 54(3): 449–455. ZHOU J, XIAO W, CHEN X D, et al. Effects of exogenous calcium on leaf photosynthetic characteristics and fruit quality of ‘Huangjin pear’ [J]. *Plant Physiology Journal*, 2018, 54(3): 449–455.
- [47] YANG F, HONG F S, YOU W J, et al. Influence of Nano-anatase TiO₂ on the nitrogen metabolism of growing spinach[J]. *Biological Trace Element Research*, 2006, 110: 179–190.
- [48] YANG F, LIU C, GAO F Q, et al. The improvement of spinach growth by Nano-anatase TiO₂ treatment is related to nitrogen photoreduction [J]. *Biological Trace Element Research*, 2007, 119: 77–88.
- [49] KIM S, LEE S, LEE I. Alteration of phytotoxicity and oxidant stress potential by metal oxide nanoparticles in *Cucumis sativus*[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2012, 223(5): 2799–2806.
- [50] PÉREZ-DE-LUQUE A. Interaction of nanomaterials with plants: What do we need for real applications in agriculture[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2017, 5: 12.
- [51] 李燕, 张敏, 宁朋, 等. 外源NO对盐胁迫下中华常春藤生理特性的影响[J]. 植物生理学报, 2022, 58(1): 207–213. LI Y, ZHANG M, NING P, et al. Effects of exogenous NO on physiological characteristics of ivy chinensis under salt stress[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2022, 58(1): 207–213.
- [52] SIDDIQI M H, AL-WHAIBI M H, SAKRAN A M, et al. Calcium-induced amelioration of boron toxicity in radish[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2013, 32(1): 61–71.

(责任编辑:叶飞)