

引用格式:

申林冲, 杨惠情, 郭子成, 田浩文, 李雪儿, 余常水, 苏敏敏, 张宇乐, 何冠谿. 纳米ZnO对‘遵辣1号’积累Cd的阻控作用及机制[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2026, 52(2): 94–101.

SHEN L C, YANG H Q, GUO Z C, TIAN H W, LI X E, YU C S, SU M M, ZHANG Y L, HE G D. Inhibitory effect and mechanism of nano-ZnO on the accumulation of Cd in ‘Zunla No. 1’[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2026, 52(2): 94–101.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



纳米ZnO对‘遵辣1号’积累Cd的阻控作用及机制

申林冲¹, 杨惠情¹, 郭子成¹, 田浩文¹, 李雪儿¹, 余常水², 苏敏敏¹, 张宇乐¹, 何冠谿^{1*}

(1. 贵州大学农学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 遵义市农业科学研究院, 贵州 遵义 563100)

摘要: 以‘遵辣1号’为材料, 通过毒理学试验评估Cd对其幼苗生长的影响及Cd胁迫下纳米氧化锌(ZnO-NPs)对其种子发芽率的影响, 同时结合土培试验探究不同施加量(0、20、50、100 mg/kg)的ZnO-NPs对土壤Cd钝化及辣椒Cd积累的影响。结果表明: 与不施加ZnO-NPs的处理相比, 10 mg/L Cd胁迫下施加ZnO-NPs后第7天, 20、50、100 mg/L ZnO-NPs处理使‘遵辣1号’种子发芽率分别提高了46.67、46.67和33.34个百分点; 10 mg/kg Cd胁迫下施加50 mg/kg ZnO-NPs, ‘遵辣1号’叶片的叶绿素a、叶绿素b质量分数分别显著提高了33.61%、227.27%, 净光合速率显著提高了41.13%, 气孔导度显著增加了59.76 mmol/(m²·s), 蒸腾速率显著提高了2.28倍, 胞间CO₂浓度显著降低了214.30 μmol/mol, 超氧化物歧化酶、过氧化物酶活性分别显著增加了170.28、853.60 U/g, 植株抗逆性增强。‘遵辣1号’根、叶、茎、果实中的Cd质量分数依次降低, 施加50 mg/kg ZnO-NPs对果实Cd积累的阻控效果最佳, 与不施加ZnO-NPs的处理相比, 果实、茎、叶中Cd质量分数分别显著降低了44.50%、47.35%、38.99%。施加20 mg/kg ZnO-NPs处理时, 土壤Cd的钝化效果最佳, 钝化率为18.02%, 有效Cd质量分数降低了0.51 mg/kg。综上可知, 10 mg/kg Cd胁迫下, 施用50 mg/kg ZnO-NPs可提升‘遵辣1号’的抗逆性, 减少Cd积累和毒害, 降低土壤Cd生物活性。

关键词: ‘遵辣1号’; 朝天椒; 纳米氧化锌(ZnO-NPs); Cd积累; 土壤Cd钝化; 光合指标

中图分类号: S641.3; X173

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2026)02-0094-08

Inhibitory effect and mechanism of nano-ZnO on the accumulation of Cd in ‘Zunla No. 1’

SHEN Linchong¹, YANG Huiqing¹, GUO Zicheng¹, TIAN Haowen¹, LI Xueer¹,

YU Changshui², SU Minmin¹, ZHANG Yule¹, HE Guandi^{1*}

(1. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China;

2. Zunyi Agricultural Science and Technology Research Institute, Zunyi, Guizhou 563100, China)

Abstract: ‘Zunla No. 1’ was employed as the test material. Toxicological experiments were conducted to evaluate the effects of Cd on seedling growth and zinc oxide nanoparticles(ZnO-NPs) on seed germination rate under Cd stress, while soil pot trials were carried out to examine the impacts of varying ZnO-NPs application rates(0, 20, 50, 100 mg/kg) on soil Cd passivation and Cd accumulation in pepper plants. The results showed that, compared with the treatment without ZnO-NPs application, under 10 mg/L Cd stress, the application of ZnO-NPs on day 7 increased the seed germination rate of ‘Zunla No. 1’ by 46.67, 46.67, and 33.34 percentage points for the 20, 50, and 100 mg/L ZnO-NPs treatments, respectively. Under 10 mg/kg Cd stress, the application of 50 mg/kg ZnO-NPs significantly increased the mass fractions of chlorophyll a and chlorophyll b in the leaves of ‘Zunla No. 1’ by 33.61% and 227.27%, respectively; the net photosynthetic rate significantly increased by 41.13%; the stomatal conductance significantly increased by 59.76 mmol/(m²·s); the

收稿日期: 2025-04-08

修回日期: 2025-05-21

基金项目: 国家重点专项部省联动项目(2022YFD1901505)

作者简介: 申林冲(1997—), 男, 贵州遵义人, 硕士研究生, 主要从事资源利用与植物保护研究, gs.lcshen23@gzu.edu.cn; *通信作者, 何冠谿, 博士, 副教授, 主要从事产地环境安全与农业资源再生利用研究, gdhe@gzu.edu.cn

transpiration rate significantly increased by 2.28 times; the intercellular CO_2 concentration significantly decreased by $214.30 \mu\text{mol/mol}$; the activities of superoxide dismutase and peroxidase increased significantly by 170.28 U/g and 853.60 U/g , respectively, indicating enhanced plant stress resistance. The Cd mass fractions in the roots, leaves, stems, and fruits of ‘Zunla No. 1’ decreased sequentially. The application of 50 mg/kg ZnO-NPs exhibited the best inhibitory effect on Cd accumulation in fruits, significantly reducing Cd mass fractions in fruits, stems, and leaves by 44.50%, 47.35%, and 38.99%, respectively, compared with the treatment without ZnO-NPs application. The application of 20 mg/kg ZnO-NPs achieved the best soil Cd immobilization effect, with an immobilization rate of 18.02% and a reduction of 0.51 mg/kg in available Cd mass fraction. In summary, under 10 mg/kg Cd stress, application of ZnO-NPs at 50 mg/kg enhanced the stress tolerance of ‘Zunla No. 1’, reduced Cd accumulation and toxicity, and decreased soil Cd bioavailability.

Keywords: ‘Zunla No. 1’; facing-heaven pepper; zinc oxide nanoparticles(ZnO-NPs); Cd accumulation; soil Cd immobilization; photosynthetic parameters

作为我国广泛栽培的辣椒品种，贵州的朝天椒 (*Capsicum annuum* var. *conoides*) 种植规模大、产业化程度较高，在全国辣椒生产与加工体系中占重要地位^[1-2]。贵州拥有悠久的朝天椒种植历史与多样的地理环境，为辣椒生长提供了优良的生态条件，培育出众多地方特色品种，并推动区域辣椒栽培模式由粗放式扩张向优质、高产、高效的目标体系转型^[3]。朝天椒的质量和安全性直接关系到其经济效益，有研究^[4]表明，该作物对镉(Cd)具有较强的富集能力。在含Cd土壤环境中，朝天椒易吸收并积累Cd元素^[5]，人体长期摄入Cd污染食品会导致肾功能损伤、骨质疏松等疾病，甚至增加癌症发生率和表观遗传突变风险^[6]。当前土壤Cd污染已成为全球性环境难题，特别是在辣椒等重金属富集作物种植区，土壤Cd污染治理对阻断污染物向食物链迁移、保障农产品安全具有特殊意义^[7]。

贵州省作为我国典型高Cd地质背景区，其土壤Cd天然本底值较高^[8]。在该特殊的生态压力下，锌(Zn)元素兼具参与植物基础代谢、拮抗重金属毒性的双重作用，常被用于Cd毒害缓解相关研究^[9]。研究^[10]表明，锌不仅能通过激活碳酸酐酶等关键酶类调控碳水化合物与核酸代谢，还可通过促进细胞分化修复重金属损伤的叶绿体结构，从而维持光合系统稳定性。这为利用锌基材料治理镉污染提供了理论依据。近年来，纳米氧化锌(ZnO-NPs)在重金属污染治理中的应用研究取得了显著进展，该材料凭借其高比表面积和表面活性位点，可通过络合作用固定土壤中的游离态Cd，同时通过离子竞争机制抑制植物对Cd的吸收^[11]。研究^[12]表明， 50 、 100 mg/kg ZnO-NPs处理使小麦籽粒Cd含量分别降低6.5%和20.0%，各器官锌营养

水平分别提升20.1%和24.0%。ZnO-NPs对水稻的干预，实现了砷镉协同钝化，提升了水稻根系的抗氧化酶活性，显著缓解了氧化应激损伤^[13-14]。这些发现不仅验证了纳米材料在污染阻控中的普适性，更揭示了其“阻隔—解毒—营养强化”的多维作用机制。但现有研究尚未明确ZnO-NPs对朝天椒Cd积累的阻控效能。本研究中，通过外源添加 CdCl_2 模拟土壤中高活性的Cd，探究ZnO-NPs对土壤有效态Cd的削减效果及其对辣椒体内Cd生物富集的阻控能力，以期为Cd污染治理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以遵义市农业科学研究院选育的朝天椒‘遵辣1号’为供试植物。供试土壤采集自江苏省淮安市清江浦区韩城村，为发育于石灰岩风化物的黏壤厚层灰泥质黄壤。风干7 d后过孔径为4 mm的筛网备用。土壤pH为6.84，全氮质量分数为 0.68 g/kg ，总Cd和有效态Cd质量分数分别为 0.870 、 0.022 mg/kg 。供试ZnO-NPs购自上海麦克林生化科技股份有限公司。扫描电镜(SEM)表征结果显示：在50 000倍放大倍数下，ZnO-NPs呈现出复杂的聚集形态，粒径分布于 $20.08 \sim 199.51 \text{ nm}$ ；在2 000倍放大倍数下，可观察到数微米级的颗粒间距，粒径分布范围扩展至数微米级，且颗粒分散性增强。MS培养基购自北京酷来搏科技有限公司； CdCl_2 等试剂均为分析纯。

1.2 试验设计

于2023年6月至9月在贵州大学进行试验。该地区年平均气温约为 21.6°C 。

1.2.1 Cd胁迫试验

添加CdCl₂, 配置含Cd 0、5、10、20、30 mg/kg的MS培养基, 种植‘遵辣1号’后观察其生长状况, 并确定后续试验中合适的Cd添加量。

1.2.2 ‘遵辣1号’种子萌发试验

依次使用75%乙醇(浸泡1 min)、2%次氯酸钠溶液(浸泡10 min)对‘遵辣1号’种子进行表面消毒, 经常温无菌水冲洗后, 将‘遵辣1号’种子浸泡于常温无菌水中12 h, 随后于50 °C无菌水中浸泡催芽30 min, 吸干表面水分备用。在透明育苗盒(4.5 cm×4.5 cm×1.3 cm)内铺设育苗纸垫, 分别添加CdCl₂(添加量依据1.2.1试验结果确定)及不同质量浓度ZnO-NPs的溶液以浸湿纸垫。设置ZnO-NPs质量浓度梯度为0、20、50、100 mg/L, 共4个处理, 依次记为F0、F1、F2、F3。每个处理设3次重复, 每重复放置10粒种子, 并用育苗纸覆盖。分别于第3、5、7天统计发芽粒数, 计算发芽率。

1.2.3 ‘遵辣1号’土培试验

在直径为17.5 cm、高为15.4 cm的盆中装土壤2.5 kg, 外源添加CdCl₂(添加量依据1.2.1试验结果确定)、不同量的ZnO-NPs。参照文献[15], 设置ZnO-NPs质量分数梯度为0、20、50、100 mg/kg, 共4个处理, 依次记为CK、T1、T2、T3。每个处理设3次生物学重复。采用机械搅拌的方式, 充分混合土壤, 以确保CdCl₂和ZnO-NPs在土壤中均匀分布。土壤与试剂材料混匀后, 静置7 d。于2023年6月6日, 选择长势一致的‘遵辣1号’朝天椒壮苗移栽至盆中, 每盆1株。种植期间根据植株生长状况适时浇水。于2023年9月6日, 分别采集朝天椒的根、茎、叶、果实及土壤样品备用。土壤样品采集自植株根际土壤, 采样时于每盆植株根系周边多点刮取附着土壤, 混匀后采用四分法缩分取样。样品经自然风干、研磨粉碎、分级过筛处理后备用。

1.3 检测指标与方法

1.3.1 ‘遵辣1号’酶活性测定

参照北京索莱宝科技有限公司的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性检测试剂盒说明书(BC0175、BC0095), 分别测定辣椒叶片的

SOD、POD活性。

1.3.2 ‘遵辣1号’光合指标测定

采用80%丙酮提取法^[6]测定叶片光合色素含量。于2023年8月下旬, 选取‘遵辣1号’植株自上向下第4对叶片, 进行叶绿素a、叶绿素b含量测定。

利用LI-6800光合仪测定土培3个月后‘遵辣1号’的光合速率、气孔导度、胞间CO₂浓度及蒸腾速率。选择晴朗无风的天气, 于上午9:00—11:00, 选取植株顶叶向下第2对功能叶进行测定, 每株测2次。

1.3.3 ‘遵辣1号’各部位及土壤中Cd含量的测定

参照GB 5009.15—2023测定‘遵辣1号’样品中Cd含量。以硝酸为消解剂, 于消解炉中消解, 并使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES-7400)测定消解液中镉含量。

参照GB/T 17141—1997测定土壤中Cd含量。采用体积比为5:5:3:2的HCl、HNO₃、HClO₄、HF混酸体系, 于石墨消解仪中消解, 并使用ICP-OES-7400测定消解液中Cd含量。

参照GB/T 23739—2009测定土壤中有效态Cd含量。采用DTPA浸提, 并使用ICP-OES-7400测定浸提液中有效态Cd含量。根据土壤有效态Cd含量, 计算ZnO-NPs对土壤Cd的钝化率。

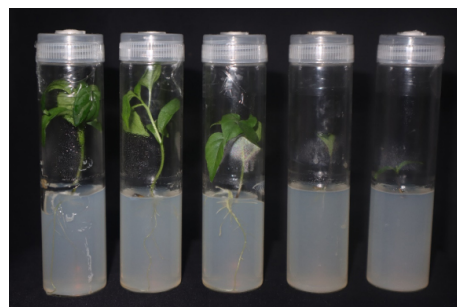
1.4 统计分析

利用Microsoft Excel 2019、IBM SPSS Statistics 27以及Origin 2022对数据进行整理、统计分析及绘图。

2 结果与分析

2.1 Cd处理对‘遵辣1号’生长的影响

由图1可知, 随着Cd质量分数的增加, ‘遵辣1



从左往右Cd质量分数依次为0、5、10、20、30 mg/kg。

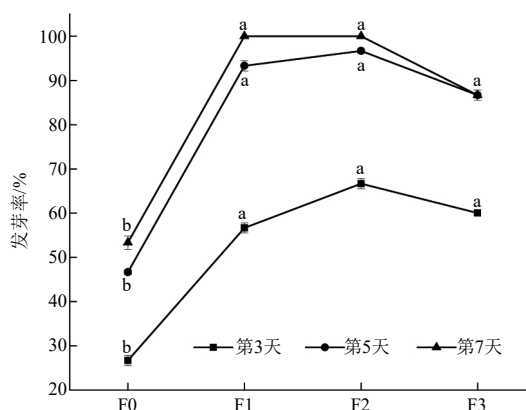
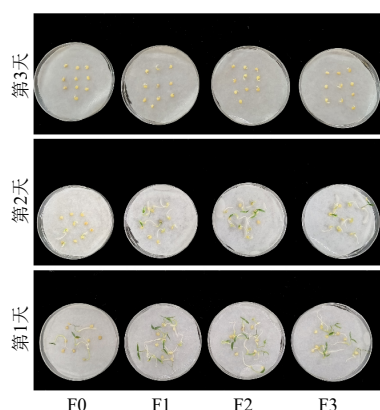
图1 Cd处理下‘遵辣1号’的生长状况

Fig. 1 Growth performance of ‘Zunla No. 1’ under Cd treatment

号’的生长逐渐受到抑制。与不添加Cd的处理相比,当Cd质量分数为5 mg/kg时,‘遵辣1号’生长受抑制不明显;当Cd质量分数为10 mg/kg时,生长受到明显抑制但尚未完全受阻;当Cd质量分数增至20、30 mg/kg时,植株生长几乎完全受阻。因此,后续试验选用10 mg/kg的Cd添加量,既能产生明显的抑制效应,又不会使植株完全停止生长。

2.2 Cd胁迫下ZnO-NPs对‘遵辣1号’种子发芽率的影响

从图2可知,10 mg/L Cd胁迫(F0, 未施加ZnO-



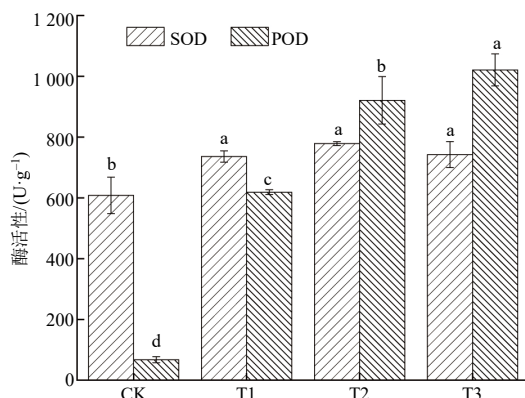
图上不同小写字母表示同一时间不同处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

图2 Cd胁迫下不同量ZnO-NPs处理的‘遵辣1号’的萌发状况与发芽率

Fig.2 Germination performance and germination rate of ‘Zunla No. 1’ treated with different amounts of ZnO-NPs under Cd stress

2.3 Cd胁迫下ZnO-NPs对‘遵辣1号’叶片中酶活性的影响

由图3可知,10 mg/kg Cd胁迫(CK, 未施加ZnO-NPs)处理下,‘遵辣1号’叶片中的POD和SOD



图柱上不同小写字母表示同一指标不同处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

图3 Cd胁迫下不同量ZnO-NPs处理的‘遵辣1号’的SOD、POD活性

Fig. 3 SOD and POD activities of ‘Zunla No. 1’ treated with different amounts of ZnO-NPs under Cd stress

NPs)条件下,‘遵辣1号’种子的萌发受到明显抑制;同一Cd胁迫条件下,施加ZnO-NPs可显著改善其萌发状况。F0处理试验第3、5、7天时,‘遵辣1号’种子的发芽率分别为26.67%、46.67%和53.33%。在相同Cd胁迫条件下,施加20、50、100 mg/L ZnO-NPs后,第3天时发芽率分别提高了30.00、40.00和33.33个百分点;第5天时分别提高了46.66、50.00和40.00个百分点;第7天时分别提高了46.67、46.67和33.34个百分点。这表明施加ZnO-NPs可显著促进‘遵辣1号’种子萌发,且以F2处理效果最佳。

活性均处于相对较低水平。与CK相比,施加ZnO-NPs可显著提高Cd胁迫下辣椒叶片中的POD和SOD活性;T1、T2、T3处理的POD活性增量分别为551.07、853.60、953.53 U/g, SOD活性增量分别为127.83、170.28、133.93 U/g。其中, T3处理对POD活性的提升效果最佳,而T2处理对SOD活性的提升效果最佳。这表明不同施加量的ZnO-NPs均可促进叶片POD和SOD活性升高,从而缓解Cd毒害。

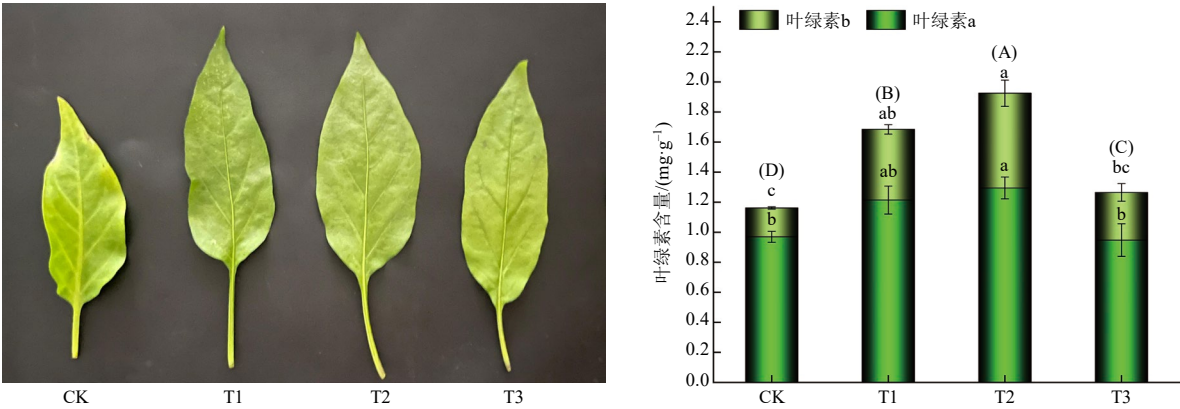
2.4 Cd胁迫下ZnO-NPs对‘遵辣1号’光合特性影响

2.4.1 对‘遵辣1号’叶绿素a、叶绿素b的影响

由图4可知,CK处理的‘遵辣1号’叶片呈现明显的毒害症状(如黄化、卷曲);施加不同量ZnO-NPs后,叶片色素含量及叶面积均得到改善,其中50 mg/kg ZnO-NPs处理的改善效果最明显。与CK相比,施加ZnO-NPs各处理均提高了‘遵辣1号’叶片的叶绿素a、叶绿素b质量分数。其中, T2处理的叶绿素a、叶绿素b质量分数均最高,分别显著

提高了33.61%、227.27%；T1的次之，分别提高了25.28%、144.34%；T3的叶绿素a质量分数降低了2.22%，叶绿素b质量分数则提高了64.97%。与CK相比，T1、T2、T3处理的叶绿素总量(叶绿素a、

叶绿素b质量分数之和)分别增加了45.02%、65.71%、8.92%，其中，T2处理的叶绿素总量显著高于CK、T1、T3的。



图柱上不同小写字母表示同一指标不同处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)；不同大写字母表示不同处理间叶绿素总量的差异有统计学意义($P<0.05$)。

图4 Cd胁迫下不同量ZnO-NPs处理的‘遵辣1号’叶片的形态及叶绿素a、叶绿素b质量分数

Fig.4 Leaf morphology and mass fractions of chlorophyll a and chlorophyll b of ‘Zunla No. 1’ treated with different amounts of ZnO-NPs under Cd stress

2. 4. 2 对‘遵辣1号’光合指标的影响

从表1可知，与CK相比，T1处理的净光合速率提高1.06%，但差异无统计学意义；T2和T3处理分别显著提高41.13%和30.50%。这表明施加ZnO-

NPs对提高‘遵辣1号’叶片净光合速率、缓解Cd对光合作用的抑制具有积极作用，其中以T2处理的效果最佳。

表1 Cd胁迫下不同量ZnO-NPs处理的‘遵辣1号’的光合指标

Table 1 Photosynthetic parameters of ‘Zunla No. 1’ treated with different amounts of ZnO-NPs under Cd stress

处理	蒸腾速率/ (mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	净光合速率/ (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	胞间CO ₂ 浓度/ (μmol·mol ⁻¹)	气孔导度/ (mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)
CK	(0.46±0.12)c	(2.82±0.34)b	(399.80±22.47)a	(21.47±5.81)c
T1	(1.13±0.17)b	(2.85±0.22)b	(372.93±18.64)a	(56.02±7.99)b
T2	(1.51±0.22)a	(3.98±0.23)a	(185.50±60.25)b	(81.23±15.45)a
T3	(1.08±0.03)b	(3.68±0.23)a	(346.90±19.33)a	(54.95±4.39)b

注：同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

施加不同量ZnO-NPs均显著提高了Cd胁迫下‘遵辣1号’叶片的蒸腾速率。与CK相比，T1、T2、T3处理分别使蒸腾速率显著提高了1.46倍、2.28倍和1.35倍。蒸腾速率的提高有助于植物维持正常的水分代谢和养分运输，从而促进植株生长与发育。

与CK相比，施加不同量ZnO-NPs均显著提高了Cd胁迫下‘遵辣1号’叶片的气孔导度，T1、T2、T3处理的气孔导度增量分别为34.55、59.76、33.48 mmol/(m²·s)。Cd胁迫诱导气孔关闭，限制CO₂进入叶片，这是Cd毒害的直接表现。T1、T3处理部分缓解了气孔关闭，但尚未完全恢复至最佳水平。T2处理下气孔开放充分，水分和CO₂交换

效率最高，恢复至最佳水平。这表明ZnO-NPs有效修复了根系吸水能力和保卫细胞功能，有助于增强CO₂的吸收效率，从而提高光合作用速率。

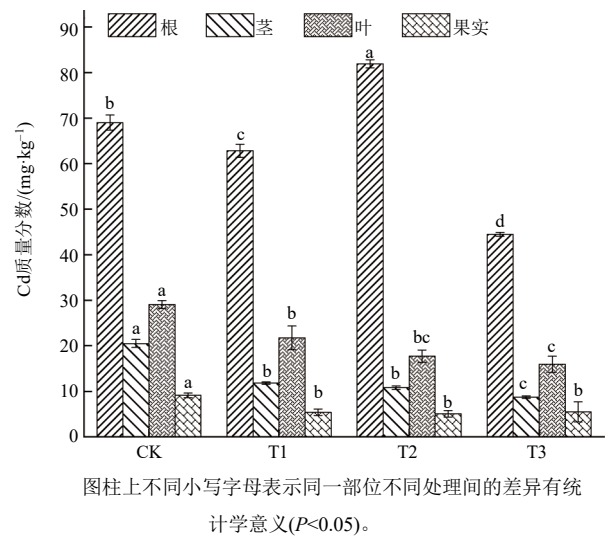
施加不同量ZnO-NPs均降低了Cd胁迫下‘遵辣1号’叶片的胞间CO₂浓度。与CK相比，T1、T2、T3处理的叶片胞间CO₂浓度的减量分别为26.87、214.30、52.90 μmol/mol。这表明施加ZnO-NPs可提高Cd胁迫下‘遵辣1号’叶片对CO₂的同化利用效率，其中T2处理效果最佳，有利于维持较高的光合速率，从而缓解Cd对光合作用的抑制。

综上，施加不同量ZnO-NPs可不同程度地缓解Cd胁迫对‘遵辣1号’叶片光合作用的抑制。其中，

T2处理(施加50 mg/kg ZnO-NPs)在提高净光合速率、蒸腾速率、气孔导度以及降低胞间CO₂浓度的效果最为突出。

2.5 Cd胁迫下ZnO-NPs对‘遵辣1号’各部位Cd积累的调控效应

从图5可知,‘遵辣1号’根、叶、茎、果实中的Cd质量分数依次降低,其中根的Cd质量分数明显高于其他器官的。在Cd胁迫下,随着ZnO-NPs施加量的增加,‘遵辣1号’根中的Cd质量分数呈先降低、后升高、再降低的趋势;与CK相比,T1处理的Cd质量分数降低了6.20 mg/kg,T2处理的升高了12.91 mg/kg,T3处理的降低了24.53 mg/kg。与CK相比,施加不同量ZnO-NPs后,‘遵辣1号’茎、叶片、果实中Cd质量分数均显著降低;T1、T2、T3处理下茎Cd质量分数分别降低了42.34%、47.35%、57.46%,叶片的分别降低了25.13%、38.99%和45.15%,果实的分别降低了40.70%、44.50%和39.97%。这表明ZnO-NPs对Cd在‘遵辣1号’地上部分的积累具有显著的抑制作用,T2处理的根Cd质量分数最高,但果实Cd质量分数最低。



图柱上不同小写字母表示同一部位不同处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

图5 Cd胁迫下不同量ZnO-NPs处理的‘遵辣1号’中各部位的Cd质量分数

Fig. 5 Cd mass fractions in various parts of ‘Zunla No. 1’ treated with different amounts of ZnO-NPs under Cd stress

2.6 ZnO-NPs对‘遵辣1号’种植土壤Cd的影响

由表2可知,土壤总Cd质量分数为9.24~9.47 mg/kg,在不同处理间的差异无统计学意义,这表明施加ZnO-NPs未改变土壤中Cd的总量。与CK

相比,施加ZnO-NPs后土壤有效态Cd质量分数均下降,其中,T1处理下显著下降,降低了0.51 mg/kg,钝化率达18.02%;而T2和T3处理的有效态Cd质量分数均为2.73 mg/kg,钝化率仅为3.53%。上述结果表明,T1处理对土壤Cd的钝化效果最佳,能够显著降低Cd的生物有效性。

表2 不同量ZnO-NPs处理的‘遵辣1号’种植土壤的总Cd和有效态Cd质量分数及ZnO-NPs对土壤Cd的钝化率

Table 2 Total Cd and available Cd mass fractions in the planting soil of ‘Zunla No. 1’ treated with different amounts of ZnO-NPs, and the passivation rate of soil Cd by ZnO-NPs			
处理	总Cd质量分数/ (mg·kg ⁻¹)	有效态Cd质量分数/ (mg·kg ⁻¹)	钝化率/%
CK	9.31±0.54	(2.83±0.34)a	—
T1	9.24±0.18	(2.32±0.03)b	(18.02±0.01)a
T2	9.25±0.29	(2.73±0.13)ab	(3.53±0.05)b
T3	9.47±0.28	(2.73±0.27)ab	(3.53±0.09)b

注: 同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

3 讨论

叶绿素是构成集光复合体和光合单位的主要成分,叶绿素a和叶绿素b作为主要色素分子,承担着光能的吸收和传递作用。Zn是植物叶绿素合成关键酶即δ-氨基乙酰丙酸脱水酶(ALAD)的必需辅因子^[17],土壤中Zn的丰缺与植物叶绿素含量密切相关。黄鑫浩等^[18]的研究发现,Cd被转运到叶片后,12个辣椒品种的光合色素含量均受到了不同程度的抑制。王思元等^[19]的研究表明,Cd胁迫会导致猕猴桃叶片出现黄化、干枯等毒害症状且光合系统明显受到抑制。本研究中,Cd胁迫下CK处理叶片呈现的黄化、卷曲等毒害症状与其一致。KAMAL等^[20]研究表明,施用ZnO-NPs可通过缓释Zn²⁺为叶绿素合成提供辅因子,显著提高Cd胁迫下的叶绿素合成效率。本研究发现,Cd胁迫下施加ZnO-NPs后,‘遵辣1号’叶片的叶绿素a、叶绿素b及总叶绿素含量均明显提高,其中T2处理(施加50 mg/kg ZnO-NPs)效果最佳,叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素含量分别显著提高了33.61%、227.27%、65.71%。同时,从光合指标来看,T2处理的净光合速率和气孔导度均显著高于其他处理的,而胞间CO₂浓度显著降低,这表明该处理有效缓解了Cd胁迫所致的气孔限制,提升了光合效

率。本研究中ZnO-NPs对叶绿素含量的缓解效应与HUSSAIN等^[21]报道的ZnO-NPs处理使叶绿素含量恢复的研究结果相似。分析其原因:一方面,ZnO-NPs可通过降低Cd²⁺的有效性来减轻Cd对叶绿体超微结构的破坏;另一方面,ZnO-NPs能上调叶绿素合成相关基因(如*CHLH*、*CHLD*、*POR*等)的表达,保障叶绿素代谢通路的正常进行^[22]。此外,ZnO-NPs能显著提升SOD、POD等抗氧化酶的活性,清除Cd诱导的过量活性氧,从而减轻叶绿体膜脂过氧化损伤,维护光合膜结构的完整性^[23]。不同施用量处理间效果差异可能与纳米颗粒的团聚效应有关:T1施用量较低,Zn²⁺释放不足;T3施用量过高,颗粒团聚导致有效表面积减少;T2施用量最为适宜,Zn²⁺释放与颗粒分散性达到平衡,故对叶绿素合成的促进效应最强。

本研究中,施加ZnO-NPs可降低土壤有效态Cd含量,其中低施加量处理(T1,施加20 mg/kg ZnO-NPs)对土壤Cd的钝化效果最优,有效态Cd质量分数降低了0.51 mg/kg,钝化率达18.02%。这一结果与改性纳米生物炭^[24]、改性纳米二氧化硅^[25]等材料对Cd的固定机制具有相似性。ZnO-NPs具有多尺度粒径分布及复杂聚集形态,其高比表面积和结构异质性增加了与Cd²⁺的接触位点,从而提升了钝化效率。但其钝化规律呈现出非单调的浓度效应。彭杨等^[26]、叶兴银等^[27]在研究ZnO-NPs对土壤Cd形态的影响时发现,ZnO-NPs对土壤Cd的钝化效果与其添加量成反比。这一现象可归因于高浓度下纳米颗粒的团聚:由于纳米颗粒的高表面能,高浓度条件下颗粒之间碰撞频率增加,易发生团聚形成微米级聚集体,导致比表面积急剧下降、表面活性位点减少,从而降低了对Cd²⁺的吸附固定能力^[28]。

土壤有效态Cd的降低虽可减少根系对Cd的接触风险,但辣椒根系仍会通过离子通道主动吸收残留Cd。‘遵辣1号’根系Cd质量分数明显高于其他器官的,而T2处理的根系Cd质量分数升高了12.91 mg/kg,这表明T2处理通过吸附固定将Cd滞留于根部,阻止其向地上部转运。已有研究^[29]表明,Zn²⁺与Cd²⁺在Zrt/Irt、Nramp等离子通道存在竞争性吸收;ZnO-NPs还可诱导根系细胞壁增厚或分

泌有机酸形成物理屏障^[30]。在可食部位果实中,T2处理对Cd质量分数的降低效果最佳(降幅44.50%),这印证了T2处理可通过根部固持Cd减少Cd向上转运,实现保障果实食用安全的最优调控效果。T2处理中,适量ZnO-NPs增加了根系表面Zn²⁺吸附位点,通过离子拮抗抑制Cd²⁺跨膜运输^[31-32],使得根Cd质量分数升高而果实Cd质量分数显著降低。

4 结论

1) 与CK相比,施加ZnO-NPs可显著提高‘遵辣1号’的发芽率和光合作用效率,其中施加50 mg/kg ZnO-NPs处理的效果最佳,能有效促进植株生长发育,缓解Cd胁迫;此外,ZnO-NPs显著提升了SOD和POD活性,通过减轻叶片氧化胁迫,缓解了Cd对‘遵辣1号’的毒性效应。

2) ‘遵辣1号’根、叶、茎、果实中的Cd含量依次降低,其中根Cd含量远高于其他组织的;在Cd胁迫下,施用ZnO-NPs可有效减少植株各部位的Cd积累,其中施加50 mg/kg ZnO-NPs处理的对降低果实的Cd含量效果最佳。在中低镉污染区种植辣椒时,精准施用适量(50 mg/kg)ZnO-NPs是一种有效的安全生产策略。

3) 与CK相比,施加不同浓度ZnO-NPs后,在保持土壤总Cd质量分数基本不变的条件下,有效态Cd含量呈降低趋势,其中施加20 mg/kg ZnO-NPs处理的效果最佳,钝化率最高(18.02%)。

参考文献:

- [1] 邹学校,朱凡.辣椒的起源、进化与栽培历史[J].园艺学报,2022,49(6):1371-1381.
- [2] 李照青.全产业链视角下贵州辣椒产业高质量发展探究[J].现代营销,2023(3):62-64.
- [3] 李昕颖,何冠谙,赵庆霞,等.施肥对辣椒产量和品质的影响研究[J].农业科技与装备,2021(6):11-12,15.
- [4] 潘攀,刘贝贝,范成五,等.不同品种辣椒镉积累特性与生理抗性和镉亚细胞分布关系[J].西南农业学报,2022,35(3):623-631.
- [5] XU W H, HUANG H, LI X D, et al. *CaHMA1* promotes Cd accumulation in pepper fruit[J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 460: 132480.
- [6] 陈佳,包蓉.我国土壤镉污染现状及防治技术研究[J].安徽农学通报,2020,26(24):135-136,181.

- [7] 刘红梅, 杨凯, 肖正午. 土壤镉污染治理及外源调控研究进展[J]. 作物研究, 2018, 32(5): 449–453.
- [8] 柴冠群, 范成五, 刘桂华, 等. 适宜贵州中度镉污染烟田安全生产的烤烟品种筛选[J]. 西南农业学报, 2022, 35(6): 1415–1421.
- [9] SHAHZAD M, BIBI A, KHAN A, et al. Utilization of antagonistic interactions between micronutrients and cadmium(Cd) to alleviate Cd toxicity and accumulation in crops[J]. Plants, 2025, 14(5): 707.
- [10] ZHANG M X, ZHAO L Y, HE Y Y, et al. Potential roles of iron nanomaterials in enhancing growth and nitrogen fixation and modulating rhizomicrobiome in alfalfa(*Medicago sativa* L.)[J]. Bioresource Technology, 2024, 391(Pt B): 129987.
- [11] JALIL S, NAZIR M M, ALI Q, et al. Zinc and nano zinc mediated alleviation of heavy metals and metalloids in plants: an overview[J]. Functional Plant Biology, 2023, 50(11): 870–888.
- [12] CHEN F, LI Y H, ZIA-UR-REHMAN M, et al. Combined effects of zinc oxide nanoparticles and melatonin on wheat growth, chlorophyll contents, cadmium(Cd) and zinc uptake under Cd stress[J]. Science of the Total Environment, 2023, 864: 161061.
- [13] MA X M, SHARIFAN H, DOU F G, et al. Simultaneous reduction of arsenic(As) and cadmium(Cd) accumulation in rice by zinc oxide nanoparticles[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 384: 123802.
- [14] CHEN H Z, SONG L L, ZHANG H B, et al. Cu and Zn Stress affect the photosynthetic and antioxidative systems of alfalfa(*Medicago sativa*) [J]. Journal of Plant Interactions, 2022, 17(1): 695–704.
- [15] 武梅. 纳米氧化锌对不同植物幼苗生长及锌吸收和分布的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2018.
- [16] 全小强, 王燕茹, 李小玉, 等. 氮添加和铵硝态氮配比对杉木幼苗光合特性及叶绿素荧光参数的影响[J]. 植物生态学报, 2024, 48(8): 1050–1064.
- [17] NGUYEN D T C, NGUYEN N T T, NGUYEN T T T, et al. Recent advances in the biosynthesis of ZnO nanoparticles using floral waste extract for water treatment, agriculture and biomedical engineering[J]. Nanoscale Advances, 2024, 6(16): 4047–4061.
- [18] 黄鑫浩, 许洪扬, 缪武, 等. 基于主成分分析和隶属函数法筛选低镉高产辣椒品种[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(5): 44–53.
- [19] 王思元, 王仁才, 石浩, 等. 镉胁迫下猕猴桃对镉的吸收及转运[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2020, 46(6): 698–705.
- [20] KAMAL A, YANG J G, BATOOL M, et al. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles, characterization and its applications in inducing disease resistance against spot blotch disease in wheat by enhancing its physiological and biochemical parameters[J]. Journal of Crop Health, 2024, 77(1): 5.
- [21] HUSSAIN M, KAOUSAR R, HAQ S I U, et al. Zinc-oxide nanoparticles ameliorated the phytotoxic hazards of cadmium toxicity in maize plants by regulating primary metabolites and antioxidants activity[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1346427.
- [22] QU R H, LIU N, WEN Q, et al. Molecular mechanism of dissolvable metal nanoparticles-enhanced CO₂ fixation by algae: metal-chlorophyll synthesis[J]. Environmental Pollution, 2024, 349: 123987.
- [23] ALI S, BAI Y S, ZHANG J L, et al. Discovering nature's shield: metabolomic insights into green zinc oxide nanoparticles safeguarding *Brassica parachinensis* L. from cadmium stress[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2024, 206: 108126.
- [24] 刘东明, 魏圆慧, 罗卿福, 等. 不同类型纳米生物炭特征及对土壤镉污染修复效果的影响[J]. 江西农业大学学报, 2024, 46(4): 1076–1085.
- [25] 王帝伟, 刘祎丹, 易春辉, 等. 改性纳米二氧化硅对 Cd 污染农田土壤的钝化修复[J]. 环境化学, 2019, 38(5): 1106–1112.
- [26] 彭杨, 贺峦, 高学鹏, 等. 生物炭负载纳米氧化锌对复合污染油茶生理生化、元素吸收及土壤性质的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(19): 180–186.
- [27] 叶兴银, 张卫, 龙精华, 等. 人工纳米颗粒输入对稻田土壤 Cd 形态转化及生物有效性的影响[J]. 环境工程学报, 2018, 12(12): 3426–3432.
- [28] DOVLETYAROVA E A, FAREEVA O S, ZHIKHAREV A P, et al. Choose your amendment wisely: zero-valent iron nanoparticles offered no advantage over microparticles in a laboratory study on metal immobilization in a contaminated soil[J]. Applied Geochemistry, 2022, 143: 105369.
- [29] 罗秋红, 吴俊, 柏斌, 等. 水稻镉吸收与转运机理的研究进展[J]. 土壤, 2021, 53(6): 1142–1151.
- [30] 杨红霞, 陈俊良, 刘巍. 镉对植物的毒害及植物解毒机制研究进展[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(2): 1–8.
- [31] THOUNAOJAM T C, MEETEI T T, DEVI Y B, et al. Zinc oxide nanoparticles(ZnO-NPs): a promising nanoparticle in renovating plant science[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2021, 43(10): 136.
- [32] LIU L R, NIAN H, LIAN T X. Plants and rhizospheric environment: affected by zinc oxide nanoparticles(ZnO NPs). A review[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2022, 185: 91–100.