



二氧化钛纳米颗粒对玉米幼苗吸收镉及其植物毒性的影响

郑泽其, 李剑涛, 吴佳妮, 连加攀, 史瑞滢, 刘维涛

引用本文:

郑泽其,李剑涛,吴佳妮,连加攀,史瑞滢,刘维涛. 二氧化钛纳米颗粒对玉米幼苗吸收镉及其植物毒性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(6): 1217-1224.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0535>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 72-78 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0099>

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>

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>

不同水分条件下多种Mn肥对水稻Cd累积的影响

梁源芳, 李晓清, 吴启堂, 陈杨梅, 高婷, 林贤柯, 卫泽斌

农业资源与环境学报. 2022, 39(4): 734-740 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0179>

不同性质土壤中铅的植物毒性及预测模型

高凡, 王学东, 罗小绒, 罗崇义, 彭憬

农业资源与环境学报. 2022, 39(4): 683-689 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0279>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

郑泽其, 李剑涛, 吴佳妮, 等. 二氧化钛纳米颗粒对玉米幼苗吸收镉及其植物毒性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(6): 1217–1224.

ZHENG Z Q, LI J T, WU J N, et al. Impact of titanium dioxide nanoparticles on cadmium uptake in maize seedlings and its phytotoxicity[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(6): 1217–1224.



开放科学 OSID

二氧化钛纳米颗粒对玉米幼苗吸收镉及其植物毒性的影响

郑泽其, 李剑涛, 吴佳妮, 连加攀, 史瑞滢, 刘维涛*

(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/天津市城市环境污染诊断与修复技术工程中心, 天津 300350)

摘要:为研究二氧化钛纳米颗粒(TiO_2 NPs)对镉(Cd)的植物毒性及吸收分布的影响,于2020年5—7月采用土壤盆栽试验,探究了不同浓度 TiO_2 NPs(0、50、200 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和Cd(0、2、10、50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)处理对玉米幼苗生长、叶绿素含量、抗氧化酶活性及Cd吸收的影响。结果表明:200 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ TiO_2 NPs的施用可显著($P<0.05$)提高50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd胁迫下玉米幼苗的干质量。在Cd浓度为50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,外源添加200 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ TiO_2 NPs可使玉米幼苗的叶绿素a和叶绿素b含量分别显著($P<0.05$)增加42.48%和35.55%。在Cd和 TiO_2 NPs的共同暴露下,随着 TiO_2 NPs浓度的增加,超氧化物歧化酶(SOD)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)、过氧化物酶(POD)的活性均逐渐增强。当Cd处理浓度为10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,添加50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ TiO_2 NPs显著提高了Cd的转运系数和Cd提取量。研究表明, TiO_2 NPs有望应用于强化植物修复土壤Cd污染。

关键词:纳米金属颗粒; 镉; 玉米; 植物毒性; 植物修复

中图分类号: X173; S513

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2022)06-1217-08

doi: 10.13254/j.jare.2021.0535

Impact of titanium dioxide nanoparticles on cadmium uptake in maize seedlings and its phytotoxicity

ZHENG Zeqi, LI Jiantao, WU Jiani, LIAN Jiapan, SHI Ruiying, LIU Weitao*

(Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria, Ministry of Education/Tianjin Engineering Center of Environmental Diagnosis and Contamination Remediation, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China)

Abstract: To study the effects of titanium dioxide nanoparticles (TiO_2 NPs) on plant toxicity, uptake, and distribution of cadmium (Cd), a pot-culture experiment was conducted from May to July 2020. The effects of different concentrations of TiO_2 NPs (0, 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and 200 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) and Cd (0, 2, 10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) on growth, chlorophyll content, antioxidant enzyme activity, and Cd uptake in maize seedlings were investigated. The results showed that the application of 200 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ TiO_2 NPs significantly ($P<0.05$) increased the dry weight of maize seedlings under 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd stress. When the Cd concentration was 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, the exogenous addition of 200 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ TiO_2 NPs significantly ($P<0.05$) enhanced chlorophyll a and b content by 42.48% and 35.55%, respectively. Under the co-exposure of Cd and TiO_2 NPs, with the increase in TiO_2 NPs concentration, the activities of SOD, APX, and POD gradually increased. When the concentration of Cd was 10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, treatment with 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ TiO_2 NPs significantly increased the translocation factor and the extraction amount of Cd. The results show that TiO_2 NPs could be used to enhance the phytoremediation of Cd-contaminated soil.

Keywords: metal nanoparticles; cadmium; maize; phytotoxicity; phytoremediation

收稿日期: 2021-08-18 录用日期: 2021-11-24

作者简介: 郑泽其(1998—),男,江苏南京人,硕士研究生,主要从事土壤修复治理研究。E-mail: zhengzq1998@163.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); 国家重点研发计划项目(2020YFC1808800)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41471411); The National Key R&D Program of China(2020YFC1808800)

土壤是农业生产和人类生存的重要物质基础,然而随着工农业的快速发展,农田土壤中的重金属污染日益严重^[1]。重金属镉(Cd)具有溶解度高、移动性强、半衰期长等特点,被认为是毒性最大的重金属之一^[2]。2014年发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,Cd的点位超标率高达7.0%,位居所调查的污染物之首,严重污染程度点位的比例高达0.5%^[3]。Cd能降低植物体内的光合色素,影响植物的细胞周期和分裂,甚至会导致植物染色体发生畸变^[4],并可通过食物链传递,对动物和人体的健康构成极大威胁^[5]。因此,土壤Cd污染的修复和治理迫在眉睫。

纳米颗粒(NPs)被定义为至少在一个维度上小于100 nm的颗粒,其具有比表面积大和表面能高等特点^[6]。其中,二氧化钛纳米颗粒(TiO₂ NPs)是应用最广泛的NPs之一,主要应用于食品添加剂、油漆、个人护理品、化妆品、太阳能电池、生物传感器等生产过程中^[7-8]。据报道,TiO₂ NPs的年生产量可达88 000 t,全球释放进入环境中的TiO₂ NPs超过纳米材料总量的1/4^[9],其中13.8%的TiO₂ NPs进入土壤环境^[10]。

目前,国内外众多学者已开展了TiO₂ NPs与植物的交互作用研究^[7]。TiO₂ NPs对植物的生长具有正面或负面效应,这取决于植物品种、暴露浓度、暴露途径和粒径大小^[11]。已有研究证实,随着TiO₂ NPs浓度的增加,烟草(*Nicotiana tabacum*)幼苗的生长和发育水平显著降低^[12]。TiO₂ NPs也会对萝卜(*Raphanus sativus*)根尖造成严重的DNA损伤^[13]。但亦有研究表明TiO₂ NPs显著提高菠菜(*Spinacia oleracea*)硝酸还原酶、谷氨酸脱氢酶、谷氨酰胺合成酶和谷氨酸-丙酮酸转氨酶的活性,促进菠菜的氮代谢^[14]。

近年来,利用NPs促进污染土壤植物修复的研究方兴未艾^[15]。NPs可以直接去除污染物,促进植物生长,提高污染物的植物有效性,从而在植物修复系统中发挥作用^[7-8]。TiO₂ NPs根暴露可以降低Cd在水稻(*Oryza sativa*)根和叶中的吸收、分布,降低Cd对水稻的毒性^[16]。本课题组前期的水培试验研究^[11]表明,TiO₂ NPs叶暴露可有效地缓解Cd对玉米(*Zea mays*)的毒性,降低Cd在玉米中的积累;而TiO₂ NPs根暴露则促进了玉米对Cd的吸收。然而,水培环境与真实土壤环境相差甚远,TiO₂ NPs根暴露是否可以有效促进玉米修复土壤中的Cd污染仍未可知。因此,在前期研究基础上,为进一步探究根部施用TiO₂ NPs强化玉米修复Cd污染土壤的可行性,本研究特开展了土壤盆栽试验,通过对玉米生长指标、生理生化特性、玉

米地上部和根系的Cd含量、整株Cd提取量以及Cd转运系数等进行分析,探讨不同浓度TiO₂ NPs在根部施用对玉米吸收和积累Cd及Cd毒性的影响。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本试验于2020年5—7月在南开大学津南校区环境科学与工程学院(38°59′15.49″N,117°19′53.08″E)开展。供试土样采自南开大学津南校区西北门附近绿地,土壤类型为棕壤,待土样自然风干后过2 mm筛以去除土壤中的杂质。土壤的基本理化性质:pH值7.51,有机质含量1.453%,总氮、总磷和总钾含量分别为1.355、1.180 g·kg⁻¹和1.025 g·kg⁻¹,有效磷含量120 mg·kg⁻¹,有效钾含量415.67 mg·kg⁻¹,阳离子交换量(CEC)13.86 cmol·kg⁻¹,Cd含量0.11 mg·kg⁻¹。

TiO₂ NPs(纯度:99.8%,5~10 nm,锐钛)购自上海迈瑞尔化学技术有限公司,TiO₂ NPs的平均粒径为(6.5±0.76) nm,比表面积为264.8 m²·g⁻¹。将添加于土样中的TiO₂ NPs超声振荡30 min,制备成TiO₂ NPs悬浮液,备用。供试作物为玉米(*Zea mays* L. cv ND488),购自天津市津南区种子公司。

1.2 试验方法

选取大小均匀、颗粒饱满的玉米种子浸泡于3%的H₂O₂溶液中消毒10 min。随后将玉米种子用蒸馏水淋洗3次,以去除种子表面残留的H₂O₂溶液。用蒸馏水将种子浸泡30 min,使种子膨胀软化。最后,将种子播种于装有1 kg过筛风干土的塑料盆中。每隔3 d定时定量浇水。在幼苗出齐后,进行第一次间苗;待幼苗长至3~4片真叶时,进行第二次间苗。最终,每盆保留5株幼苗(图1)。

试验共设12个处理,用不同浓度的CdCl₂·



图1 土培试验

Figure 1 Soil culture experiment

2.5H₂O和TiO₂ NPs染毒(表1),将其以溶液形式拌入1 kg土壤后装盆,平衡4周,每个处理3次重复。将玉米幼苗于温室(温度28℃,相对湿度50%~80%,光照强度2 300 lx)中培养一个月。其间,每日光照时间为8:00—19:00,共11 h。定期改变各个塑料盆的位置,从而排除环境差异引起的误差。土培试验处理组设计如表1所示。

表1 土培试验中Cd和TiO₂ NPs的浓度设置

Table 1 Concentrations of Cd and TiO₂ NPs in pot-culture experiment

TiO ₂ NPs/ (mg·kg ⁻¹)	Cd/(mg·kg ⁻¹)			
	0	2	10	50
0	CK	T1	T2	T3
50	T4	T5	T6	T7
200	T8	T9	T10	T11

1.3 测试方法

生长指标测定:培养结束时测定玉米的株高和根长;将玉米于103℃烘箱内烘干至恒质量后,分别用电子天平称量各组幼苗的鲜质量和干质量。

叶绿素提取与测定:参照李得孝等^[17]的方法,幼苗生长至2~3叶期剪取叶片并剪成2 mm碎条,一半装入塑料袋放于冰箱中冷冻,另一半在室温下称取0.2 g植物鲜样,用研磨法(80%丙酮与95%乙醇)和直接浸提法(6种提取液)提取叶绿素。每种方法设3个重复,每次重复取样200 mg左右。样品研磨后用滤纸过滤(洗涤定容25 mL),在645 nm和663 nm波长下测定吸光值。浸提法在黑暗中进行,并不时摇动,约14 h后定容测定吸光值,放置4 h后再测定一次吸光值。

抗氧化酶液提取与测定^[18]:称取0.1 g植物新鲜叶片,加4 mL预冷的100 mmol·L⁻¹ PBS缓冲液[pH 7.0,含0.1 mmol·L⁻¹ EDTA和1% (m/V) PVP],冰浴研磨。匀浆液于4℃、15 000 g下离心15 min。所得上清液即为待测酶的粗提液。丙二醛(MDA)的测定采用硫代巴比妥酸(TBA)法,超氧化物歧化酶(SOD)的测定采用氮蓝四唑(NBT)法,抗坏血酸过氧化物酶(APX)的测定采用抗坏血酸氧化反应法,过氧化物酶(POD)的测定采用愈创木酚法。

参照LIU等^[4-5]的方法,将干燥的植物样品磨成粉末,过0.149 mm孔径筛。植物粉末(0.50 g)用含有87%浓缩HNO₃和13%浓缩HClO₄(V/V)的12 mL溶液在微波消解仪(SINEO MDS-6G)中消解。采用原

子吸收分光光度计(AAS, Hitachi 180-80)测定消解液中Cd含量。

Cd提取量是衡量TiO₂ NPs强化植物修复Cd污染的重要指标^[4],计算公式如下:

$$\text{Cd提取量}(\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}) = C_{\text{Cd}} \times m_{\text{DW}} \quad (1)$$

式中: C_{Cd} 为玉米中Cd的含量,mg·kg⁻¹(以干质量计); m_{DW} 为每株玉米的干质量,g·株⁻¹。

转运系数(Translocation factor, TF)可用于评估植物将重金属从根部转移至地上部的能力^[2],是指植物地上部Cd含量与地下部Cd含量的比值,计算公式如下:

$$TF = \frac{C_{\text{shoot}}}{C_{\text{root}}} \quad (2)$$

式中: C_{shoot} 和 C_{root} 分别为玉米地上部和根部的Cd含量。

1.4 数据分析

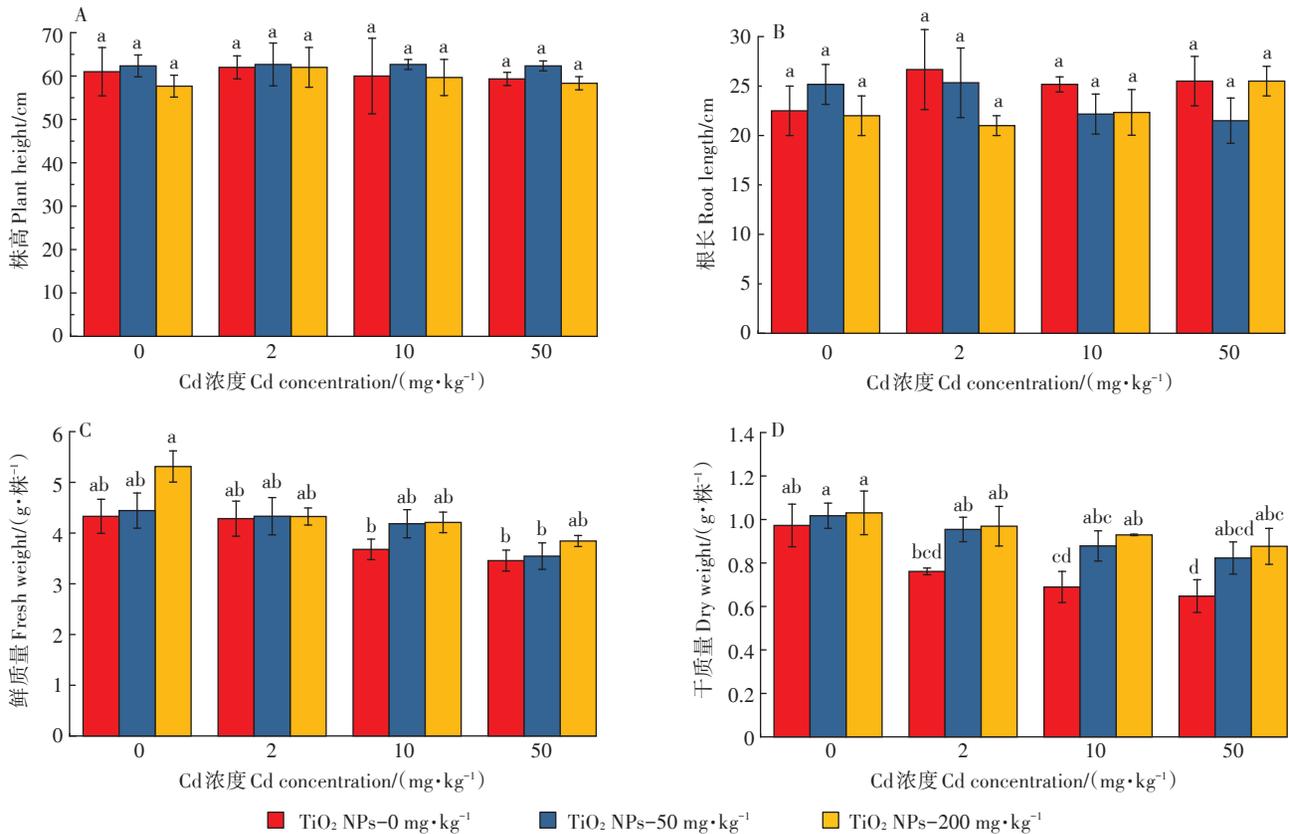
所有数据均重复检测3次,采用Microsoft Excel 2010和SPSS 16.0对测得数据进行计算、处理与统计分析,利用LSD(Least significant difference)对数据进行显著性检验,并用Origin 9.0制图。

2 结果与分析

2.1 添加TiO₂ NPs和Cd对玉米生长的影响

与对照(CK)相比,单一TiO₂ NPs或Cd处理,亦或二者联合处理对玉米的株高(图2A)和根长(图2B)均无显著影响($P>0.05$)。TiO₂ NPs单一处理对玉米的鲜质量(图2C)和干质量(图2D)也无显著影响($P>0.05$)。当TiO₂ NPs处理浓度为200 mg·kg⁻¹时,相比于对照组,玉米幼苗的鲜质量升高了22.61%(图2C)。Cd胁迫对玉米幼苗的生物量具有一定的抑制作用。Cd单一暴露条件下,随着Cd浓度的升高,玉米幼苗的鲜质量降低,在Cd最高浓度(50 mg·kg⁻¹)时,鲜质量降低了20.35%(图2C)。与鲜质量类似,玉米幼苗干质量随着Cd浓度的增加而降低,当Cd暴露浓度为10 mg·kg⁻¹和50 mg·kg⁻¹时,玉米幼苗干质量分别显著($P<0.05$)降低了29.14%和33.42%(图2D)。

TiO₂ NPs的施用在一定程度上降低了Cd对玉米的植物毒性,主要表现在TiO₂ NPs对Cd胁迫引起的玉米幼苗生物量的降低具有缓解作用。当Cd胁迫浓度为10 mg·kg⁻¹时,施用50 mg·kg⁻¹和200 mg·kg⁻¹的TiO₂ NPs可使玉米幼苗干质量明显增加27.40%和34.77%;当Cd胁迫浓度为50 mg·kg⁻¹,施用TiO₂ NPs浓度为50 mg·kg⁻¹和200 mg·kg⁻¹时,玉米幼苗的干质量分别增加了27.09%和35.34%(图2D),表明施用



不同小写字母表示各处理在 $P < 0.05$ 水平差异显著。下同
 Different lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$ level. The same below

图2 不同处理玉米的株高(A)、根长(B)、鲜质量(C)和干质量(D)

Figure 2 Plant height(A), root length(B), fresh weight(C) and dry weight(D) of maize under different treatments

TiO₂ NPs对玉米幼苗的鲜质量和干质量具有一定的提升作用。

2.2 TiO₂ NPs和Cd对玉米叶绿素含量的影响

Cd胁迫对玉米幼苗的叶绿素造成破坏,降低了叶绿素的含量,影响植物进行光合作用。单一Cd暴露情况下,随着Cd浓度的增加,叶绿素a(图3A)和叶绿素b(图3B)的含量均随之降低。当Cd的浓度为50 mg·kg⁻¹时,相比于对照组,玉米幼苗的叶绿素a和叶绿素b含量分别显著($P < 0.05$)下降36.64%和32.72%。而单一TiO₂ NPs添加时,玉米幼苗的叶绿素含量均高于对照组。当TiO₂ NPs的浓度为200 mg·kg⁻¹时,相比于对照组,玉米幼苗的叶绿素a含量显著($P < 0.05$)增加了18.40%,而叶绿素b含量增加了9.46%。此外,在TiO₂ NPs和Cd联合暴露情况下,Cd浓度为2 mg·kg⁻¹时,外源添加200 mg·kg⁻¹ TiO₂ NPs使玉米幼苗的叶绿素a和叶绿素b含量分别增加7.88%和12.14%。在Cd浓度为50 mg·kg⁻¹时,外源添加200 mg·kg⁻¹ TiO₂ NPs可使玉米幼苗的叶绿素a和叶绿素b

含量分别显著($P < 0.05$)增加42.48%和35.55%。由此可见,TiO₂ NPs可促进玉米幼苗叶绿素的形成,提高其光合作用效率。

2.3 TiO₂ NPs对Cd胁迫下玉米氧化损伤和抗氧化酶活性的影响

Cd可以通过干扰PS I和PS II途径中的电子传递链、置换酶类物质的活性中心、破坏细胞内氧化还原平衡等,导致活性氧的产生^[19]。过量的活性氧积累会引起细胞膜脂质过氧化,对植物造成过氧化损伤。MDA是脂质过氧化过程的主要终产物之一,通常利用它作为脂质过氧化指标^[20]。如图4A所示,Cd胁迫下玉米幼苗的MDA含量升高。当Cd的浓度为50 mg·kg⁻¹时,相比于对照组,玉米幼苗的MDA含量显著($P < 0.05$)升高了112.72%。类似地,在单施TiO₂ NPs处理中随着TiO₂ NPs浓度的升高,玉米幼苗的MDA含量也逐渐上升,但变化不显著。在共同添加Cd和TiO₂ NPs的处理组中,玉米幼苗的MDA含量均随着TiO₂ NPs浓度的增加而下降。当

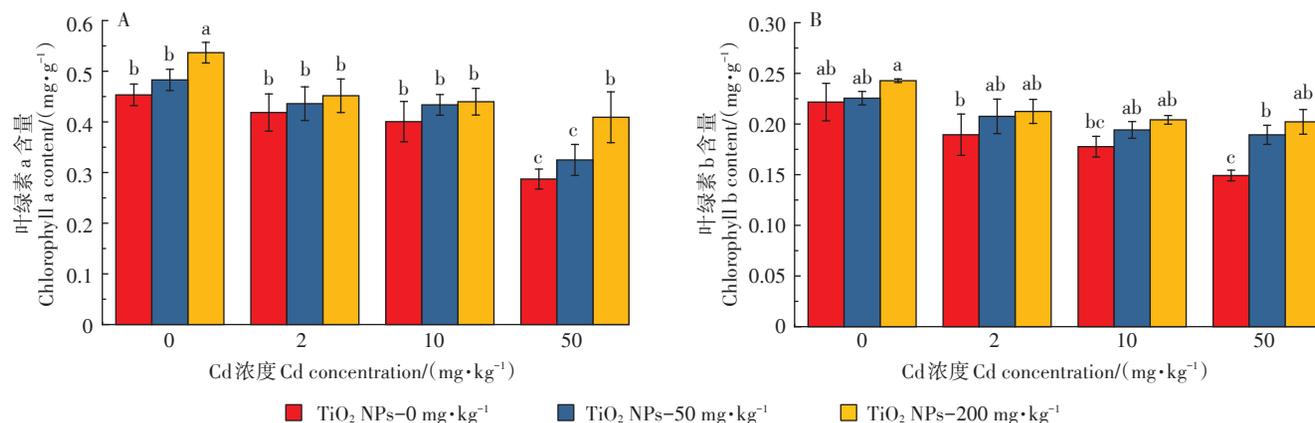


图3 不同处理玉米叶绿素 a(A)和叶绿素 b(B)的含量

Figure 3 Contents of chlorophyll a(A) and chlorophyll b(B) in maize under different treatments

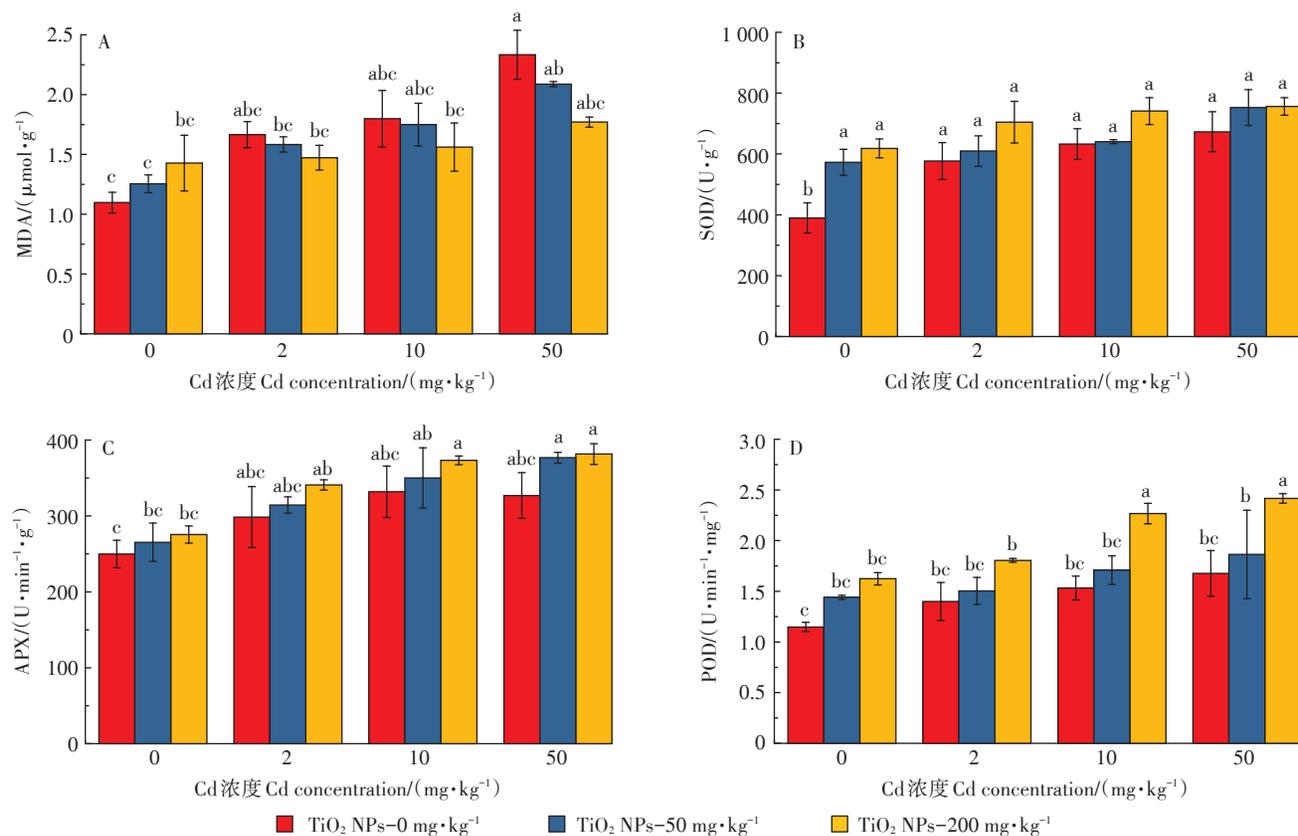


图4 不同处理玉米幼苗的MDA含量(A)以及SOD(B)、APX(C)、POD(D)活性

Figure 4 MDA contents(A) and SOD(B), APX(C), POD(D) activities of maize seedlings under different treatments

Cd 浓度为 50 mg·kg⁻¹ 时, 添加 50 mg·kg⁻¹ 和 200 mg·kg⁻¹ TiO₂ NPs 的玉米幼苗 MDA 含量分别下降了 10.52%、24.15%。

与对照组相比, Cd 胁迫下三种抗氧化酶的活性均增强, 10 mg·kg⁻¹ 和 50 mg·kg⁻¹ Cd 胁迫分别使玉米幼苗的 SOD 活性显著提高了 62.25%、72.65% (图 4B); 10 mg·kg⁻¹ Cd 处理使 APX 的活性提高了 32.46%

(图 4C); 50 mg·kg⁻¹ Cd 胁迫使 POD 的活性提高了 46.02% (图 4D)。TiO₂ NPs 的添加在一定程度上可以提高玉米 SOD、APX、POD 的活性。在 Cd 和 TiO₂ NPs 共同暴露下, 随着 TiO₂ NPs 浓度的增加, SOD、APX、POD 的活性均逐渐增强, 但 TiO₂ NPs 对 Cd 胁迫下玉米幼苗的 SOD 和 APX 活性的影响不显著。当 Cd 浓度分别为 10 mg·kg⁻¹ 和 50 mg·kg⁻¹ 时, 200 mg·kg⁻¹

TiO₂ NPs处理导致玉米幼苗的POD活性分别显著($P < 0.05$)提高了47.91%和44.23%。

2.4 TiO₂ NPs对玉米吸收和转运Cd的影响

玉米幼苗对重金属Cd的吸收是一个复杂的过程,Cd先通过植物根系组织的质膜横向运输,再由木质部运输到地上部^[21]。如图5所示,随着Cd浓度的增加,玉米幼苗的地上部、根部Cd含量以及Cd提取量均逐渐增加。当Cd的浓度为50 mg·kg⁻¹时,玉米幼苗地上部、根部Cd含量以及Cd提取量分别为Cd浓度2 mg·kg⁻¹时的5.17、11.00、5.43倍。当Cd的浓度从2 mg·kg⁻¹上升到50 mg·kg⁻¹时,玉米幼苗的转运系数显著下降了40.84%(图5C)。

当土壤中Cd浓度为10 mg·kg⁻¹时,外源施用TiO₂ NPs提升了玉米地上部(图5A)和根部(图5B)Cd含量。尤其是当土壤Cd为10 mg·kg⁻¹时,50 mg·kg⁻¹ TiO₂ NPs显著($P < 0.05$)提高了地上部Cd含量。TiO₂ NPs可促进Cd在玉米幼苗中的转运以及玉米对Cd的提取。当Cd处理浓度为10 mg·kg⁻¹时,50 mg·kg⁻¹ TiO₂ NPs处理显著($P < 0.05$)提高了Cd的转运系数(图5C)和提取量(图5D)。

3 讨论

研究表明,植物受重金属Cd毒害的主要症状表现为植株矮小、发育迟缓、萎蔫枯黄^[2,4-5]。本研究发现与单一Cd胁迫相比,加入TiO₂ NPs在一定程度上减少了Cd对玉米的氧化损伤,提升了玉米干质量、鲜质量、叶绿素含量及抗氧化酶活性,表明TiO₂ NPs的施用可缓解Cd对玉米植株的毒害作用。SINGH等^[22]也发现,Cd(50、100、150 mg·kg⁻¹)暴露降低了大豆(*Glycine max*)的干质量和鲜质量,而TiO₂ NPs的施用提高了大豆的生物量,缓解了Cd对大豆的植物毒性。GONG等^[23]的研究也表明,500 mg·kg⁻¹多层碳纳米管(MWCNTs)处理促进了苧麻(*Boehmeria nivea*)幼苗生长,缓解了Cd的植物毒性。

TiO₂ NPs的暴露途径可对Cd的植物毒性及其在植物中的吸收产生影响。本课题组前期的水培试验表明,TiO₂ NPs的叶面暴露可以有效地缓解Cd对玉米的毒性,降低Cd在玉米中的积累,但根暴露却促进了玉米对Cd的吸收^[11]。本研究进一步证实,在土培条件下,TiO₂ NPs根暴露可促进玉米植株对Cd吸收,

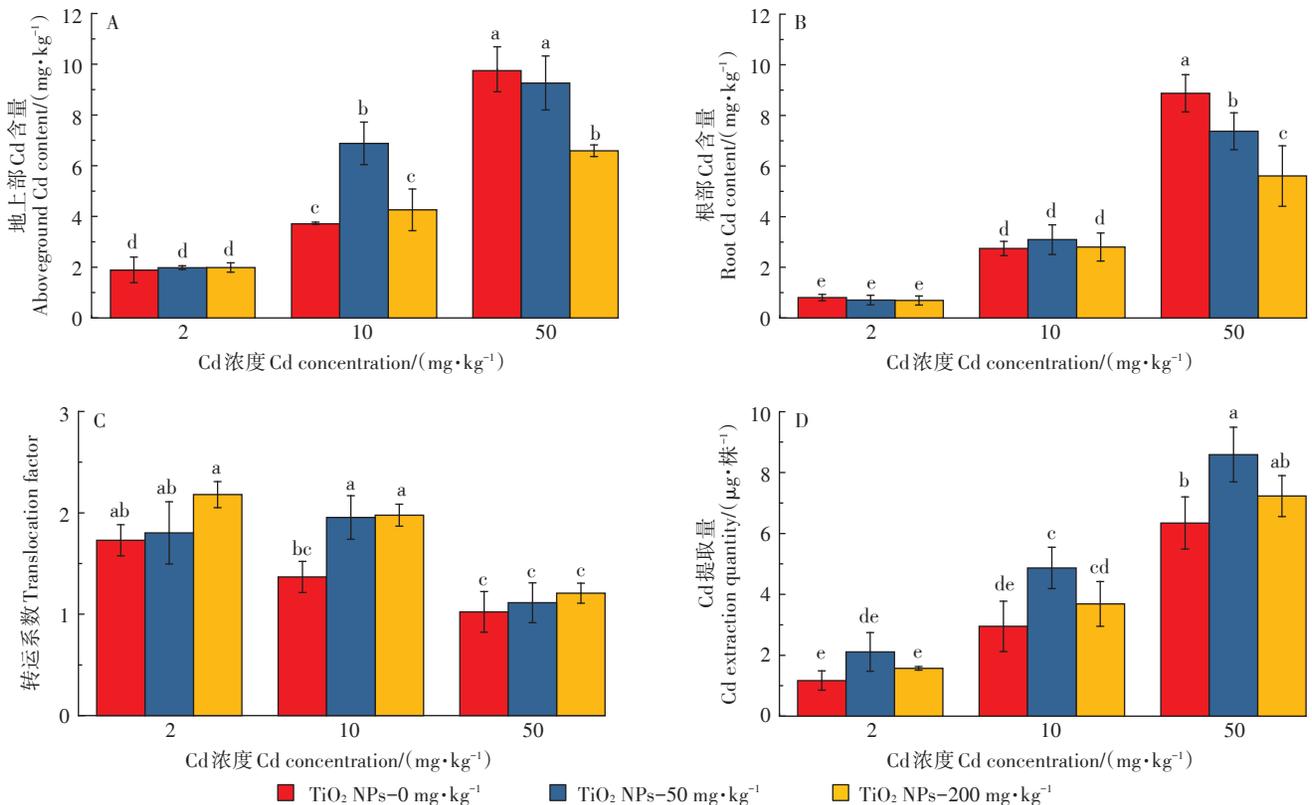


图5 不同处理玉米幼苗地上部(A)、根部(B)Cd含量以及Cd的转运系数(C)和提取量(D)

Figure 5 Cd content in shoots(A) and roots(B), translocation factor(C) and Cd extraction quantity(D) of maize seedlings under different treatments

并显著提高了玉米幼苗的叶绿素含量。类似地, SINGH等^[22]研究证实TiO₂ NPs通过提高植物的光合速率和生长参数来抑制Cd毒性。RALIYA等^[24]和SERVIN等^[25]也发现,TiO₂ NPs处理可以提高西红柿(*Solanum lycopersicum*)和黄瓜(*Cucumis sativus*)的叶绿素含量。此外,JI等^[26]的研究表明TiO₂ NPs提高了Cd胁迫下水稻的净光合速率和叶绿素含量。

抗氧化酶体系是植物细胞本身具有的抵御氧化损伤的系统,植物受到重金属胁迫时,抗氧化酶系统响应是其重要的耐性机制^[19]。在逆境条件下,抗氧化酶的活性会增强,以清除细胞中积累的活性氧,维持组织中的氧化还原平衡^[27]。超氧化物歧化酶(SOD)能清除超氧阴离子自由基,通过歧化反应将O₂^{•-}转化为H₂O₂和O₂,产生的H₂O₂可进一步在过氧化物酶(POD)的催化下降解为完全无毒害的H₂O^[28]。抗坏血酸过氧化物酶(APX)既是利用抗坏血酸(AsA)作为电子供体的H₂O₂清除酶,又是维生素C代谢的主要酶类。本研究中SOD、APX、POD三种抗氧化酶的活性变化趋势基本一致,其与MDA的含量变化相一致。这可能是由于TiO₂ NPs通过改善抗氧化酶的活性来抑制玉米幼苗内活性氧的积累,使得MDA的含量下降,减轻Cd对玉米幼苗的毒害作用。TiO₂ NPs能在一定程度上缓解Cd胁迫对玉米幼苗造成的氧化损伤。这与JI等^[26]对水稻幼苗中MDA含量变化的研究结果一致。类似地研究也发现,TiO₂ NPs能提高油菜(*Brassica napus*)^[29]、西红柿(*Lycopersicon esculentum*)^[30]和菠菜(*Spinacia oleracea*)^[31]的光合作用参数和抗氧化系统活性。

本研究发现随着Cd胁迫浓度逐渐提高,玉米幼苗的地上部、根部Cd含量以及Cd提取量均逐渐增加。SHAH等^[32]也发现水稻幼苗的地上部与根部Cd含量随着Cd浓度的增加而增加。整体而言,转运系数随着Cd浓度的增加呈现下降的趋势,这与本课题组之前的研究结果^[2,5,33]一致。外源施用TiO₂ NPs影响植物吸收Cd的可能机理是:TiO₂ NPs能提高叶绿体类囊体膜上Mg²⁺-ATPase的活性^[34],根系释放质子的通道则随着质膜H⁺-ATPase的激活而被激活,植物根系开始分泌质子并在根际形成酸性条件,从而增加了土壤Cd的植物有效性^[35]。此外,TiO₂ NPs易形成团聚体并吸附土壤中的重金属,从而降低了土壤中重金属的植物有效性,可能也是TiO₂ NPs抑制植物吸收重金属和缓解重金属植物毒性的机理之一^[36]。本研究还发现,尽管高Cd(50 mg·kg⁻¹)处理下,TiO₂ NPs的外

源施用降低了地上部和根部的Cd含量,但玉米幼苗的Cd提取量却有所增加(图5D),可能是由于TiO₂ NPs的施用提高了玉米幼苗的生物量(图2C和图2D)。

4 结论

(1)Cd对玉米的植物毒性体现在其抑制玉米幼苗的生物量、降低叶片的叶绿素含量、诱导脂质过氧化损伤。

(2)TiO₂ NPs的施用可缓解Cd对玉米的植物毒性,其可能的机理是TiO₂ NPs激活了玉米的抗氧化酶体系,提升了叶片的叶绿素含量,进而提高了玉米的生物量。

(3)当土壤Cd浓度为10 mg·kg⁻¹时,外源添加TiO₂ NPs可显著提高玉米地上部Cd含量、转运系数以及Cd提取量,表明TiO₂ NPs可用于强化植物修复土壤Cd污染。

参考文献:

- [1] LIANG L C, LIU W T, SUN Y B, et al. Phytoremediation of heavy metal contaminated saline soils using halophytes: Current progress and future perspectives[J]. *Environmental Reviews*, 2017, 25(3): 269-281.
- [2] LIU W T, ZHOU Q X, AN J, et al. Variations in cadmium accumulation among Chinese cabbage cultivars and screening for Cd-safe cultivars [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 173(1/2/3): 737-743.
- [3] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等. 《全国土壤污染状况调查公报》探析 [J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(9): 1689-1692. CHEN N C, ZHENG Y J, HE X F, et al. Analysis of the bulletin of national soil pollution survey[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9): 1689-1692.
- [4] LIU W T, ZHOU Q X, ZHANG Z N, et al. Evaluation of cadmium phytoremediation potential in Chinese cabbage cultivars[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(15): 8324-8330.
- [5] LIU W T, LIANG L C, ZHANG X, et al. Cultivar variations in cadmium and lead accumulation and distribution among 30 wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(11): 8432-8441.
- [6] 林茂宏, 沈玖玖, 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.
- [7] LIU W, ZEB A, LIAN J P, 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(3): 294-310.
- [8] ZEB A, LIU W T, WU J N, et al. Knowledge domain and emerging trends in nanoparticles and plants interaction research: A scientometric

- analysis[J]. *NanoImpact*, 2021, 21:100278.
- [9] KELLER A A, LAZAREVA A. Predicted releases of engineered nanomaterials: From global to regional to local[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2014, 1(1):65–70.
- [10] TAN W, PERALTA-VIDEA J R, GARDEA-TORRESDEY J L. Interaction of titanium dioxide nanoparticles with soil components and plants: Current knowledge and future research needs: A critical review [J]. *Environmental Science: Nano*, 2018, 5(2):257–278.
- [11] LIAN J P, ZHAO L F, WU J N, et al. Foliar spray of TiO₂ nanoparticles prevails over root application in reducing Cd accumulation and mitigating Cd-induced phytotoxicity in maize (*Zea mays* L.) [J]. *Chemosphere*, 2020, 239:124794.
- [12] FRAZIER T P, BURKLEW C E, ZHANG B. Titanium dioxide nanoparticles affect the growth and microRNA expression of tobacco (*Nicotiana tabacum*) [J]. *Functional & Integrative Genomics*, 2014, 14(1):75–83.
- [13] JIANG L, ZHANG Q, WANG J, et al. Ecotoxicological effects of titanium dioxide nanoparticles and galaxolide, separately and as binary mixtures, in radish (*Raphanus sativus*) [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 294:112972.
- [14] YANG F, HONG F, YOU W, et al. Influence of nano-anatase TiO₂ on the nitrogen metabolism of growing spinach[J]. *Biological Trace Element Research*, 2006, 110(2):179–190.
- [15] SONG B, XU P, CHEN M, et al. Using nanomaterials to facilitate the phytoremediation of contaminated soil[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2019, 49(9):791–824.
- [16] GONG X, HUANG D, LIU Y, et al. Remediation of contaminated soils by biotechnology with nanomaterials: Bio-behavior, applications, and perspectives[J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2018, 38(3):455–468.
- [17] 李得孝, 郭月霞, 员海燕, 等. 玉米叶绿素含量测定方法研究[J]. *中国农学通报*, 2005(6):153–155. LI D X, GUO Y X, YUAN H Y, et al. Determined methods of chlorophyll from maize[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005(6):153–155.
- [18] LIAN J P, LIU W T, MENG L Z, et al. Foliar-applied polystyrene nanoparticles (PSNPs) reduce the growth and nutritional quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.) [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 280:116978.
- [19] LIU W T, ZHANG X, LIANG L C, et al. Phytochelatin and oxidative stress under heavy metal stress tolerance in plants[M]//GUPTA D K, PALMA J M, CORPAS F J. Reactive oxygen species and oxidative damage in plants under stress. Berlin: Springer International Publishing, 2015:191–217.
- [20] ZEB A, LIU W T, MENG L Z, et al. Effects of polyester microfibers (PMFs) and cadmium on lettuce (*Lactuca sativa*) and the rhizospheric microbial communities: A study involving physio-biochemical properties and metabolomic profiles[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 424(Part C):127405.
- [21] ZHAO L F, LIU W T, LIAN J P, et al. Effects of electric fields on Cd accumulation and photosynthesis in *Zea mays* seedlings[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 276:111328.
- [22] SINGH J, LEE B K. Influence of nano-TiO₂ particles on the bioaccumulation of Cd in soybean plants (*Glycine max*): A possible mechanism for the removal of Cd from the contaminated soil[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 170:88–96.
- [23] GONG X, HUANG D, LIU Y, et al. Roles of multiwall carbon nanotubes in phytoremediation: Cadmium uptake and oxidative burst in *Boehmeria nivea* (L.) Gaudich[J]. *Environmental Science: Nano*, 2019, 6(3):851–862.
- [24] RALIYA R, NAIR R, CHAVALMANE S, et al. Mechanistic evaluation of translocation and physiological impact of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles on the tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plant[J]. *Metallomics*, 2015, 7(12):1584–1594.
- [25] SERVIN A D, MORALES M I, CASTILLO-MICHEL H, et al. Synchrotron verification of TiO₂ accumulation in cucumber fruit: A possible pathway of TiO₂ nanoparticle transfer from soil into the food chain[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(20):11592–11598.
- [26] JI Y, ZHOU Y, MA C, et al. Jointed toxicity of TiO₂ NPs and Cd to rice seedlings: NPs alleviated Cd toxicity and Cd promoted NPs uptake[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2017, 110:82–93.
- [27] LIAN J P, WU J N, ZEB A, et al. Do polystyrene nanoplastics affect the toxicity of cadmium to wheat (*Triticum aestivum* L.)? [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 263:114498.
- [28] GILL S S, TUTEJA N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2010, 48(12):909–930.
- [29] LI J, NAEEM M S, WANG X, et al. Nano-TiO₂ is not phytotoxic as revealed by the oilseed rape growth and photosynthetic apparatus ultrastructural response[J]. *PLoS ONE*, 2015, 10(12):e0143885.
- [30] SONG U, JUN H, WALDMAN B, et al. Functional analyses of nanoparticle toxicity: A comparative study of the effects of TiO₂ and Ag on tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, 93:60–67.
- [31] YANG F, LIU C, GAO F, et al. The improvement of spinach growth by nano-anatase TiO₂ treatment is related to nitrogen photoreduction[J]. *Biological Trace Element Research*, 2007, 119(1):77–88.
- [32] SHAH K, KUMAR R G, VERMA S, et al. Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings[J]. *Plant Science*, 2001, 161(6):1135–1144.
- [33] LIU W T, ZHOU Q X, SUN Y B, et al. Identification of Chinese cabbage genotypes with low cadmium accumulation for food safety[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(6):1961–1967.
- [34] HONG F, ZHOU J, LIU C, et al. Effect of nano-TiO₂ on photochemical reaction of chloroplasts of spinach[J]. *Biological Trace Element Research*, 2005, 105(1):269–279.
- [35] YANG X, FENG Y, HE Z, et al. Molecular mechanisms of heavy metal hyperaccumulation and phytoremediation[J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2005, 18(4):339–353.
- [36] WU X, HU J, WU F, et al. Application of TiO₂ nanoparticles to reduce bioaccumulation of arsenic in rice seedlings (*Oryza sativa* L.): A mechanistic study[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 405:124047.