



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

纳米氧化锌对两种蔬菜种子发芽及幼苗生长的影响

林茂宏, 沈玫玫, 吴佳妮, 陈慧玲, 徐艺萌, 刘维涛

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0099>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三种纳米材料对水稻幼苗生长及根际土壤肥力的影响

尹勇, 刘灵

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 736–743 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0259>

甜菜幼苗叶片光合性能、渗透调节及活性氧对高硼胁迫的响应

郝学明, 吴贞祯, 王响玲, 宋柏权, 周建朝

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 753–760 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0209>

小麦秸秆生物质炭对碱性土壤中油菜生长和镉吸收的影响

任心豪, 陈乔, 李锦, 贺飞, 吴思沛, 郭军康

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 119–126 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0012>

增氧方式对水芹菜-微生物联合作用处理冬季养殖废水的影响

刘方剑, 杨海龙, 陈晓露, 李琳秋, 周化斌

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 770–776 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0345>

模拟酸雨与镉复合胁迫对玉米幼苗生理状况的影响

陈佳月, 姜洪进, 解静芳, 李萌, 贾真真, 石晶

农业资源与环境学报. 2018, 35(6): 575–582 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0031>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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 Mao-hong, SHEN Mei-mei, WU Jia-ni, 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.



开放科学 OSID

纳米氧化锌对两种蔬菜种子发芽及幼苗生长的影响

林茂宏¹, 沈玫玫², 吴佳妮², 陈慧玲², 徐艺萌², 刘维涛^{2*}

(1. 佛山市环境保护投资有限公司, 广东 佛山 528051; 2. 南开大学环境科学与工程学院污染过程与基准教育部重点实验室/天津市跨介质复合污染环境治理技术重点实验室, 天津 300350)

摘要:为研究金属型纳米颗粒对蔬菜种子发芽性能和幼苗生长的影响,于2017年7月采用种子发芽试验,探究了不同浓度(0、50、100、200、500、700、1 000 mg·L⁻¹)下纳米氧化锌颗粒(ZnO NPs)和硫酸锌(ZnSO₄)处理对樱桃萝卜(*Raphanus sativus* L.)和小白菜(*Brassica chinensis* L.)种子发芽性能及幼苗生长的影响。结果表明:不同浓度 ZnO NPs 或 ZnSO₄处理下两种蔬菜作物的发芽率与对照处理相比均无显著差异($P>0.05$),而两种蔬菜的生物量则均受到抑制。ZnO NPs 及 ZnSO₄处理对两种蔬菜根长的抑制作用强于芽长。ZnO NPs 对两种蔬菜种子根长的抑制率比 ZnSO₄更大,且抑制率均随着处理浓度的升高而增加,在 1 000 mg·L⁻¹时最高,达到 98%。而 ZnSO₄对两种蔬菜芽长的抑制作用强于 ZnO NPs。研究表明,尽管 ZnO NPs 和 ZnSO₄对两种蔬菜发芽率无显著影响,但二者均在一定程度上抑制了两种蔬菜根长和芽长。

关键词:纳米氧化锌;樱桃萝卜;小白菜;种子发芽;幼苗生长

中图分类号:X53;Q89 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2021)01-0072-07 doi: 10.13254/j.jare.2020.0099

Effects of zinc oxide nanoparticles on germination and seedling growth of two vegetables

LIN Mao-hong¹, SHEN Mei-mei², WU Jia-ni², CHEN Hui-ling², XU Yi-meng², LIU Wei-tao^{2*}

(1. Foshan Environmental Protection Investment Limited Company, Foshan 528051, China; 2. Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria, Ministry of Education/Tianjin Key Laboratory of Environmental Technology for Complex Trans-Media Pollution, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China)

Abstract: To study the effects of metal-based nanoparticles on the germination and growth of vegetable seeds, an experiment was conducted in July 2017 to explore the effects of different zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) and zinc sulfate (ZnSO₄) treatments (0, 50, 100, 200, 500, 700, and 1 000 mg·L⁻¹) on germination performance and seedling growth of *Raphanus sativus* L. and *Brassica chinensis* L.. Results showed no significant difference in the germination rate between the two vegetable crops under different ZnO NPs and ZnSO₄ treatments ($P>0.05$) when compared with the control; while the biomass of both vegetables was inhibited. ZnO NPs and ZnSO₄ inhibited the root length of both vegetables more than their shoot length. The inhibition rate of ZnO NPs on root elongation of both vegetables was greater than that of ZnSO₄, while it increased with an increase in treatment concentration, reaching up to 98% at 1 000 mg·L⁻¹. However, ZnSO₄ inhibited shoot growth of both vegetables much more than ZnO NPs. The results revealed that although ZnO NPs and ZnSO₄ had no significant effect on the germination of both vegetables, they both inhibited the root length and shoot length to some extent.

Keywords: nano-ZnO; *Raphanus sativus* L.; *Brassica chinensis* L.; seed germination; seedling growth

收稿日期: 2020-03-07 录用日期: 2020-04-27

作者简介: 林茂宏(1985—),男,广东阳春人,硕士,工程师,主要从事土壤修复治理研究。E-mail: 15387212@qq.com

*通信作者: 刘维涛 E-mail: lwt@nankai.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471411);天津市应用基础与前沿研究计划项目(15JCYBJC22700)

Project supported: National Natural Science Foundation of China (41471411); Tianjin Research Program of Application Foundation and Advanced Technology (15JCYBJC22700)

纳米材料(Nanomaterials, NMs)是指至少有一维几何尺寸处于纳米尺度范围内(1~100 nm)的物质,具有比表面积大和表面能高等特点^[1-2]。其中,金属型纳米颗粒(Metal-based nanoparticles, MB NPs)是极其重要的一类纳米材料,具有金属材料 and 纳米材料的双重特性,包括典型的零价金属纳米颗粒和金属氧化物颗粒等^[3-4]。

纳米氧化锌颗粒(ZnO NPs)广泛应用于塑料、陶瓷、玻璃、水泥、橡胶、电池、防火阻燃剂、化妆品和传感器等领域^[5]。据估计,全球每年ZnO NPs的生产量约为550~33 400 t,是应用量居第三位的金属型纳米材料^[6]。ZnO NPs一般通过农业化学品的施用、大气沉降、降水和灌溉等途径进入土壤^[7-8]。ZnO NPs在土壤中的迁移能力较小,最终导致其在土壤中的浓度远高于大气和水体^[9],并可被植物吸收和积累,影响植物生长甚至通过食物链威胁人体健康^[10-11]。

目前,ZnO NPs对植物的毒理学效应尚未明确^[6],甚至出现截然不同的研究结果^[12]。ZnO NPs对瓜儿豆(*Cyamopsis tetragonoloba*)的生物量、茎长、根长、根面积、叶绿素含量和叶总可溶性蛋白具有显著的促进作用^[13]。亦有研究表明ZnO NPs提升了香菜(*Coriandrum sativum*)光合色素含量^[8]和莴苣(*Lactuca sativa*)的生物量及净光合速率^[14]。然而,相关研究证实ZnO NPs及其释放出来的Zn²⁺对植物具有一定的毒性^[15]。ZnO NPs显著降低了芥菜(*Brassica juncea*)的生物量,且造成其根、茎和叶的氧化损伤^[16]。Zhang等^[15]研究揭示ZnO NPs显著降低了玉米(*Zea mays*)和黄瓜(*Cucumis sativus*)的根长,但对种子发芽率无显著影响。此外,ZnO NPs降低了80%的根和地上部生物量,ZnO NPs的毒性小于ZnCl₂的毒性^[17]。

种子萌发是植物生命周期的一个关键时期,也是对外界环境因子最敏感的时期之一^[18],开展种子发芽试验有望初步评估污染物对植物的毒理学效应。尽管针对ZnO NPs的种子发芽试验已有报道,但主要集中在水稻(*Oryza sativa*)^[19]、小麦(*Triticum aestivum*)^[20]、玉米(*Zea mays*)^[15]、油菜(*Brassica napus*)^[21]和豇豆(*Vigna unguiculata*)^[22]等作物,而对于根菜类蔬菜樱桃萝卜(*Raphanus sativus* L.)和叶菜类蔬菜小白菜(*Brassica chinensis* L.)的种子发芽试验研究相对较少。因此,本研究选取在我国广泛种植的樱桃萝卜和小白菜作为供试作物,通过种子发芽试验探究ZnO NPs和ZnSO₄对两种蔬菜作物种子萌发及幼苗生长的影响,以期今后ZnO NPs的毒理学效应、环境应用及其风

险评估提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验于南开大学环境科学与工程学院污染过程与基准教育部重点实验室进行,该实验室位于南开大学津南校区(38°59'15.49"N, 117°19'53.08"E),试验于2017年7—8月进行。供试ZnO NPs材料购于上海麦克林生化科技有限公司,纯度99%,粒径(30±10) nm。供试小白菜种子购于北京绿金蓝育苗有限公司,供试樱桃萝卜种子购于北京金丹隆种子有限公司。直径9 cm的玻璃培养皿与滤纸、30% H₂O₂(优级纯)以及硫酸锌(ZnSO₄·7H₂O,优级纯)均购自天津海斯凯尔科技发展有限公司;试验所用去离子水为实验室自制。

1.2 试验方法

1.2.1 ZnO NPs性能表征

通过场发射透射电镜(TEM,日本电子JEM-2800)观察ZnO NPs形态与粒径分布,利用X射线粉末衍射仪(XRD,Ultima IV)确认纳米材料的晶型,通过多站扩展式全自动快速比表面仪(ASAP 2460)测定纳米颗粒的比表面积。

1.2.2 ZnO NPs悬浮液的制备

通过向超纯水中加入适量的ZnO NPs制备NPs悬浊液。为避免聚集,基于先前的研究,将溶液在30℃下利用超声波细胞粉碎机(新芝JY98-ⅢN)进行超声处理(130 W, 20 kHz)30 min,使其均匀分散于高纯水中形成纳米材料悬浮液。离子溶液由ZnSO₄·7H₂O配制,其浓度与相应的纳米材料悬浮液的金属量一致。

1.2.3 预试验

选取直径9 cm、铺有1层定性滤纸的玻璃培养皿,挑选大小均匀、颗粒饱满的15粒小白菜或樱桃萝卜种子,用10%的H₂O₂溶液浸泡30 min以去除表面细菌,再用去离子水冲洗多次后播种于培养皿,使每颗种子之间的距离不少于1 cm。将处理浓度为0、1、10、100 mg·L⁻¹的ZnO NPs悬浮液各5 mL分别加入培养皿中,每个浓度设置3个重复,将培养皿用封口膜密封后于25℃下避光培养。

1.2.4 种子发芽试验

种子的选择和前处理过程与1.2.3节相同。试验共设13个处理,每个处理3次重复,ZnO NPs处理浓度为0、50、100、200、500、700、1 000 mg·L⁻¹(分别标记为CK、N50、N100、N200、N500、N700、N1000),ZnSO₄

浓度为50、100、200、500、700、1 000 mg·L⁻¹(分别标记为I50、I100、I200、I500、I700、I1000)。将培养皿均放置在恒温培养箱中于25℃下避光培养7 d。培养结束后,将培养皿浸泡在20 mmol·L⁻¹ Na₂·EDTA溶液中2 h,然后用自来水和去离子水冲洗,去除黏附于样品上的污染物。

1.3 测定方法

用天平称量幼苗的鲜质量,用游标卡尺分别测量根长、芽长并计算抑制率,计算公式为:

$$\text{抑制率} = (A - B) / A \times 100\% \quad (1)$$

其中:A为对照处理根长或芽长;B为污染处理根长或芽长。

试验期间每日记录发芽的种子数,试验结束时计算种子发芽率(GR),其计算公式为:

$$\text{发芽率} = (\text{收获时发芽种子总数} / \text{供试种子总数}) \times 100\% \quad (2)$$

本试验中种子幼根或子叶伸出种皮视为萌发,只有幼根超过1 mm才被记为根长。

1.4 数据分析

所有检测的数据均重复3次,采用Microsoft Excel 2010和SPSS 13.0对测得数据进行计算、处理与统计分析,利用LSD(Least significant difference)法对数据进行显著性分析,并利用Origin 9.0进行制图。

2 结果与分析

2.1 ZnO NPs的表征

本试验所使用纳米材料的大小及形态通过TEM观察(图1A),其材料的物相组成及纯度使用XRD进行检测(图1B)。从图1A中可以清晰地看出ZnO NPs均为比较规则的圆球状颗粒,平均粒径约30 nm。图1B中清晰地展示了纳米材料的XRD衍射峰,其中

ZnO NPs样品的XRD衍射峰尖锐明显,并且几乎完全一致,在2θ为31.769°、34.421°、36.252°处的主衍射峰分别对应JCPDS No. 88—2495标准卡片的(100)、(002)、(101)晶面,没有任何杂峰,表明该纳米材料为六方晶系,结晶度好,纯度高。

2.2 ZnO NPs和ZnSO₄对两种蔬菜种子发芽率及生物量的影响

发芽率不仅是衡量种子发芽能力的最直观的物理量,也是高等植物毒理试验的一个重要指标。根据预试验结果,两种蔬菜种子发芽率均为100%,满足GB 16715.2—2010规定的种子质量标准(≥85%)。在发芽试验浓度范围内,各污染浓度处理下两种蔬菜作物的发芽率均大于93%(图2),与对照处理均无显著差异(P>0.05),表明ZnO NPs和ZnSO₄对两种蔬菜发芽率无显著影响。

生物量是最直观反映植物受污染影响的物理量,与发芽率不同,小白菜幼苗的生物量随着ZnO NPs和ZnSO₄浓度的增加而降低,表现出明显的抑制作用(图3)。尽管ZnO NPs和ZnSO₄对樱桃萝卜表现出低浓度促进高浓度抑制(“低促高抑”)的现象,但在最高浓度(1 000 mg·L⁻¹)时,ZnO NPs对樱桃萝卜鲜质量降低超过60%。整体而言,ZnO NPs比ZnSO₄对樱桃萝卜的毒性更强,而ZnSO₄对小白菜生物量的降低作用强于ZnO NPs。

2.3 ZnO NPs和ZnSO₄对樱桃萝卜与小白菜根长和芽长的影响

不同浓度的ZnO NPs及ZnSO₄均在一定程度上抑制了两种蔬菜根长和芽长(图4)。由图5可知,两种植物的根长和芽长随着污染物浓度的升高而逐渐降低,但ZnO NPs及ZnSO₄对两种蔬菜根长的抑制作用强于芽长。相对而言,ZnO NPs对两种蔬菜种子根长的抑

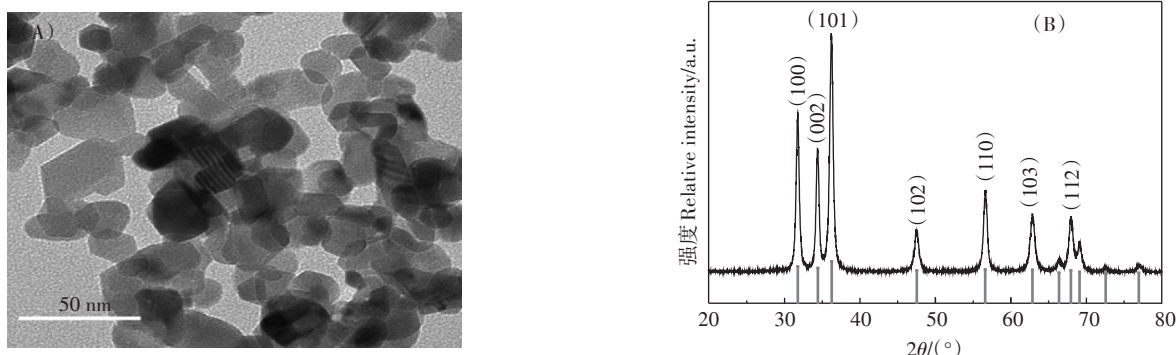


图1 纳米氧化锌(ZnO NPs)的透射电镜图(A)及X-射线衍射图谱(B)

Figure 1 Transmission electron microscope(A) and X-ray diffraction pattern(B) of ZnO NPs

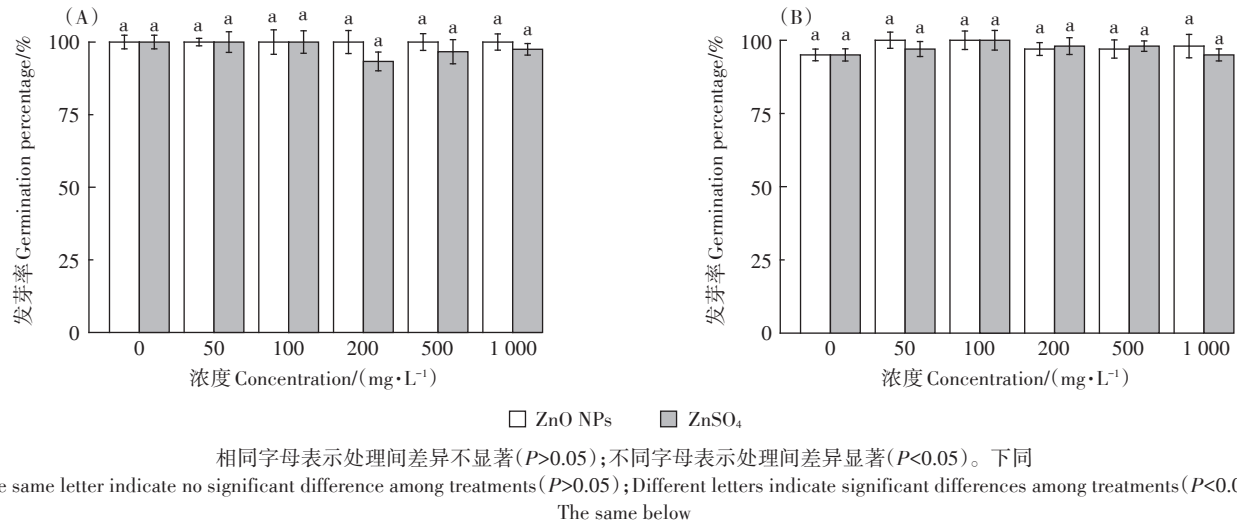


图2 不同处理下樱桃萝卜(A)和小白菜(B)发芽率

Figure 2 Germination percentage of *Raphanus sativus* (A) and *Brassica chinensis* (B) under different treatments

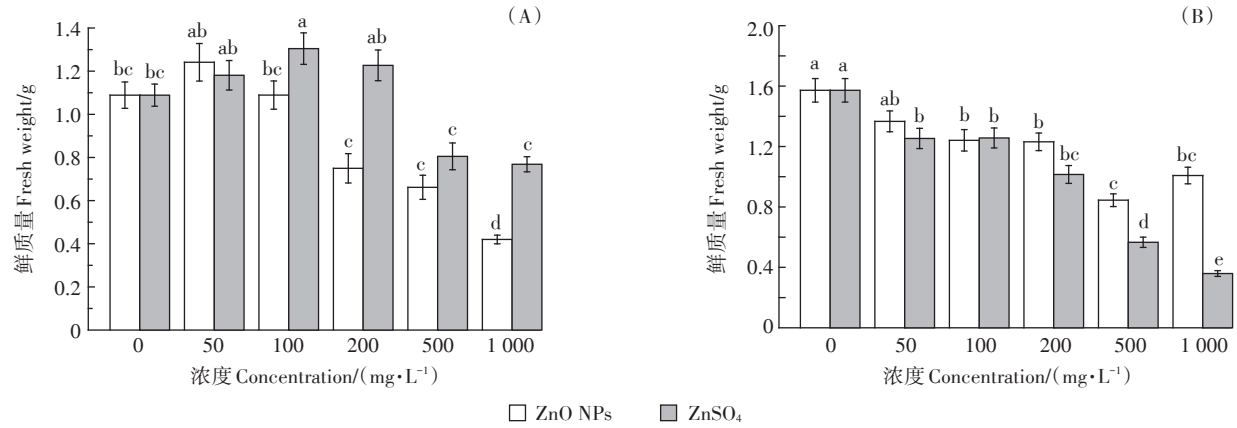


图3 不同处理下樱桃萝卜(A)和小白菜(B)鲜质量

Figure 3 Fresh weight of *Raphanus sativus* (A) and *Brassica chinensis* (B) under different treatments

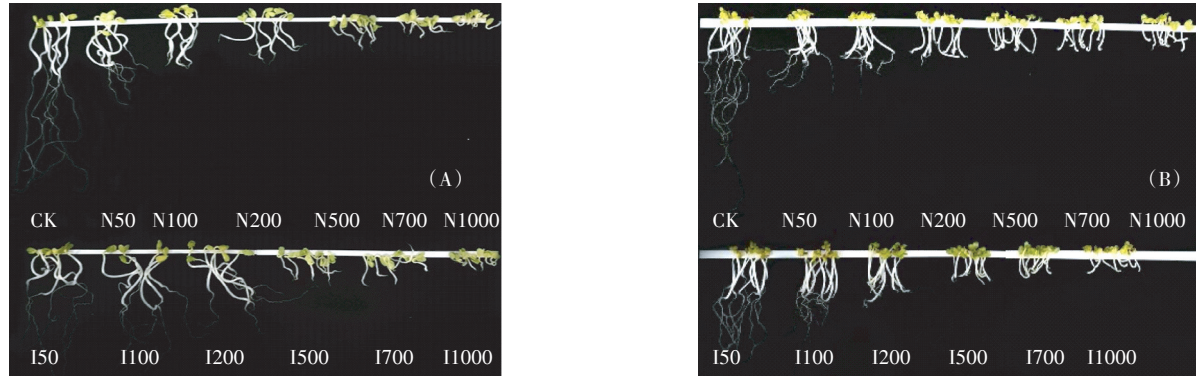


图4 不同处理下樱桃萝卜(A)和小白菜(B)的发芽形态

Figure 4 Shoot morphology of *Raphanus sativus* (A) and *Brassica chinensis* (B) under different treatments

制作用比 ZnSO₄ 更大,且抑制率均随浓度的升高而增加,在 1 000 mg·L⁻¹ 时最高,达到 98%。但 ZnSO₄ 对两种蔬菜芽长的抑制作用则强于 ZnO NPs。

如图6所示,不同浓度 ZnO NPs 与 ZnSO₄ 处理对两种蔬菜芽长胁迫作用均低于对根长的胁迫作用,甚至在低浓度时出现促进作用。整体而言,ZnO NPs 处理

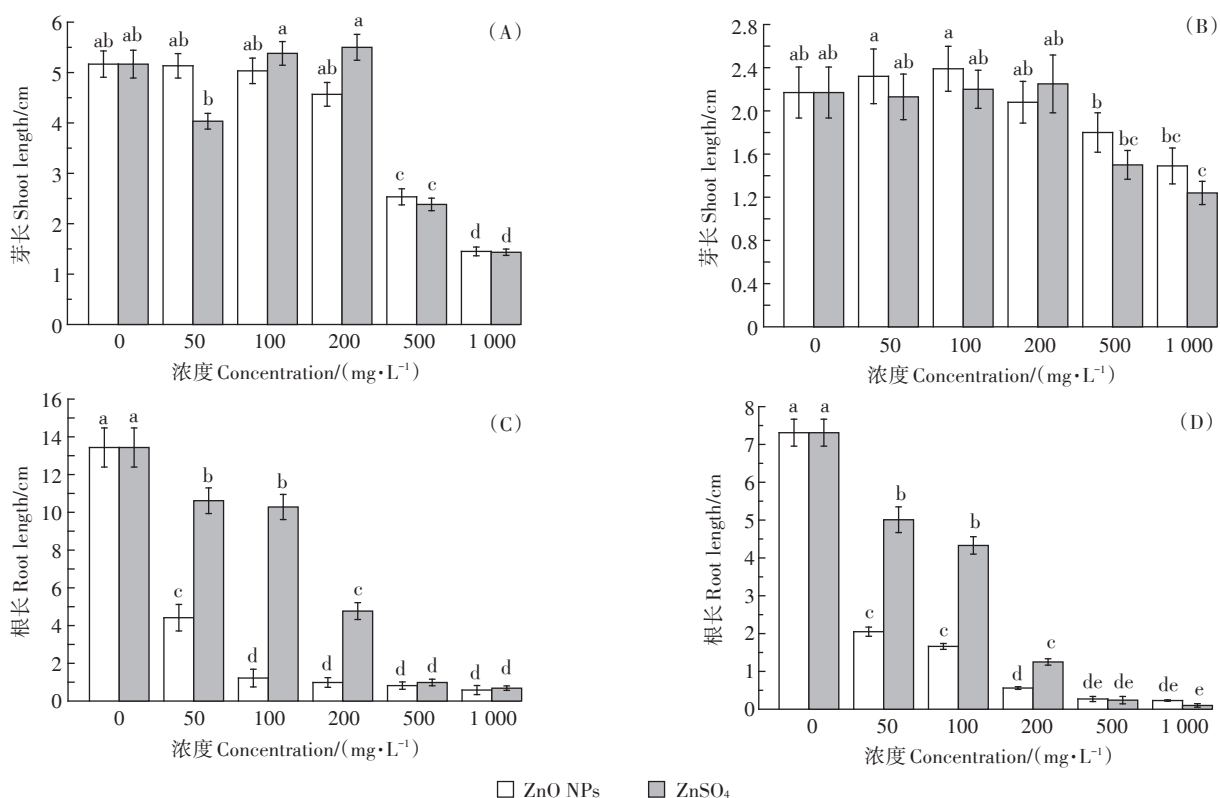


图5 不同处理下樱桃萝卜(A、C)和小白菜(B、D)的芽长及根长

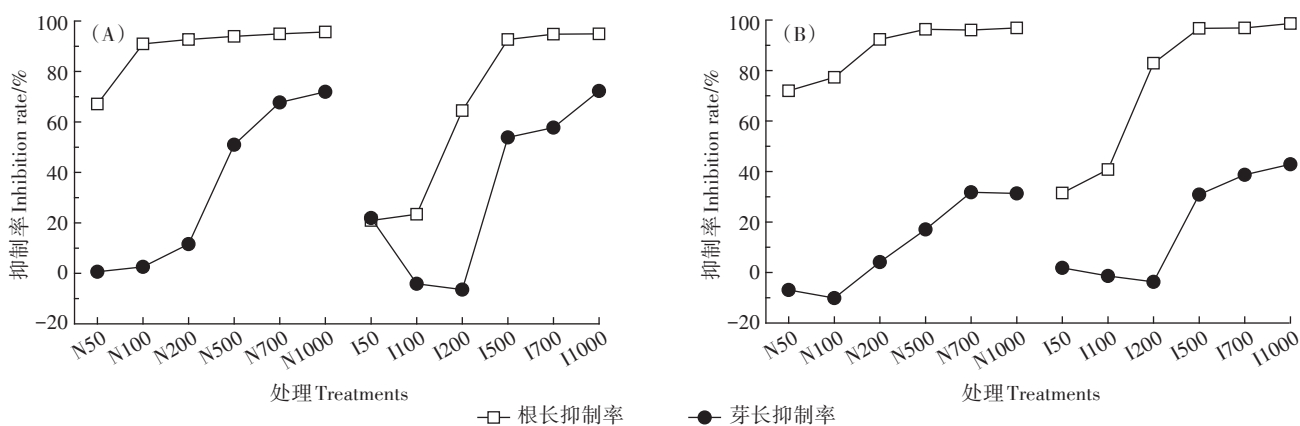
 Figure 5 Shoot and root length of *Raphanus sativus*(A,C) and *Brassica chinensis*(B,D) under different treatments


图6 不同处理下樱桃萝卜(A)和小白菜(B)的根长和芽长抑制率

 Figure 6 Inhibition rates of root and shoot length of *Raphanus sativus*(A) and *Brassica chinensis*(B) under different treatments

均表现为对樱桃萝卜芽长的抑制率明显高于小白菜(图6),表明ZnO NPs对樱桃萝卜生长的胁迫作用高于小白菜,这与二者对两种幼苗生物量的影响结果一致,并且对根长的抑制作用明显强于芽长。

3 讨论

目前,金属型纳米颗粒(MB NPs)产生的植物毒性机制尚不明确^[23]。MB NPs可以溶出部分金属离

子,而金属离子尤其是重金属离子对植物的毒性已得到普遍证实^[24]。对于MB NPs,其生物毒性来自溶解的金属离子还是纳米颗粒自身也是目前NPs毒性研究中争议较大的问题之一^[25-26]。作为一种具有代表性的金属氧化物纳米材料,ZnO NPs的植物致毒机制也同样饱受争议^[27]。有研究认为纳米氧化物的生物毒性主要源于所溶出的金属离子^[28-29],而García-Gómez等^[30]研究结果表明,ZnO NPs溶解出的Zn²⁺在

植物中优先发挥毒性,但是可能存在 Zn^{2+} 与 ZnO NPs共同对植物产生毒性作用的现象。López-Moreno等^[25]研究认为,很难说明 ZnO NPs的植物毒性是否来自纳米颗粒,而经 ZnO NPs暴露后,大豆组织中的 Zn 以 Zn^{2+} 而非 ZnO NPs形式存在。Lin等^[31]研究表明, Zn NPs和 ZnO NPs能够明显抑制植物发芽及根生长,但是二者暴露液离心过滤后的上清液则未表现出植物毒性,表明 Zn NPs和 ZnO NPs的毒性来自纳米颗粒而非溶解的 Zn^{2+} ;而Xiang等^[32]也得出了相似的结果,即 ZnO NPs溶解的 Zn^{2+} 不是其对大白菜幼苗影响的主要原因。类似地,本研究发现低浓度($50\sim 100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的 ZnSO_4 对两种蔬菜根长的抑制作用显著低于相同浓度的 ZnO NPs处理($P<0.05$),而相同浓度的 ZnO NPs溶出的 Zn^{2+} 浓度低于对比离子处理,表明在低浓度时 ZnO NPs对两种幼苗根的生物毒性高于 Zn^{2+} ,这一毒性主要来源于 ZnO NPs自身毒性而非 Zn^{2+} 毒性;但在高浓度处理下,二者抑制率较为接近,其致毒机理仍需进一步研究。

ZnO NPs可明显抑制玉米(*Zea mays* L.)根的生长,但对于植物的发芽没有显著的影响^[31];类似的研究也发现 ZnO NPs对苜蓿(*Medicago sativa* L.)、黑芥(*Brassica nigra*)、拟南芥(*Arabidopsis thaliana*)、玉米(*Zea mays* L.)和水稻(*Oryza sativa* L.)等作物的种子萌发、植株生长以及产品质量均有负面影响^[6,17,33-34]。在本研究中, ZnO NPs对两种植物的根长与芽长抑制率与污染物浓度呈正相关(图6),并且 ZnO NPs对两种蔬菜种子根长的抑制作用较芽长更强,两种污染物浓度在 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时抑制率均高于95%。可能原因是种子萌发后根部最先伸出种皮,种皮对于种子发芽前的保护作用,可在一定程度上减少污染物对于种子的毒害作用,从而使得 ZnO NPs对两种蔬菜发芽率影响不显著;但幼苗生长阶段,根部相较于地上部与污染物接触时间最长,接触面积也最大^[35-37],受污染物胁迫作用比地上部大,从而使得污染物对根长的抑制作用比芽长更强。

4 结论

(1) ZnO NPs和 ZnSO_4 对樱桃萝卜和小白菜的发芽率均无显著影响。

(2)不同浓度的 ZnO NPs和 ZnSO_4 均在一定程度上抑制了两种蔬菜根长和芽长, ZnO NPs对两种蔬菜根长的抑制作用比 ZnSO_4 更大,但 ZnSO_4 对两种蔬菜芽长的抑制作用则强于 ZnO NPs。

(3) ZnO NPs比 ZnSO_4 对樱桃萝卜的毒性更强,而 ZnSO_4 对小白菜生物量的降低作用强于 ZnO NPs。

(4)不同浓度 ZnO NPs与 ZnSO_4 处理对两种蔬菜芽长胁迫作用均低于对根长的胁迫作用。

参考文献:

- [1] 吕继涛, 张淑贞. 人工纳米材料与植物的相互作用: 植物毒性、吸收和传输[J]. 化学进展, 2013, 25(1): 156-163. LÜ Ji-tao, ZHANG Shu-zhen. Interactions between manufactured nanomaterials and plants: Phytotoxicity, uptake and translocation[J]. *Progress in Chemistry*, 2013, 25(1): 156-163.
- [2] Ma X, Geiser-Lee J, Deng Y, et al. Interactions between engineered nanoparticles (ENPs) and plants: Phytotoxicity, uptake and accumulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(16): 3053-3061.
- [3] Liu W, Zeb A, Lian J, et al. Interactions of metal-based nanoparticles (MBNPs) and metal-oxide nanoparticles (MONPs) with crop plants: A critical review of research progress and prospects[J]. *Environmental Reviews*, 2020, 28: 294-310.
- [4] Zeb A, Liu W, Wu J, et al. Knowledge domain and emerging trends in nanoparticles and plants interaction research: A scientometric analysis[J]. *NanoImpact*, 2021, 21: 100278.
- [5] 李帅, 刘雪琴, 王发园, 等. 纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(12): 4615-4622. LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, et al. Effects of ZnO nanoparticles, ZnSO_4 and arbuscular mycorrhizal fungus on the growth of maize[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(12): 4615-4622.
- [6] Rajput V D, Minkina T M, Behal A, et al. Effects of zinc-oxide nanoparticles on soil, plants, animals and soil organisms: A review[J]. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 2018, 9: 76-84.
- [7] 王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 等. 氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究[J]. 环境科学, 2014, 35(5): 1968-1973. WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, et al. Phytotoxicity of copper oxide nanoparticles to metabolic activity in the roots of rice[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(5): 1968-1973.
- [8] Reddy Pullagurala V L, Adisa I O, Rawat S, et al. ZnO nanoparticles increase photosynthetic pigments and decrease lipid peroxidation in soil grown cilantro (*Coriandrum sativum*) [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2018, 132: 120-127.
- [9] Gottschalk F, Sonderer T, Scholz R W, et al. Modeled environmental concentrations of engineered nanomaterials (TiO_2 , ZnO , Ag, CNT, fullerenes) for different regions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(24): 9216-9222.
- [10] Nel A, Xia T, Mädler L, et al. Toxic potential of materials at the nano-level[J]. *Science*, 2006, 311(5761): 622-627.
- [11] Tolaymat T, El Badawy A, Sequeira R, et al. An integrated science-based methodology to assess potential risks and implications of engineered nanomaterials[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 298: 270-281.
- [12] Reddy P V L, Hernandez-Viezcas J A, Peralta-Videa J R, et al. Les-

- sons learned: Are engineered nanomaterials toxic to terrestrial plants? [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 568: 470–479.
- [13] Raliya R, Tarafdar J C. ZnO nanoparticle biosynthesis and its effect on phosphorous-mobilizing enzyme secretion and gum contents in clusterbean (*Cyamopsis tetragonoloba* L.) [J]. *Agricultural Research*, 2013, 2(1): 48–57.
- [14] Xu J, Luo X, Wang Y, et al. Evaluation of zinc oxide nanoparticles on lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth and soil bacterial community [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(6): 6026–6235.
- [15] Zhang R C, Zhang H B, Tu C, et al. Phytotoxicity of ZnO nanoparticles and the released Zn(II) ion to corn (*Zea mays* L.) and cucumber (*Cucumis sativus* L.) during germination [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(14): 11109–11117.
- [16] Rao S, Shekhawat G S. Toxicity of ZnO engineered nanoparticles and evaluation of their effect on growth, metabolism and tissue specific accumulation in *Brassica juncea* [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2014, 2(1): 105–114.
- [17] Bandyopadhyay S, Plascencia-Villa G, Mukherjee A, et al. Comparative phytotoxicity of ZnO NPs, bulk ZnO, and ionic zinc onto the alfalfa plants symbiotically associated with *Sinorhizobium meliloti* in soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 515/516: 60–69.
- [18] 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 Chong, HUANG Juan, WANG Ning, et al. Impact of zinc oxide nanoparticles on seed germination of wetland plant [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2017, 47(2): 416–420.
- [19] Thuesombat P, Hannongbua S, Akasit S, et al. Effect of silver nanoparticles on rice (*Oryza sativa* L. cv. KDML 105) seed germination and seedling growth [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 104: 302–309.
- [20] Awasthi A, Bansal S, Jangir L K, et al. Effect of ZnO nanoparticles on germination of *Triticum aestivum* seeds [J]. *Macromolecular Symposia*, 2017, 376(1): 1700043.
- [21] Mousavi K S M, Lahouti M, Ganjeali A, et al. Comparative effects of ZnO nanoparticles, ZnO bulk particles, and Zn²⁺ on *Brassica napus* after long-term exposure: Changes in growth, biochemical compounds, antioxidant enzyme activities, and Zn bioaccumulation [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2015, 226(11): 364.
- [22] Wang P, Menzies N W, Lombi E, et al. Fate of ZnO nanoparticles in soils and cowpea (*Vigna unguiculata*) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(23): 13822–13830.
- [23] Chen H. Metal based nanoparticles in agricultural system: Behavior, transport, and interaction with plants [J]. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 2018, 30(1): 123–134.
- [24] Ma C X, White J C, Dhankher O P, et al. Metal-based nanotoxicity and detoxification pathways in higher plants [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(12): 7109–7122.
- [25] López-Moreno M L, De La Rosa G, Hernández-Viezcas J Á, et al. Evidence of the differential biotransformation and genotoxicity of ZnO and CeO₂ nanoparticles on soybean (*Glycine max*) plants [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(19): 7315–7320.
- [26] Lv J, Christie P, Zhang S. Uptake, translocation, and transformation of metal-based nanoparticles in plants: Recent advances and methodological challenges [J]. *Environmental Science: Nano*, 2019, 6(1): 41–59.
- [27] Wan J, Wang R, Wang R, et al. Comparative physiological and transcriptomic analyses reveal the toxic effects of ZnO nanoparticles on plant growth [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(8): 4235–4244.
- [28] Chen X, O' Halloran J, Jansen M A K. Time matters: The toxicity of zinc oxide nanoparticles to *Lemna minor* L. increases with exposure time [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2018, 229(3): 99.
- [29] Chen X, O' Halloran J, Jansen M A K. The toxicity of zinc oxide nanoparticles to *Lemna minor* (L.) is predominantly caused by dissolved Zn [J]. *Aquatic Toxicology*, 2016, 174: 46–53.
- [30] García-Gómez C, Obrador A, González D, et al. Comparative effect of ZnO NPs, ZnO bulk and ZnSO₄ in the antioxidant defences of two plant species growing in two agricultural soils under greenhouse conditions [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 589: 11–24.
- [31] Lin D, Xing B. Phytotoxicity of nanoparticles: Inhibition of seed germination and root growth [J]. *Environmental Pollution*, 2007, 150(2): 243–250.
- [32] Xiang L, Zhao H M, Li Y W, et al. Effects of the size and morphology of zinc oxide nanoparticles on the germination of Chinese cabbage seeds [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(14): 10452–10462.
- [33] Wang X, Yang X, Chen S, et al. Zinc oxide nanoparticles affect biomass accumulation and photosynthesis in *Arabidopsis* [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 6: 1243.
- [34] 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): 14963.
- [35] 赵玉红, 赵玉文, 郑雨, 等. 重金属胁迫下青藏高原芥菜型油菜种子发芽特征研究 [J]. 种子, 2018, 37(4): 11–16, 22. ZHANG Yu-hong, ZHAO Yu-wen, ZHENG Yu, et al. Study on seed germination characteristics of Qinghai-tibet Plateau *Brassica juncea* under heavy metal stress [J]. *Seed*, 2018, 37(4): 11–16, 22.
- [36] 梅丽娜, 袁庆华, 姚拓, 等. 不同品种苜蓿芽期对重金属镉的耐性研究 [J]. 作物杂志, 2010(2): 15–18. MEI Li-na, YUAN Qing-hua, YAO Tuo, et al. Cd tolerance of different varieties of alfalfa at germination stage [J]. *Crops*, 2010(2): 15–18.
- [37] 金彩霞, 刘建军, 鲍林林, 等. 磺胺间甲氧嘧啶-镉复合污染对作物种子发芽的影响 [J]. 中国环境科学, 2010, 30(6): 839–844. JIN Cai-xia, LIU Jun-jun, BAO Lin-lin, et al. Joint toxicity of sulfamonomethoxine and Cd on seed germination and root elongation of crops in soil [J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(6): 839–844.