



镉污染下丛枝菌根真菌和纳米二氧化钛对萱草光合生理和镉吸收的影响

刘振羽 郝建朝 张杰西 郝婷婷 陈晖 刘家宁 苑红丹

Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and TiO₂ nanoparticles on the photosynthetic physiology and cadmium uptake of *Hemerocallis fulva* under cadmium pollution

LIU Zhenyu, HAO Jianchao, ZHANG Jiexi, HAO Tingting, CHEN Hui, LIU Jianing, YUAN Hongdan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2024-0270>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

盐胁迫下丛枝菌根真菌对疏叶骆驼刺幼苗生长和生理的影响

Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and physiology of *Alhagi sparsifolia* seedling under salt stress

草业科学. 2022, 39(9): 1763 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0215>

镉胁迫下青葙种子萌发及幼苗生理特性

Seed germination and seedling physiological characteristics of *Celosia argentea* under cadmium stress

草业科学. 2022, 39(7): 1391 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0652>

铅胁迫下早开堇菜的耐性及富集转运

Tolerance, enrichment, and transportation of *Viola prionantha* under lead stress

草业科学. 2023, 40(2): 338 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0138>

CQ10-LPSp对紫花苜蓿幼苗抗氧化酶和防御酶的作用

Effects of CQ10-LPSp on antioxidative enzymes and defense enzymes of alfalfa seedlings

草业科学. 2023, 40(2): 460 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0715>

重金属复合污染下不同种植密度香根草的生长及富集特征

Absorption characteristics of vetiver grass to the heavy metals in the soil of a heavy metal compound-polluted mining area

草业科学. 2023, 40(8): 2028 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0115>

克隆整合与距离效应对不同镉胁迫下空心莲子草入侵性的影响

Effect of clonal integration and integration distance on invasiveness of *Alternanthera philoxeroides* under different cadmium stresses

草业科学. 2024, 41(6): 1297 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0034>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2024-0270

刘振羽, 郝建朝, 张杰西, 郝婷婷, 陈晖, 刘家宁, 苑红丹. 镉污染下丛枝菌根真菌和纳米二氧化钛对萱草光合生理和镉吸收的影响. 草业科学, 2025, 42(3): 638-650.

LIU Z Y, HAO J C, ZHANG J X, HAO T T, CHEN H, LIU J N, YUAN H D. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and TiO₂ nanoparticles on the photosynthetic physiology and cadmium uptake of *Hemerocallis fulva* under cadmium pollution. Pratacultural Science, 2025, 42(3): 638-650.

镉污染下丛枝菌根真菌和纳米二氧化钛对 萱草光合生理和镉吸收的影响

刘振羽¹, 郝建朝², 张杰西³, 郝婷婷⁴, 陈晖⁴, 刘家宁⁵, 苑红丹¹

(1. 天津市生态环境监测中心, 天津 300191; 2. 天津农学院农学与资源环境学院, 天津 300392; 3. 北京建工环境修复股份有限公司, 北京 100015; 4. 天津天滨同盛环境科技有限公司, 天津 300110; 5. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 研究微生物和纳米材料共同对重金属污染土壤的修复效应对重金属污染防治具有重要意义, 以萱草 (*Hemerocallis fulva*) 'Golden Doll' 为试材, 采用室内盆栽试验, 探究 50 mg·kg⁻¹ 镉 (Cd) 污染下接种丛枝菌根真菌 (AMF) 与根施 T₁ (100 mg·L⁻¹)、T₂ (200 mg·L⁻¹)、T₃ (400 mg·L⁻¹) 浓度纳米二氧化钛 (TiO₂ NPs) 及其复合处理对萱草生长、叶绿素和叶绿素荧光参数、气体交换参数、Cd 吸收及抗氧化系统的影响, 以探明两者在 Cd 污染下提高萱草光合生理以及促进 Cd 吸收的作用。结果发现: Cd 污染土壤种植萱草的株高、叶片数、地上部和根系生物量均显著下降, 根施不同浓度 TiO₂ NPs 和 TiO₂ NPs + AMF 处理均可以缓解萱草生长受到的抑制。与 Cd 处理相比, Cd + T₂ + AMF 处理的萱草叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a + b、叶绿素 a/b 以及类胡萝卜素含量分别增加了 53.8%、29.7%、48.6%、18.4% 和 25.8%, 叶绿素荧光参数中 PS II 最大光化学效率 (F_v/F_m)、PS II 潜在活性 (F_v/F_o) 和光化学猝灭系数 (qP) 分别增加 14.6%、60.7% 和 67.6%, 而非光化学猝灭系数 (NPQ) 呈下降趋势。Cd 污染抑制了萱草净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r) 和气孔导度 (G_s) 的增长, Cd + T₂ + AMF 处理能显著提高 P_n。同时, 根施不同浓度 TiO₂ NPs 和 TiO₂ NPs + AMF 处理能够降低萱草地上部和根系 Cd 含量, 提高萱草 Cd 转运系数并降低富集系数, 激活植物叶片过氧化物酶 (APX)、过氧化氢酶 (CAT) 和谷胱甘肽还原酶 (GR) 活性, 并增加非酶抗氧化剂抗坏血酸 (AsA)、谷胱甘肽 (GSH) 以及总黄酮 (TF) 含量来缓解萱草受到的氧化胁迫。总体上, Cd + T₂ + AMF 处理增强萱草抗 Cd 污染胁迫的效果最好。

关键词: 丛枝菌根真菌; 重金属; 纳米二氧化钛; 萱草; 光合特性; 叶绿素; 抗氧化酶

文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2025)03-0638-13

Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and TiO₂ nanoparticles on the photosynthetic physiology and cadmium uptake of *Hemerocallis fulva* under cadmium pollution

LIU Zhenyu¹, HAO Jianchao², ZHANG Jiexi³, HAO Tingting⁴, CHEN Hui⁴, LIU Jianing⁵, YUAN Hongdan¹

(1. Tianjin Eco-Environmental Monitoring Center, Tianjin 300191, China;

2. College of Agronomy & Resources and Environment, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China;

3. Beijing Construction Engineering Group Environmental Remediation Co. Ltd., Beijing 100015, China;

4. Tianjin Tianbin Tongsheng Environmental Technology Co. Ltd., Tianjin 300110, China;

5. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Studying the combined remediation effects of microorganisms and nanomaterials on heavy metal-contaminated

收稿日期: 2024-05-05 接受日期: 2024-06-28

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFC3709105)

第一作者: 刘振羽 (1985-), 男, 天津人, 工程师, 本科, 主要从事环境监测与评价。E-mail: 3338652046@qq.com

通信作者: 苑红丹 (1985-), 女, 河北保定人, 工程师, 本科, 主要从事环境监测与评价。E-mail: Kechengk240323@163.com

soil is of considerable significance for the prevention and control of heavy metal pollution. In this study, we conducted an indoor pot experiment to investigate the effects of $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ cadmium (Cd) pollution on the growth, chlorophyll content, chlorophyll fluorescence and gas exchange parameters, Cd uptake using *Hemerocallis fulva* (Golden Doll). Additionally, we also investigated the antioxidant system of *H. fulva* treated with an inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and root application of T_1 ($100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), T_2 ($200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), T_3 ($400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) concentrations of titanium dioxide nanoparticles (TiO_2 NPs), as both independent and combined treatments. The aim of the study was to establish the effects of these two treatments on improving the photosynthetic physiology of *H. fulva* and promoting Cd uptake in Cd-contaminated soils. The results revealed that compared with the control (CK) treatment, there were significant reductions in the height, number of leaves, and aboveground and root biomasses of *H. fulva* under Cd pollution. Root application of different concentrations of TiO_2 NPs and the combined TiO_2 NPs + AMF treatment were found to alleviate the Cd-induced growth inhibition of *H. fulva*. Compared with the Cd treatment, the Cd + T_2 + AMF treatment increased chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll a + b, chlorophyll a/b, and carotenoid contents of *H. fulva* by 53.8%, 29.7%, 48.6%, 18.4%, and 25.8%, respectively. Among the assessed chlorophyll fluorescence parameters, the maximum photochemical efficiency (F_v/F_m), potential activity (F_v/F_o), and photochemical quenching coefficient (qP) of photosystem II were increased by 14.6%, 60.7%, and 67.6%, respectively, whereas the non-photochemical quenching coefficient (NPQ) showed a declining trend. Cd pollution inhibited the net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate, and stomatal conductance of *H. fulva*, whereas the Cd + T_2 + AMF treatment restored the value of P_n to a level comparable to that of the CK treatment in the absence of Cd pollution. Furthermore, root application of different concentrations of TiO_2 NPs and the combined TiO_2 NP + AMF treatments were observed to reduce Cd contents in the aboveground and belowground parts of *H. fulva* plants, increase the Cd transport coefficient, reduce the enrichment coefficient, promote the activities of antioxidant enzymes, including peroxidase, catalase, and glutathione reductase, and increase the contents of non-enzymatic antioxidants, such as ascorbic acid, glutathione, and total flavonoids (TF) to alleviate oxidative stress on *H. fulva*. On the basis of the findings in this study, we established that the Cd + T_2 + AMF treatment was the most effective regarding the reduction of the adverse effects of Cd pollution on *H. fulva*.

Keywords: arbuscular mycorrhizal fungi; heavy metal; titanium dioxide nanoparticles; *Hemerocallis fulva*; photosynthetic characteristics; chlorophyll; antioxidant enzyme

Corresponding author: YUAN Hongdan E-mail: Kechengkh240323@163.com

镉 (Cd) 是重金属污染中危害性最大的元素之一, 被联合国环境规划署列为全球性危害化学物质第一位^[1]。Cd 污染不仅会造成土壤肥力减弱, 还会对植物的生长发育和物质代谢造成一定的影响^[2-3]。此外, 土壤环境中的 Cd 难降解、易富集, 通过植物吸收以及食物链效应进入高等动物乃至人体中, 最终危害人类的生命和健康^[4]。因此, 如何高效修复 Cd 污染土壤是一项亟需解决的问题。有研究发现, 利用微生物和植物修复重金属污染具有安全方便无毒、不产生二次污染、修复效果好等优势^[5-6], 因而受到广泛关注。

丛枝菌根真菌 (arbuscular mycorrhizal fungi, AMF) 是一类能与 80% 以上的陆生高等植物形成共生体的微生物^[7]。宿主植物为 AMF 提供碳水化合物, 作为交换, AMF 则提高植物吸收养分和水分的能力,

保持植物生态的多样性和稳定性^[8]。研究发现, AMF 具有促进植物根系发育、改善宿主植物营养状况、改善土壤理化性质等直接或间接作用, 从而调控植物的生理代谢活动^[9-10]。而在重金属污染土壤中 AMF 菌丝体表面能够形成螯合物以及真菌细胞壁组分 (几丁质、多糖) 等对重金属具有钝化固定作用, 从而有效降低重金属对宿主植物的毒害性^[11], 同时显著增加寄主植物地上部分对重金属元素的吸收或在根系中的积累, 对生物修复重金属污染起到促进作用^[12]。Gao 等^[13] 研究发现, Cd 胁迫下 AMF 能够促进谷类植物生长, 并显著增加植物光合色素含量, 促进植物对 N、P 等养分吸收利用, 从而降低植株中的 Cd 浓度。同时, AMF 还可以通过提高渗透调节物质含量、积累次生代谢产物 (总酚、类黄酮、类胡萝卜素) 和激素、减少膜脂过氧化产物等来

减轻重金属对植物的伤害^[14]。纳米二氧化钛(TiO_2 NPs)是一种具有较高吸附性且无毒的金属氧化物,能促进植物早期生长,增强植物品质和抵抗力,影响养分运输与分配^[15-16]。另有研究证实, TiO_2 NPs能够应用于重金属污染土壤的修复, Singh 和 Lee^[17]发现其能够与PS II光系统反应中心结合,提高电子传输和叶绿体光适应能力,从而促进大豆(*Glycine max*)对土壤重金属Cd的吸收。郑泽其等^[18]也证实,Cd污染下 TiO_2 NPs可提高玉米(*Zea mays*)幼苗叶绿素含量以及抗氧化酶(SOD、POD、CAT)活性,显著增加Cd转运系数和Cd提取量。以上研究证实了AMF或 TiO_2 NPs具有修复重金属污染土壤、促进植物生长的作用。

目前,针对植物^[19]、纳米材料^[20]、微生物^[21]等修复重金属Cd土壤的研究已有相关报道,且多数研究证实联合修复的效果优于单一修复,但针对AMF—园林植物—纳米材料三者联合修复Cd污染土壤的研究还未见报道。随着生态园林城市的建设与植物造景的需要,将城市土壤重金属污染修复与园林绿化相结合^[22],选择具有较强重金属抗性和富集性的园林植物,既能够满足城市绿化的景观需求,还可以减轻重金属对环境的污染,为修复城市重金属污染土壤开辟了新的发展领域,近年来备受研究者关注。萱草(*Heimerocallis fulva*)是百合科萱草属多年生草本植物,具有生长快、价格低廉、耐粗放管理、生物量积累迅速等特点,在植物修复工程方面具有极大的应用潜力^[23]。基于此,本研究以萱草为研究对象,探究Cd污染土壤下接种AM真菌并配施不同浓度 TiO_2 NPs对萱草生长、土壤酶活性以及微生物群落的影响,为今后应用AMF—园林植物—纳米材料三重复合技术修复重金属Cd污染土壤提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

选取‘Golden Doll’萱草种子为试材,购自保定市顺平县常青萱草花卉基地。供试土壤采自天津市生态环境监测中心附近绿地的原土,土壤类型为棕壤,待土样自然风干后,去除土壤中的石块等杂质,过2 mm筛。土壤的基本理化性质:pH为7.18,有机质含量为2.12%,总氮含量为1.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷

含量为84.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效钾含量为263.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Cd含量为0.09 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。供试AMF菌种为异形根孢囊霉(*Rhizophagus irregularis*),由亚热带丛枝菌根真菌资源保藏中心提供,并通过玉米和三叶草(*Trifolium*)扩繁而来。接种物为保存于其根系及基质中的孢子、菌丝和菌根根段。经检测,每20 g接种物中孢子密度为260个,菌丝侵染率为60%。 TiO_2 NPs(锐钛型)由北京建工环境修复股份有限公司提供,其型号为JR05,平均粒径 <5 nm,比表面积 $150\sim 300$ $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$,纯度99.9%。Hoagland营养液购自上海泽叶生物科技有限公司。

1.2 试验设计

试验于2023年4月—8月在天津市生态环境监测中心内进行,采用完全随机设计,共设置8个处理:对照(CK)、Cd污染处理(添加50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd)、Cd污染下根施100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ TiO_2 NPs(Cd + T₁)、Cd污染下根施200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ TiO_2 NPs(Cd + T₂)、Cd污染下根施400 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ TiO_2 NPs(Cd + T₃)、Cd污染下根施100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ TiO_2 NPs,并接种异形根孢囊霉(Cd + T₁ + AMF)、Cd污染下根施200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ TiO_2 NPs,并接种异形根孢囊霉(Cd + T₂ + AMF)、Cd污染下根施400 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ TiO_2 NPs,并接种异形根孢囊霉(Cd + T₃ + AMF),每个处理重复6次。种植前首先将萱草种子用0.1%多菌灵溶液消毒25 min,后用蒸馏水冲洗干净并放置在阴凉处干燥,随后播种至50孔穴盘内。待萱草生长至10 cm时,选择高度一致、生长健壮的植株进行试验,其中50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd以 $\text{CdCl}_2\cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 溶液形式拌入3 kg土壤后装盆,浓度参考李凝玉等^[24]的研究,平衡4周后用于盆栽试验。 TiO_2 NPs的根施浓度为100、200、400 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,参照高梦迪等^[25]的试验结果,每隔30 d喷施一次,连喷3次,生长期间根据植株生长需要补充30%的Hoagland营养液,于90 d后观测供试植株的各项指标。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 生长指标

用皮尺测量萱草基部到最高点的距离记为株高;随机对每株萱草叶片进行计数,后将萱草全株洗净后晾干,分离出地上部和根系,于105 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中杀青0.5 h,随后在85 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒重,分别计数地上部和根系干质量。

1.3.2 叶绿素含量及叶绿素荧光参数

选择萱草健康叶片, 采用丙酮法测定叶绿素(a、b)、类胡萝卜素含量^[26]。先将萱草叶片暗处理 30 min, 用 PS-1000 型多功能叶绿素荧光仪测定叶片的叶绿素荧光参数, 根据最小荧光值 (F_0)、最大荧光值 (F_m)、可变荧光值 (F_v) 计算 PS II 的最大光化学量子效率 (F_v/F_m) 和 PS II 潜在活性 (F_v/F_0); 然后在自然光下活化 1 h 后, 测定 $500 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 光强作用下的初始荧光 (F_0')、最大荧光 (F_m')、稳态荧光 (F_s)。光化学猝灭系数 (qP) 和非光化学猝灭系数 (NPQ) 的计算公式如下:

$$qP = (F_m' - F_s) / (F_m' - F_v'); \quad (1)$$

$$NPQ = (F_m - F_m') / F_m'. \quad (2)$$

1.3.3 光合参数

于晴天 09:00—12:00, 每个处理随机选取 8 株萱草, 选择健康叶片用 TP-3051D 便携式光合仪进行测量 [参数设置: 光照强度 $1000 \mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 叶室温度 $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 湿度 70%, CO_2 浓度 $400 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$]。待数值稳定后分别记录净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (G_s)、细胞间隙 CO_2 浓度 (C_i) 等参数。

1.3.4 地上部和根系的 Cd 含量、转运系数和富集系数

采用石墨炉原子吸收光谱法 (GFAAS) 测量植物的地上部以及根系 Cd 含量, 并计算转运系数 (translocation factor, TF) 和富集系数 (bioconcentration factor, BCF)。计算公式如下:

$$TF = Cd_S / Cd_R;$$

$$BCF = (Cd_S + Cd_R) / Cd_T.$$

式中: Cd_S 和 Cd_R 分别为萱草地上部和根部的 Cd 含量, Cd_T 为土壤中 Cd 含量。

1.3.5 抗氧化酶活性及非酶抗氧化物质含量

采用紫外吸收法测定抗坏血酸过氧化物酶 (ascorbate peroxidase, APX) 活性; 采用 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3\text{-NaNO}_2\text{-NaOH}$ 比色法测定总黄酮 (total flavonoids, TF) 含量; 采用高锰酸钾滴定法测定过氧化氢酶 (catalase, CAT) 活性; 谷胱甘肽还原酶 (glutathione reductase, GR) 活性、抗坏血酸 (ascorbic acid, AsA) 和谷胱甘肽 (glutathione, GSH) 含量的测定均采用李合生^[27]提供的方法。

1.4 数据处理

采用 SPSS 22.0 进行单因素方差分析以及差异显著性检验 (LSR 法, $\alpha = 0.05$), 表中数据为平均值 \pm 标准误, 采用 Excel 2003 软件作图。

2 结果与分析

2.1 AMF 和 TiO_2 NPs 对 Cd 污染土壤萱草生长指标的影响

如表 1 所列, Cd 污染下, 萱草株高、叶片数、地上部和根系干质量均显著下降 ($P < 0.05$), 添加不同浓度 TiO_2 NPs 或 TiO_2 NPs + AMF 可增加萱草株高、叶片数、地上部和根系干质量。各处理中, 添加 AMF 处理对萱草株高和叶片数的促进效果高于其他处理; Cd + T_2 + AMF 处理和 Cd + T_3 + AMF 处理均能显著提高萱草地上部和根系干质量, 与 Cd 处理相比, Cd + T_2 + AMF 处理的地上部和根系干质量分别增加了 49.7% 和 53.4%, Cd + T_3 + AMF 处理的地上部和根系干质量分别增加了 43.9% 和 43.8%。综上, Cd 胁迫下 Cd + T_2 + AMF 处理对萱草生长的促进效果高于其他处理。

2.2 AMF 和 TiO_2 NPs 对 Cd 污染土壤萱草光合色素含量的影响

如表 2 所列, Cd 污染下, 萱草叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a + b、叶绿素 a/b 和类胡萝卜素含量均显著下降趋势 ($P < 0.05$), 添加不同浓度 TiO_2 NPs 或 TiO_2 NPs + AMF 可增加萱草光合色素含量。各处理中, Cd + T_2 + AMF 处理对叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a + b、叶绿素 a/b 的促进效果最高, 较 Cd 处理分别增加了 53.8%、29.7%、48.6% 和 18.4%。Cd + T_2 + AMF 处理和 Cd + T_3 + AMF 处理对萱草类胡萝卜素含量的促进效果高于其他处理, 相较于 Cd 处理分别增加了 25.8% 和 23.9%。综合分析可知, Cd 污染下 Cd + T_2 + AMF 处理对萱草光合色素含量的提升效果较好。

2.3 AMF 和 TiO_2 NPs 对 Cd 污染土壤萱草叶绿素荧光参数的影响

如图 1 所示, Cd 污染下, 萱草 PS II 下的 F_v/F_m 、PS II 的 F_v/F_0 和 qP 较其他处理下降, 而 NPQ 则较高。Cd 污染下添加不同浓度 TiO_2 NPs 或 TiO_2 NPs +

表1 Cd污染下纳米二氧化钛和丛枝菌根真菌对萱草生长的影响
Table 1 Effects of TiO₂ nanoparticles and arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of *Hemerocallis fulva* under cadmium pollution

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	叶片数 Leaf number/piece	地上干质量 Aboveground dry mass/g	根系干质量 Root dry mass/g
CK	37.8 ± 3.0a	16.3 ± 0.3a	2.74 ± 0.05a	2.48 ± 0.04a
Cd	20.3 ± 1.6d	9.7 ± 0.3e	1.73 ± 0.06f	1.46 ± 0.04g
Cd + T ₁	23.0 ± 0.3cd	11.7 ± 0.3d	2.01 ± 0.03e	1.61 ± 0.05fg
Cd + T ₂	25.1 ± 1.6c	13.0 ± 0.6cd	2.18 ± 0.03d	1.85 ± 0.05de
Cd + T ₃	24.0 ± 1.4cd	13.0 ± 0.6cd	1.98 ± 0.03e	1.73 ± 0.06ef
Cd + T ₁ + AMF	34.0 ± 3.7ab	15.0 ± 0.6ab	2.40 ± 0.02c	1.97 ± 0.07cd
Cd + T ₂ + AMF	35.0 ± 3.9a	15.3 ± 0.3ab	2.59 ± 0.04b	2.24 ± 0.04b
Cd + T ₃ + AMF	30.2 ± 2.3b	14.3 ± 1.2bc	2.49 ± 0.03bc	2.10 ± 0.02bc

CK、Cd、Cd + T₁、Cd + T₂、Cd + T₃、Cd + T₁ + AMF、Cd + T₂ + AMF、Cd + T₃ + AMF分别表示对照、添加50 mg·kg⁻¹ Cd、Cd污染下根施100 mg·L⁻¹ TiO₂ NPs、Cd污染下根施200 mg·L⁻¹ TiO₂ NPs、Cd污染下根施400 mg·L⁻¹ TiO₂ NPs、Cd污染下根施100 mg·L⁻¹ TiO₂ NPs并接种异形根孢囊霉、Cd污染下添加200 mg·L⁻¹ TiO₂ NPs并接种异形根孢囊霉、Cd污染下根施400 mg·L⁻¹ TiO₂ NPs并接种异形根孢囊霉。不同小写字母表示不同处理间差异显著(P < 0.05)。下同。

CK, control; Cd, added 50 mg·kg⁻¹ Cd; Cd + T₁, added 100 mg·L⁻¹ TiO₂ NPs under Cd pollution; Cd + T₂, added 200 mg·L⁻¹ TiO₂ NPs under Cd pollution; Cd + T₃, added 400 mg·L⁻¹ TiO₂ NPs under Cd pollution; Cd + T₁ + AMF, added 100 mg·L⁻¹ TiO₂ NPs and inoculated *Rhizophagus irregularis* under Cd pollution; Cd + T₂ + AMF, added 200 mg·L⁻¹ TiO₂ NPs and inoculated *R. irregularis* under Cd pollution; Cd + T₃ + AMF, added 400 mg·L⁻¹ TiO₂ NPs and inoculated *R. irregularis* under Cd pollution. Different lowercase letters within the same column indicate significant differences between the different treatments at the 0.05 level. This is applicable for the following figures and tables as well.

表2 纳米二氧化钛和丛枝菌根真菌对Cd污染下萱草光合色素含量的影响
Table 2 Effects of TiO₂ nanoparticles and arbuscular mycorrhizal fungi on the photosynthetic pigment contents of *Hemerocallis fulva* under cadmium pollution

处理 Treatment	叶绿素a Chl a/(mg·g ⁻¹)	叶绿素b Chl b/(mg·g ⁻¹)	叶绿素a + b Chl a + b/(mg·g ⁻¹)	叶绿素a/b Chl a/b	类胡萝卜素 Carotenoids/(mg·g ⁻¹)
CK	1.078 ± 0.028a	0.252 ± 0.002a	1.331 ± 0.026a	4.268 ± 0.147a	0.209 ± 0.003a
Cd	0.641 ± 0.012g	0.182 ± 0.004f	0.823 ± 0.013g	3.518 ± 0.097bc	0.155 ± 0.001g
Cd + T ₁	0.724 ± 0.005f	0.208 ± 0.003e	0.932 ± 0.007f	3.477 ± 0.039c	0.167 ± 0.002f
Cd + T ₂	0.825 ± 0.005cd	0.224 ± 0.002cd	1.050 ± 0.005cd	3.674 ± 0.049bc	0.184 ± 0.001d
Cd + T ₃	0.767 ± 0.006ef	0.217 ± 0.001d	0.985 ± 0.007e	3.527 ± 0.031bc	0.176 ± 0.002e
Cd + T ₁ + AMF	0.854 ± 0.015c	0.228 ± 0.001c	1.083 ± 0.015c	3.737 ± 0.072b	0.189 ± 0.002cd
Cd + T ₂ + AMF	0.986 ± 0.019b	0.236 ± 0.003b	1.223 ± 0.021b	4.166 ± 0.071a	0.195 ± 0.002b
Cd + T ₃ + AMF	0.803 ± 0.005de	0.221 ± 0.002cd	1.025 ± 0.005de	3.626 ± 0.040bc	0.192 ± 0.001bc

AMF均可增加萱草 F_v/F_m、F_v/F₀和 qP,但降低了 NPQ。各处理中,Cd + T₁ + AMF处理和 Cd + T₂ + AMF处理对萱草 F_v/F_m的提升效果高于其他处理,比 Cd处理提高了 14.2%和 14.6%;Cd + T₂ + AMF处理对萱草 F_v/F₀和 qP的提升效果显著,分别提高了 60.7%和 67.6%。Cd + T₁ + AMF处理和 Cd + T₂ + AMF处理对萱草 NPQ的抑制效果优于其他处理。

综上,Cd污染抑制了萱草 F_v/F_m、F_v/F₀和 qP的增长,Cd + T₂ + AMF处理能够促进萱草 F_v/F_m、F_v/F₀和 qP的增加。

2.4 AMF和TiO₂ NPs对Cd污染土壤萱草气体交换参数的影响

如图2所示,Cd污染下,萱草 P_n、T_r和 G_s较其他处理均表现为下降趋势,而 C_i则表现相反,呈现

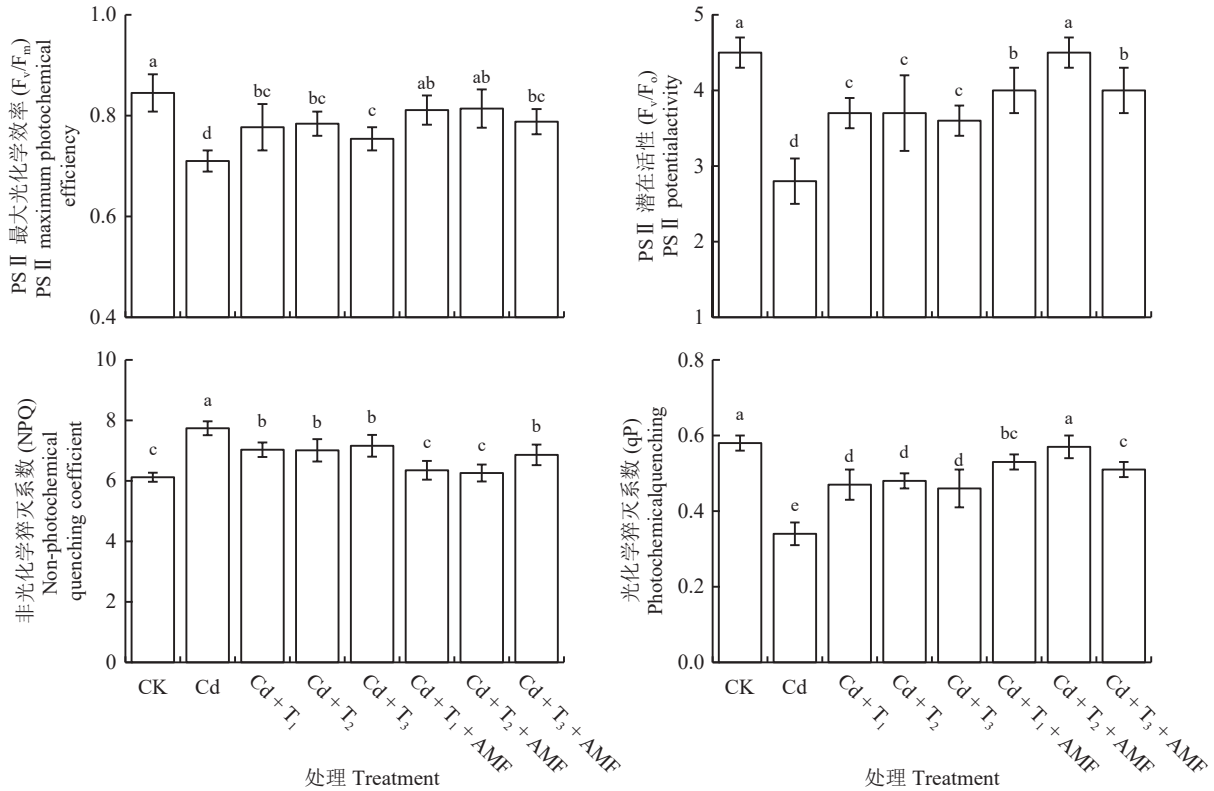


图 1 Cd 污染下纳米二氧化钛和丛枝菌根真菌对萱草叶绿素荧光参数的影响

Figure 1 Effects of TiO₂ nanoparticles and arbuscular mycorrhizal fungi on the chlorophyll fluorescence parameters of *Hemerocallis fulva* under cadmium pollution

上升趋势。Cd 污染下添加不同浓度 TiO₂ NPs 或 TiO₂ NPs + AMF 均可增加萱草 P_n、T_r 和 G_s，而降低 C_i。各处理中，Cd + T₂ + AMF 处理较 Cd 处理对萱草 P_n 的提升效果显著 (P < 0.05)，比 Cd 处理提高了 67.2%；T_r、G_s 和 C_i，Cd + T₁ + AMF 处理、Cd + T₂ + AMF 处理和 Cd + T₃ + AMF 处理间均无显著差异 (P > 0.05)。综上，Cd 污染抑制了萱草 P_n、T_r 和 G_s 的增长，Cd + T₂ + AMF 处理能促进 P_n 的增加。

2.5 AMF 和 TiO₂ NPs 对 Cd 污染土壤萱草吸收和转运 Cd 的影响

如图 3 所示，Cd 污染下，添加不同浓度 TiO₂ NPs 或 TiO₂ NPs + AMF 均可降低萱草地上部和根系 Cd 含量，增加转运系数，降低富集系数。各处理中，Cd + T₂ + AMF 处理对萱草地上部 Cd 含量的降低效果显著，相比于 Cd 处理显著下降了 33.8%；Cd + T₁ + AMF 处理和 Cd + T₂ + AMF 处理对根系 Cd 含量的降低效果明显，显著好于其余处理，二者间无显著差异；Cd + T₁ + AMF 处理、Cd + T₂ + AMF 处理和 Cd + T₃ + AMF 处理对 Cd 的转运系数提升效果显著

优于其他处理，Cd + T₂ + AMF 处理下，比 Cd 处理提高了 47.6%，其 Cd 的富集系数最低，为 0.22。综上，Cd 污染下 Cd + T₂ + AMF 处理可通过提高萱草转运系数并降低富集系数进而减少对根系的伤害。

2.6 AMF 和 TiO₂ NPs 对 Cd 污染土壤萱草抗氧化酶活性及非酶抗氧化剂含量的影响

如图 4 所示，Cd 污染下，萱草 APX、CAT 和 GR 活性下降，AsA、GSH 以及 TF 含量也呈下降趋势，添加不同浓度 TiO₂ NPs 或 TiO₂ NPs + AMF 均可增加萱草抗氧化酶活性及非酶抗氧化剂含量。Cd + T₂ + AMF 处理对 APX 活性、CAT 活性、GR 活性的提升效果明显，相较于 Cd 处理分别显著增加了 142.7%、132.3%和 169.4%。Cd + T₂ + AMF 处理对非酶抗氧化剂 AsA、GSH 和 TF 含量增加幅度的影响最大，分别比 Cd 处理增加了 103.9%和 72.2%，而 Cd + T₁ + AMF 处理和 Cd + T₂ + AMF 处理的 GSH 含量间无显著差异。综上，Cd 污染下 Cd + T₂ + AMF 处理提高抗氧化酶活性及非酶抗氧化剂含量的效果最好。

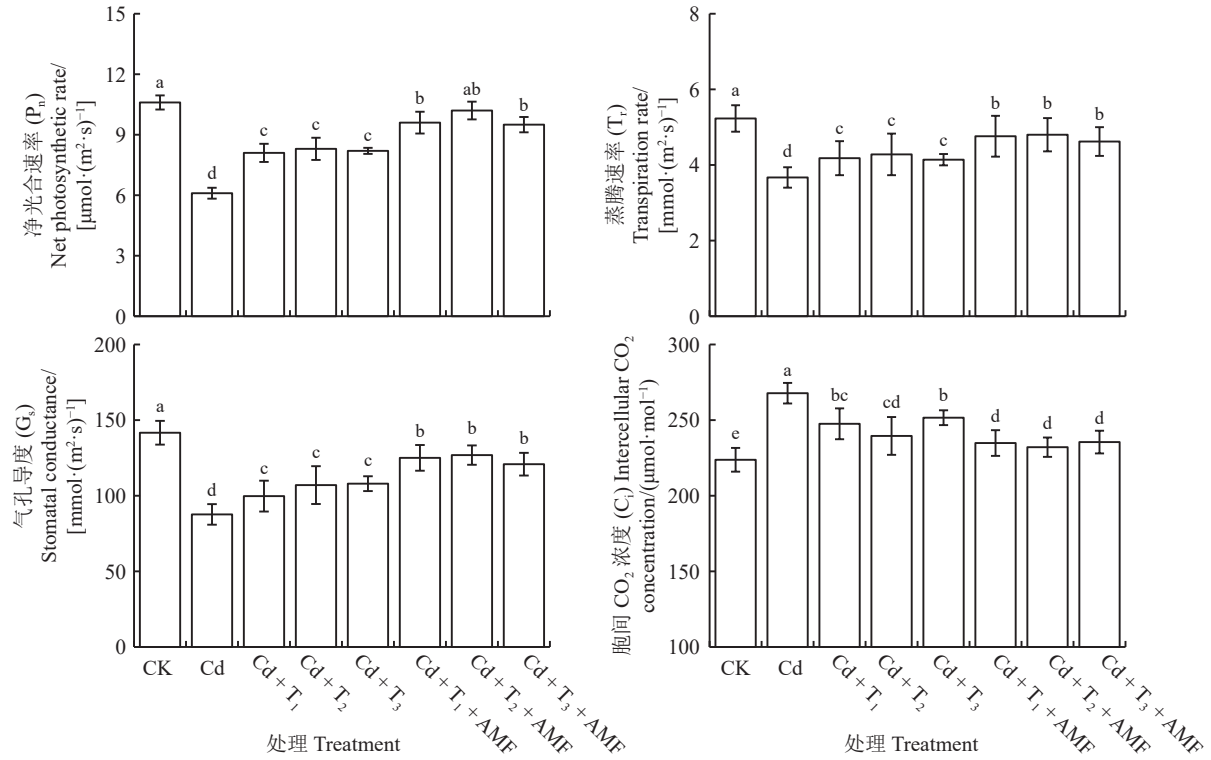


图 2 Cd 污染下纳米二氧化钛和丛枝菌根真菌对萱草气体交换参数的影响

Figure 2 Effects of TiO₂ nanoparticles and arbuscular mycorrhizal fungi on the gas exchange parameters of *Hemerocallis fulva* under cadmium pollution

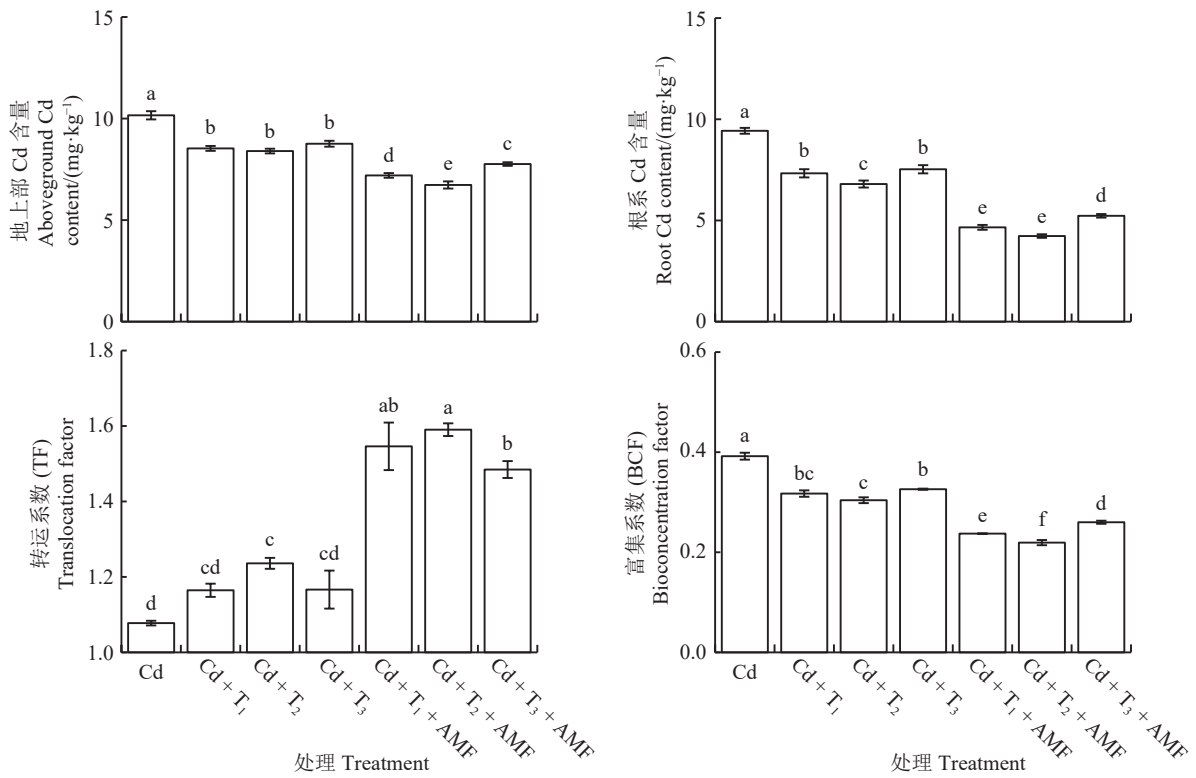


图 3 Cd 污染下纳米二氧化钛和丛枝菌根真菌对萱草吸收和转运 Cd 的影响

Figure 3 Effects of TiO₂ nanoparticles and arbuscular mycorrhizal fungi on the cadmium uptake and transport of *Hemerocallis fulva* under cadmium pollution

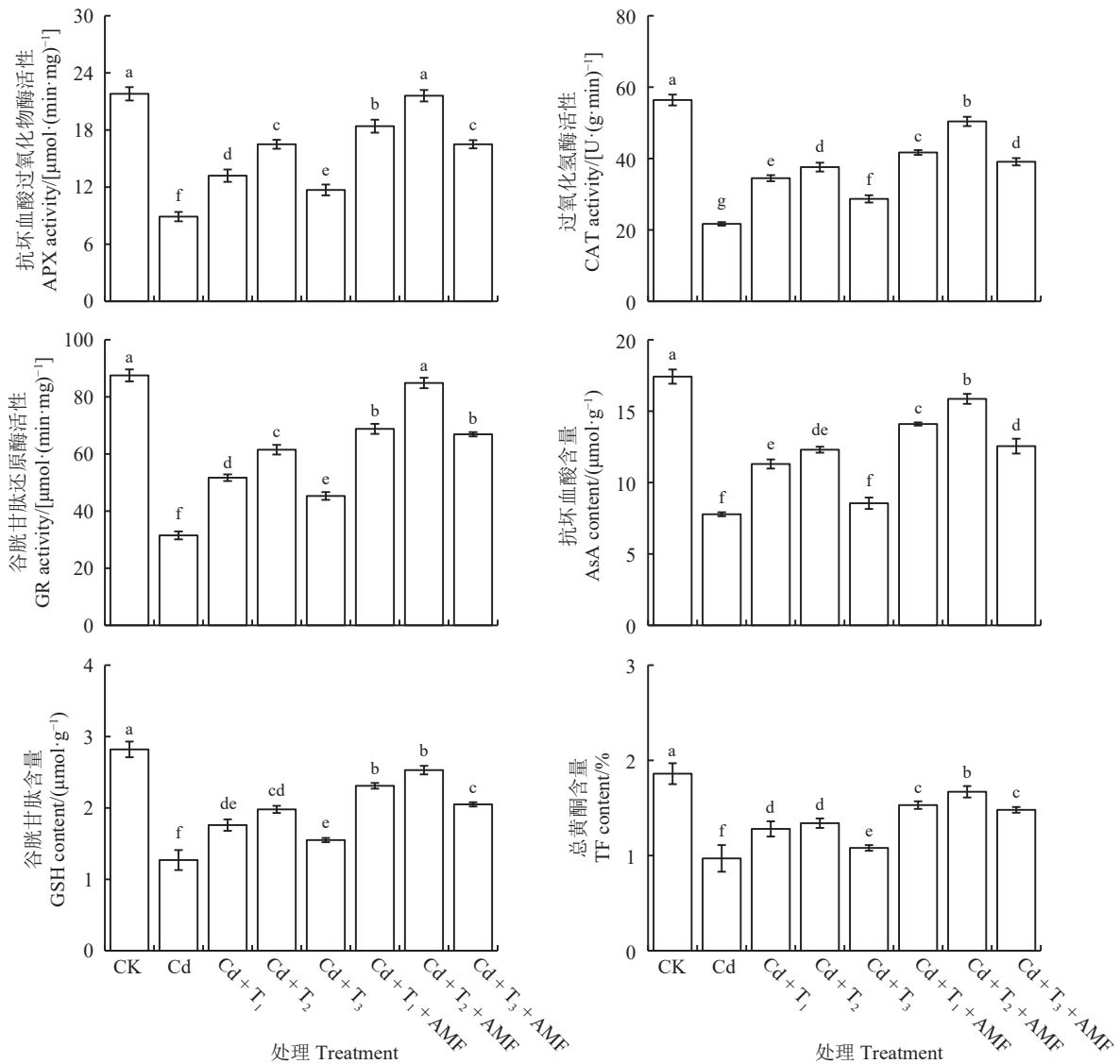


图 4 Cd 污染下纳米二氧化钛和丛枝菌根真菌对萱草抗氧化酶活性和非酶抗氧化剂含量的影响

Figure 4 Effects of TiO_2 nanoparticles and arbuscular mycorrhizal fungi on the antioxidant enzyme activity and non-enzymatic antioxidant content of *Hemerocallis fulva* under cadmium pollution

APX, ascorbate peroxidase; GR, glutathione reductase; GSH, glutathione; CAT, catalase; AsA, ascorbic acid; TF, total flavonoids.

3 讨论与结论

土壤污染是多发性的全球环境问题, 对人类社会的可持续发展造成一定危害。研究发现, 利用植物以及微生物技术是去除土壤中重金属的一种绿色、生态方式。但是植物修复效率仍受制于多种因素, 如生长速率慢, 长势弱, 对重金属吸收、转运效率低等问题, 造成单一修复技术存在一定局限性^[28]。研究发现, 应用菌根真菌或纳米材料能在重金属污染土壤中通过溶解、固定、吸附重金属等方式提高植物修复效率, 并产生次生代谢物质、植物激素等促进植物生长^[29]。Wang 等^[30]发现, AMF 与植物能

够协同作用于重金属污染修复, 对矿质元素在植物与土壤中的迁移转化有重要影响。Leung 等^[31]也发现砷 (As) 胁迫下 AMF 可提高蜈蚣草 (*Pteris vittata*) 生长发育及营养元素积累, 增强植物对 As 胁迫的抗性。而纳米材料的发展与应用也给土壤重金属污染带来了新的修复思路, 得益于其超多活性位点、吸附活性强等优势, 纳米材料在修复土壤重金属污染中的技术越来越重要。秦香^[32]发现铅胁迫下低浓度纳米零价铁能够促进黑麦草 (*Lolium perenne*) 生长, 提高植物生物量和株高, 为吸收和转运铅提供了优势条件。本研究发现 Cd 污染下 TiO_2 NPs 能与 AMF 协同促进萱草生长, 增强其光合作用, 增加

抗氧化酶活性以及抗氧化剂含量来缓解 Cd 带来的伤害, 这在高梦迪等^[25]的研究中证实, TiO₂ NPs 对黑麦草和高羊茅 (*Festuca elata*) 种子萌发和根系的生长具有低促高抑的现象。因此, 选择合适浓度 TiO₂ NPs 和 AMF 对植物—纳米材料—微生物三重修复重金属污染技术具有重要意义。

植物与重金属产生作用时, 植物根系最先损伤, 从而导致植物生长不良。本研究发现, Cd 污染下萱草株高、叶片数、地上部和根系干质量呈显著下降趋势, 添加不同浓度 TiO₂ NPs 或 TiO₂ NPs + AMF 可增加萱草株高、叶片数、地上部和根系干质量。研究发现, 植物细胞通过内吞作用和转运蛋白吸收纳米粒子, 在植物根系中, 纳米粒子借助质外体或同质体运输途径被运送至整株植物并在体内积累, 进而促进植物生长^[33]。多数研究也证实重金属污染下接种 AMF 能够提高植物的生物量, 如 Jiang 等^[34]证实接种 AMF 增加了 Cd 胁迫下忍冬 (*Lonicera japonica*) 的生物量; Wang 等^[35]也证实 Cd 污染下 AMF 能增加龙葵 (*Solanum nigrum*) 的生物量, 且菌根效应随 Cd 浓度增加而不断提高。这可能是因为 AMF 与植物形成的菌根能促进植物对矿质养分 (如 P、N 和 S) 的吸收, 进而促进植物生长^[36]。本研究结果与上述结果一致, 添加不同浓度 TiO₂ NPs 或 TiO₂ NPs + AMF 可增加萱草叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a + b、叶绿素 a/b 和类胡萝卜素含量, 维持叶绿素荧光参数的平衡, 提高光合作用。这可能是因为 TiO₂ NPs 参与了植物叶片中叶绿素合成的关键代谢过程, 这在 Deng 等^[37]的研究中得到证实, 其发现低浓度的纳米氧化铁显著增加了麻类作物的叶绿素含量, 并上调了叶绿素代谢相关的代谢物。而 AMF 通过平衡植物体内源激素的含量变化, 特别是增加细胞分裂素的浓度, 来影响植物细胞的气孔开度, 进而促进光合作用的提高。另有研究证实, 镁是合成叶绿素的必需元素, AMF 与植物根系形成的菌根共生体提高了植物体镁元素的含量, 对植物的光合作用有促进作用^[38]。而本研究下 AMF 是否促进萱草体内镁含量的增加还需进一步研究证实。

大多数研究发现, AMF 能够将重金属固定在植物根系内, 并减小重金属向地上部的转移系数^[39-41]。但是 AMF 对不同植物吸收、转运重金属的作用却不尽相同^[42]。如 Li 等^[43]证实 Cd 胁迫下接种 AMF

能够提高龙葵根系 Cd 浓度, 而减少了地上部 Cd 浓度, 但 Trotta 等^[44]的研究则证实接种 AMF 对蜈蚣草地上部 As 浓度没有影响, 但减少了根系 As 浓度。本研究发现, 添加不同浓度 TiO₂ NPs 或 TiO₂ NPs + AMF 降低了萱草地上部和根系 Cd 含量, 这种降低效应可能与 AMF 通过调节植物根系低分子有机酸的分泌以及植物根系的 Cd 形态来产生的^[45]。而牟玉梅等^[46]则发现 Cd 污染下接种 AMF 的辣椒 (*Capsicum annuum*) 根系富集系数增加, 地上部富集系数和转运系数降低。本研究发现添加不同浓度 TiO₂ NPs 或 TiO₂ NPs + AMF 后萱草转运系数增加, 而富集系数降低。杨聪等^[47]的研究也证实 Cd 污染土壤中施加纳米氢氧化镁、套种黑麦草和接种 AMF 后均不同程度降低了萝卜 (*Raphanus sativus*) 根和地上部 Cd 含量, 且有利于增加土壤的 pH 和阳离子交换量, 纳米氢氧化镁 + AMF + 黑麦草处理的萝卜产量最高, 萝卜根中的 Cd 含量最低, 比单一或两者联合修复技术效果更好。以上研究也说明植物和 AMF 对重金属吸收转运的作用不同, 这可能与植物种类、AMF 种类、重金属类型、重金属浓度、土壤理化性质以及环境条件等多种因素有关。

重金属通过诱导植物产生并积累大量的活性氧自由基, 细胞膜质严重过氧化, 细胞膜结构和功能被破坏, 植物正常生理代谢功能受到损伤^[48]。抗氧化系统作为植物自身抵抗重金属污染的防御系统, 可以通过消除活性氧自由基来保护植物免受重金属带来的伤害, 包括 SOD、CAT、APX 和 GR 等抗氧化酶, 以及非酶抗氧化剂如 AsA、GSH 以及多酚、类黄酮等^[49-50]。谢翔宇等^[51]发现 Cd 胁迫下接种 AMF 的秋茄 (*Kandelia obovata*) SOD、POD、CAT 活性显著增加, 从而能够更快清除活性氧, 减轻 Cd 胁迫下秋茄的膜脂过氧化程度。本研究也证实了这一点, 添加不同浓度 TiO₂ NPs 或 TiO₂ NPs + AMF 均可增加萱草 APX、CAT、GR 活性以及非酶抗氧化剂 AsA、GSH、总黄酮的含量。但王诗琪等^[52]的研究与本研究结论不一致, 其发现低浓度下 CuONPs 可以促进 Cd 胁迫下小油菜 (*Brassica chinensis*) 生长, 抑制小油菜对 Cd 吸收, 但会增加植物氧化损伤, CAT、POD、GR 活性总体上受到抑制。这可能与植物种类以及纳米材料种类等有关, 具体还需进一步研究证实。

综上, Cd 污染下萱草株高、叶片数、地上部和根系干质量均呈显著下降趋势, 光合作用以及叶绿素荧光参数等受到抑制, 抗氧化系统被打破。添加不同浓度的 TiO₂ NPs 或 TiO₂ NPs + AMF 可通过增加萱草叶绿素 a、b、类胡萝卜素含量以及改善叶绿素荧光参数等条件, 进一步提高光合作用, 同时提

高 APX、CAT、GR 活性以及非酶抗氧化剂 AsA、GSH、总黄酮含量来增加植物株高、叶片数以及地上部和地下部生物量, 并通过降低萱草地上部、根系 Cd 含量以及富集系数来缓解 Cd 污染带来的伤害。200 mg·L⁻¹ TiO₂ NPs + AMF 处理可作为修复重金属 Cd 污染的有效途径。

参考文献 References:

- [1] DANIEL S, APEH M C, OKWUTE E S, ALOWAKENNU M, FESOMADE K. Industrial activities and heavy metal pollution: Assessment of concentration of Zn, Cu, Cd Cr and, Pb in soil samples around dangote cement factory Kogi State, Nigeria. *Asian Journal of Chemical Sciences*, 2020, 8(4): 75-86.
- [2] 张敏, 李燕, 宁朋, 程小毛, 黄晓霞. 镉胁迫对八角金盘生长及生理特性的影响. *分子植物育种*, 2023, 21(3): 978-987.
ZHANG M, LI Y, NING P, CHENG X M, HUANG X X. Effects of cadmium stress on growth and physiological characteristics of *Fatsia japonica*. *Molecular Plant Breeding*, 2023, 21(3): 978-987.
- [3] WANG G, SU M Y, CHEN Y H, LIN F F, LUO D, GAO S F. Transfer characteristics of cadmium and lead from soil to the edible parts of six vegetable species in southeastern China. *Environmental Pollution*, 2006, 144(1): 127-135.
- [4] SAVIC R, ONDRASEK G, DUNDJERSKI J J. Heavy metals in agricultural landscapes as hazards to human and ecosystem health: A case study on zinc and cadmium in drainage channel sediments. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(3): 466-470.
- [5] 林小兵, 何绍浪, 吴多基, 周利军, 武琳, 彭君, 黄尚书, 王斌强, 黄欠如, 吴建富. 不同程度镉污染农田中粉葛镉富集转运特征. *环境科学*, 2023, 44(10): 5769-5778.
LIN X B, HE S L, WU D J, ZHOU L J, WU L, PENG J, HUANG S S, WANG B Q, HUANG Q R, WU J F. Characteristics of cadmium concentration and transport of *Pueraria thornsonii* in farmland with different cadmium pollution degrees. *Environmental Science*, 2023, 44(10): 5769-5778.
- [6] 李伟, 郭绍霞, 邢丽君, 翟彦霖, 李文彬, 李敏, 刘润进. 丛枝菌根真菌与高羊茅协同修复镉污染土壤. *菌物学报*, 2021, 40(10): 2785-2799.
LI W, GUO S X, XING L J, ZHAI Y L, LI W B, LI M, LIU R J. Synergistic utilization of arbuscular mycorrhizal fungi and *Festuca elata* for remediating cadmium-contaminated soils. *Mycosystema*, 2021, 40(10): 2785-2799.
- [7] BORREGO M M, METSIS M, LANDA B B. Arbuscular mycorrhizal fungi associated with the olive crop across the andalusian landscape: Factors driving community differentiation. *PLoS One*, 2014, 9(5): e96397.
- [8] KONG L J, CHEN X, YERGER E H, LI Q, CHEN F X, XU H Y, ZHANG F J. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance the growth of the exotic species *Ambrosia artemisiifolia*. *Journal of Plant Ecology*, 2022, 15(3): 581-595.
- [9] 王邵军, 李雾航, 陆梅, 张哲, 李少辉, 陈闽昆, 曹润. “AM 真菌—根系—土壤”耦合作用机制研究进展. *中南林业科技大学学报*, 2019, 39(12): 1-9.
WANG S J, LI J H, LU M, ZHANG Z, LI S H, CHEN M K, CAO R. Advance on the mechanism of coupling interactions among AM fungi, roots and soils. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2019, 39(12): 1-9.
- [10] KOZIOL L, MCKENNA T P, CREWS T E, BEVER J D. Native arbuscular mycorrhizal fungi promote native grassland diversity and suppress weeds 4 years following inoculation. *Restoration Ecology*, 2023, 31(4): e13772.
- [11] PAN J, CAO S, XU G F, REHMAN M, LI X, LUO D J, WANG C J, FANG W Q, XIAO H P, LIAO C J, CHEN P. Comprehensive analysis reveals the underlying mechanism of arbuscular mycorrhizal fungi in kenaf cadmium stress alleviation. *Chemosphere*, 2023, 314: 137566.
- [12] ASLAM U, AHMAD I, HUSSAIN M, KHAN A. Effect of heavy metal pollution on mineral absorption in sunflower (*Helianthus annuus* L.) hybrids. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2014, 36(1): 101-108.

- [13] GAO Y, AN T, KUANG Q. The role of arbuscular mycorrhizal fungi in the alleviation of cadmium stress in cereals: A Multilevel Meta-analysis. *The Science of the Total Environment*, 2023, 902: 166091.
- [14] HRISTOZKOVA M, GENEVA M P, STANCHEVA I, BOYCHINOVA M. Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi in attenuation of heavy metal impact on *Calendula officinalis* development. *Applied Soil Ecology*, 2016, 101: 57-63.
- [15] 刘晓宇, 张雪薇, 戴昊鸣, 陈斯琳, 王梦华, 张凯悦, 王纪元, 成喜雨, 晏琼. 纳米二氧化钛对生菜的生长效应分析. *热带亚热带植物学报*, 2023, 31(5): 679-685.
- LIU X Y, ZHANG X W, DAI H M, CHEN S L, WANG M H, ZHANG K Y, WANG J Y, CHENG X Y, YAN Q. Analysis on the growth effect of nano titanium dioxide on *Lactuca sativa*. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2023, 31(5): 679-685.
- [16] GOHARI G, MOHAMMADI A, AKBARI A, PANAHIRAD S, DADPOUR M R, FOTOPOULOS V, KIMURA S. Titanium dioxide nanoparticles (TiO₂ NPs) promote growth and ameliorate salinity stress effects on essential oil profile and biochemical attributes of *Dracocephalum moldavica*. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 57794.
- [17] 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. *Journal of Environmental Management*, 2016, 170: 88-96.
- [18] 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. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(6): 1217-1224.
- ZHENG Z Q, LI J T, WU J N, LIAN J P, SHI R Y, LIU W T. Impact of titanium dioxide nanoparticles on cadmium uptake in maize seedlings and its phytotoxicity. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(6): 1217-1224.
- [19] 张杨杨, 李希铭, 高鹏, 宋桂龙. 不同浓度镉胁迫下 6 种草本植物的耐性及富集特征的比较. *草地学报*, 2021, 29(6): 1265-1276.
- ZHANG Y Y, LI X M, GAO P, SONG G L. Comparison of tolerance and enrichment characteristic for six herbaceous plant under different levels Cd stress. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(6): 1265-1276.
- [20] 张金洋, 王定勇, 李楚娴, 张成, 梁丽, 周雄. 纳米 TiO₂ 对土壤重金属释放及形态变化的影响. *环境科学*, 2016, 37(5): 1946-1952.
- ZHANG J Y, WANG D Y, LIU C X, ZHANG C, LIANG L, ZHOU X. Effects of Nano-TiO₂ on Release and speciation changes of aluminum, iron and manganese in soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 37(5): 1946-1952.
- [21] GUNATHILAKA D N M, YAPA P N, HETTIARACHCHI R P. Arbuscular mycorrhizal fungi assisted cadmium removal by water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) in polluted soil and water. *Proceedings of International Forestry and Environment Symposium*, 2018, 22: 3461.
- [22] 杨丹, 刘燕, 刘勇. 4 种园林植物修复河道疏浚底泥中重金属污染的试验研究. *江苏农业科学*, 2018, 46(4): 224-227.
- YANG D, LIU Y, LIU Y. Experimental study on phytoremediation of heavy metal pollution in dredged sewage river sediment by four ornamental species. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(4): 224-227.
- [23] 关梦茜, 周旭丹, 董然. Cu-Cd 复合胁迫对 2 种萱草生长与抗氧化酶活性的影响. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(4): 128-134.
- GUAN M X, ZHOU X D, DONG R. Effects of Cu-Cd combined pollution on growth and antioxidant enzyme activity of 2 *Hemerocallis fulva* varieties. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2015, 43(4): 128-134.
- [24] 李凝玉, 卢焕萍, 李志安, 庄萍, 丘静. 籽粒苋对土壤中镉的耐性和积累特征. *应用与环境生物学报*, 2010, 16(1): 28-32.
- LI N Y, LU H P, LI Z A, ZHUANG P, QIU J. Tolerance and accumulation of cadmium in soil by *Amaranthus hypochondriacus* L. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2010, 16(1): 28-32.
- [25] 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. *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 of germination and growth physiology of the two herbs. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2020, 38(4): 69-74.
- [26] 王文杰, 贺海升, 关宇, 李文馨, 张衷华, 祖元刚. 丙酮和二甲基亚砷法测定植物叶绿素和类胡萝卜素的方法学比较. *植物研究*, 2009, 29(2): 224-229.
- WANG W J, HE H S, GUAN Y, LI W X, ZHANG Z H, ZU Y G. Methodological comparison of chlorophyll and carotenoids

- contents of plant species measured by dmsO and acetone-extraction methods. *Bulletin of Botanical Research*, 2009, 29(2): 224-229.
- [27] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000.
LI H S. Principles and Techniques of Plant Physiological and Biochemical Experiments. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [28] LIU H, YUAN M, TAN S Y, YANG X P, LAN Z, JIANG Q Y, YE Z H, JING Y X. Enhancement of arbuscular mycorrhizal fungus (*Glomus versiforme*) on the growth and Cd uptake by Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum*. *Applied Soil Ecology*, 2015, 89: 44-49.
- [29] XIE Y, BU S H, FENG Q J, WASSIE M, AMEE M, JIANG Y, BI Y F, HU L X, CHEN L. Identification of Cd-resistant microorganisms from heavy metal-contaminated soil and its potential in promoting the growth and Cd accumulation of bermudagrass. *Environmental Research*, 2021, 200: 111730.
- [30] WANG G, WANG L, MA F, YOU Y, WANG Y, YANG D. Integration of earthworms and arbuscular mycorrhizal fungi into phytoremediation of cadmium-contaminated soil by *Solanum nigrum* L. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 389: 121873.
- [31] LEUNG H M, LEUNG A O, YE Z H, CHEUNG K C, YUNG K K L. Mixed arbuscular mycorrhizal (AM) fungal application to improve growth and arsenic accumulation of *Pteris vittata* (As hyperaccumulator) grown in As-contaminated soil. *Chemosphere*, 2013, 92(10): 1367-1374.
- [32] 秦香. 纳米零价铁强化黑麦草修复铅污染底泥的效果及其影响研究. 长沙: 湖南大学硕士学位论文, 2018.
QIN X. Effects of nanoscale zero-valent iron assisted phytoremediation of Pb by *Lolium perenne* in sediment. Master Thesis. Changsha: Hunan University, 2018.
- [33] WANG J, WU H, WANG Y, YE W, KONG X, YIN Z. Small particles, big effects: How nanoparticles can enhance plant growth in favorable and harsh conditions. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2024, <https://doi.org/10.1111/jipb.13652>.
- [34] JIANG Q Y, ZHUO F, LONG S H, ZHAO H D, YANG D J, YE Z H, LI S S, JING Y X. Can arbuscular mycorrhizal fungi reduce Cd uptake and alleviate Cd toxicity of *Lonicera japonica* grown in Cd-added soils. *Scientific Reports*, 2016, 6: 21805.
- [35] WANG G, WANG L, MA F, YANG D G, YOU Y Q. Earthworm and arbuscular mycorrhiza interactions: Strategies to motivate antioxidant responses and improve soil functionality. *Environmental Pollution*, 2021, 272: 115980.
- [36] 赵斌, 陈秀华. 接种 AM 真菌对 Cu 污染土壤中紫云英吸收 N P K 的影响. 农业环境科学学报, 2005, 24(3): 438-441.
ZHAO B, CHEN X H. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on uptake of N, P and K by *Astragalus sinicus* L. in copper polluted soil. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(3): 438-441.
- [37] DENG C H, TANG Q, YANG Z M, DAI Z G, CHENG C H, XU Y, CHEN X J, ZHANG X Y, SU J G. Effects of iron oxide nanoparticles on phenotype and metabolite changes in hemp clones (*Cannabis sativa* L.). *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2022, 16(10): 134.
- [38] 王倡宪, 秦岭, 冯固, 李晓林. 三种丛枝菌根真菌对黄瓜幼苗生长的影响. 农业环境科学学报, 2003, 22(3): 301-303.
WANG C X, QIN L, FENG G, LI X L. Effects of three arbuscular mycorrhizal fungi on growth of cucumber seedlings. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(3): 301-303.
- [39] TAN S Y, JIANG Q Y, ZHUO F, LIU H, WANG Y T, LI S S, YE Z H, JING Y X. Effect of inoculation with *Glomus versiforme* on cadmium accumulation, antioxidant activities and phytochelatins of *Solanum photeinocarpum*. *PLoS One*, 2015, 10(7): e0132347.
- [40] 孔凡美, 史衍玺, 冯固, 李晓林, 许鹏亮. AM 菌对三叶草吸收、累积重金属的影响. 中国生态农业学报, 2007, 15(3): 92-96.
KONG F M, SHI Y X, FENG G, LI X L, XU P L. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on heavy metal tolerance of clover in contaminated soil. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(3): 92-96.
- [41] 刘琛, 郭彬, 林义成, 傅庆林, 李凝玉. 丛枝菌根真菌对金叶六道木镉吸收及根际真菌群落结构的影响. 土壤学报, 2021, 58(2): 495-504.
LIU C, GUO B, LIN Y C, FU Q L, LI N Y. Impacts of arbuscular mycorrhizal fungus enhancing *Abelia grandiflora* 'Francis Mason' Cd uptake on rhizospheric fungal communities. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(2): 495-504.
- [42] 黄炜, 黄仁华, 陈珂, 陆云梅, 杨会玲. AMF 对宿根高粱抗氧化特性及镉富集能力的影响. 环境科学与技术, 2014, 37(3): 12-17.
HUANG W, HUANG R H, CHEN K, LU Y M, YANG H L. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on antioxidant properties and accumulation capability for Cs of *Sorghum halepense*. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(3): 12-17.

- [43] LI H, LI X, XIANG L, ZHAO H M, WONG M H. Phytoremediation of soil co-contaminated with Cd and BDE-209 using hyperaccumulator enhanced by AM fungi and surfactant. *Science of the Total Environment*, 2018, 613/614: 447-455.
- [44] TROTTA A, FALASCHI P, CORNARA L, MINGANTI V, FUSCONI A, DRAVA G, BERTA G. Arbuscular mycorrhizae increase the arsenic translocation factor in the As hyperaccumulating fern *Pteris vittata* L. *Chemosphere*, 2006, 65(1): 74-81.
- [45] 陈嘉欣, 颜洁, 游义红, 李博, 和成忠, 涂春霖, 湛方栋. AMF 对玉米生长、根系低分子有机酸分泌与 Cd 累积的影响. *农业资源与环境学报*, 2023, 40(6): 1329-1338.
- CHEN J X, YAN J, YOU Y H, LI B, HE C Z, TU C L, ZHAN F D. Effects of AMF on growth, low-molecular-weight organic acids secreted by roots, and Cd uptake in maize. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(6): 1329-1338.
- [46] 牟玉梅, 邢丹, 周鹏, 宋拉拉, 吴康云, 胡明文, 盖霞普. 接种丛枝菌根真菌对辣椒积累转运镉的影响. *南方农业学报*, 2021, 52(1): 172-179.
- MOU Y M, XING D, ZHOU P, SONG L L, WU K Y, HU M W, GAI X P. Effects of the arbuscular mycorrhizal fungi on cadmium accumulation and transport in *Capsicum annum* L. *Journal of Southern Agriculture*, 2021, 52(1): 172-179.
- [47] 杨聪, 陈胜伦, 刘豫, 金卓君, 张春来, 徐卫红. 纳米氢氧化镁, 黑麦草套种和丛枝菌根对萝卜 Cd 含量和土壤 Cd 化学形态及微生物数量的影响. *农学学报*, 2019, 9(7): 37-43.
- YANG C, CHEN S L, LIU Y, JIN Z J, ZHANG C L, XU W H. Effects of nano-magnesium hydroxide, ryegrass and arbuscular mycorrhiza on radish cd concentration and soil cd chemical forms and microbial populations. *Journal of Agriculture*, 2019, 9(7): 37-43.
- [48] 孙珂珂, 胡亚, 邓文彬, 刘宇称, 唐婷. 植物响应高锰胁迫的研究进展. *植物学研究*, 2019, 8(6): 445-453.
- SUN K K, HU Y, DENG W B, LIU Y C, TANG T. Advances in research on the response of plants to high manganese stress. *Botanical Research*, 2019, 8(6): 445-453.
- [49] 刘振国, 王天慧, 王伟. 纳米氧化铜 (CuO NPs) 对紫花苜蓿幼苗根系活性氧 (ROS)、抗氧化酶活性和根系活力的影响. *生态毒理学报*, 2016, 11(5): 117-124.
- LIU Z G, WANG T H, WANG W. Effects of CuO NPs on ROS, antioxidant enzyme activity and root activity of the alfalfa seedlings. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2016, 11(5): 117-124.
- [50] 屈雁朋, 房玉林, 刘延琳, 宋士仁, 张昂, 周光荣. 镉胁迫下接种 AM 真菌对葡萄次生代谢酶活性的影响. *西北林学院学报*, 2009, 24(5): 101-105.
- QU Y P, FANG Y L, LIU Y L, SONG S R, ZHANG A, ZHOU G R. Effects of AM fungal on the secondary metabolites of grape under cadmium stress. *Journal of Northwest Forestry University*, 2009, 24(5): 101-105.
- [51] 谢翔宇, 翁铂森, 赵素贞, 严重玲. Cd 胁迫下接种丛枝菌根真菌对秋茄幼苗生长与抗氧化酶系统的影响. *厦门大学学报 (自然科学版)*, 2013, 52(2): 244-253.
- XIE X Y, WONG B S, ZHAO S Z, YAN Z Q. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation and Cd stress on the growth and antioxidant enzyme system of *Kandelia obovata*. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2013, 52(2): 244-253.
- [52] 王诗琪, 孙约兵, 黄青青, 徐应明, 董如茵, 孟庆尧. 纳米氧化铜对镉胁迫下小油菜生理生化和重金属累积的影响. *环境科学*, 2023, 44(9): 5204-5213.
- WANG S Q, SUN Y B, HUANG Q Q, XU Y M, DONG R Y, MENG Q Y. Effects of nano-copper oxide on physiobiochemical properties of *Brassica chinensis* L. and its heavy metal accumulation under cadmium stress. *Environmental Science*, 2023, 44(9): 5204-5213.

(责任编辑 王芳)