

# AM 真菌对 Pb 污染土壤中紫藤生长及其生理的影响

汪结明, 彭虹云, 李瑞雪\*

湖南科技大学建筑与设计学院, 湖南湘潭 411201

**摘要:** 为探究丛枝菌根 (AM) 真菌对紫藤 (*Wisteria sinensis*) 扦插苗抗铅 (Pb) 胁迫的影响及其生理机理, 以接种摩西斗管囊霉 (*Funneliformis mosseae*) 的紫藤扦插苗为材料, Pb 污染浓度设置为 400、800、1200 mg/kg, 通过盆栽模拟试验, 测定紫藤幼苗相关生长指标 (生长量、生物量、耐性指数) 和生理指标 (叶绿素含量、丙二醛含量、脯氨酸含量、相关抗氧化酶活性)。结果表明: 接种 AM 真菌能促进紫藤幼苗的地上部和根系生长, 并提高紫藤对 Pb 的耐受性。转移系数以及地上部的富集系数低于 CK, 根系富集系数均高于 CK, 表明 AM 真菌降低了紫藤地上部的 Pb 含量并显著提高紫藤根系对 Pb 的富集能力。生理机制分析发现, 在 AM 真菌作用下, 紫藤叶片的叶绿素含量、超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 等抗氧化酶活性均高于 CK, 丙二醛 (MDA) 积累量显著低于 CK。主成分分析和聚类热图分析也显示, AM 真菌主要通过激活抗氧化酶活性, 调控相关生长指标及叶绿素合成途径来增强紫藤对 Pb 胁迫的耐受能力。该研究结果为菌根化植物修复重金属污染提供理论与实践依据。

**关键词:** 丛枝菌根真菌; 紫藤; Pb 胁迫; 生理机理

中图分类号: X53 文献标志码: A

## Effects of AM Fungi on *Wisteria sinensis* to Pb Stress and Its Physiological Mechanism

WANG Jieming, PENG Hongyun, LI Ruixue\*

School of Architecture and Design, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China

**Abstract:** A controlled experiment was conducted using *Wisteria sinensis* seedlings inoculated with *Funneliformis mosseae* to investigate the effects and physiological mechanisms of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on the Pb stress tolerance of *W. sinensis* seedlings. Pb contamination gradients were established (400, 800, 1200 mg/kg) to measure the growth parameters (growth, biomass, tolerance index) and physiological indicators (chlorophyll content, malondialdehyde content, proline content and related antioxidant enzyme activities). AM fungi inoculation significantly enhanced both aerial and root growth of *W. sinensis* seedlings while improving the Pb stress tolerance. The translocation factor and shoot bio-concentration factor were lower than those of the control, whereas the root bio-concentration factor exceeded the level of the control groups. This demonstrated that AM fungi effectively reduced Pb accumulation in the aerial parts while significantly enhancing Pb sequestration capacity in the roots. Physiological analysis indicated that AM fungi-treated seedlings exhibited higher chlorophyll content and elevated the activities of antioxidant enzymes (SOD, POD, APX), along with significantly lower MDA accumulation compared to the non-inoculated controls. Principal component analysis combined with cluster heat-map visualization further demonstrated that AM fungi primarily enhanced the Pb tolerance of *W. sinensis* through three mechanisms: activation of antioxidant enzyme systems, regulation of growth-related processes, and modulation of chlorophyll biosynthesis pathways. The results provide theoretical and practical basis for mycorrhizal plant remediation of heavy metal pollution.

**Keywords:** AM fungi; *Wisteria sinensis*; Pb stress; physiological mechanism

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.08.015

收稿日期 2025-02-28; 接受日期 2025-05-08

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 31960327); 教育部人文社会科学研究规划基金项目 (No. 24YJAZH144)。

作者简介 汪结明 (1977—), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 园林植物应用。\*通信作者 (Corresponding author): 李瑞雪 (LI Ruixue), E-mail: 498623839@qq.com。

废弃矿山中残留的铅 (Pb) 在土壤中具有较强的生物累积性, 能够通过植物根系吸收进入植物体内, 进而影响植物的正常生长和发育<sup>[1]</sup>。铅可通过生物放大效应沿食物链传递, 最终在人体形成剂量依赖性蓄积, 危害人体健康<sup>[2]</sup>。研究表明, 铅胁迫还会抑制植物的光合作用, 降低叶绿素含量, 影响植物的光能转化效率, 在高浓度铅胁迫下, 植物的生长受到显著抑制, 表现为植株矮小、叶片发黄甚至枯萎<sup>[3]</sup>。因此, 铅污染对生态系统和人类健康造成了严重威胁。传统的重金属尾矿污染土壤治理方法工作量大, 成本高、效率低<sup>[4]</sup>。随着生态园林城市建设的加快推进, 利用兼具观赏性的超富集园林植物修复重金属污染土壤, 是一种绿色高效的生态治理方法。该方法安全高效、成本低且不产生二次污染, 既能满足城市生态景观建设的需求, 又能达到减轻重金属对环境的危害的目的, 已成为研究热点<sup>[5]</sup>。

丛枝菌根 (arbuscular mycorrhizal, AM) 真菌是一类广泛存在于自然生态系统中与植物根系形成共生关系的微生物, 能够显著增强植物对重金属胁迫的耐受性<sup>[6]</sup>。有助于宿主植物扩大根系, 刺激菌根分泌抗氧化物质来抵御重金属污染的胁迫, 同时促进植物吸收营养元素<sup>[7]</sup>。已有研究表明, 部分真菌不仅对植物具有促生效应, 还能通过分泌活性物质来优化植物的生理机制以提高其修复污染的效率<sup>[8]</sup>。研究发现, 王族海棠 (*Malus 'Royalty'*) 在接种 AM 真菌后, 显著减少铅胁迫对植株生长的抑制, 并且光合作用增强<sup>[9]</sup>。金盏菊 (*Calendula officinalis* L.) 在接种 AM 真菌后, 富集重金属的能力也有所增强<sup>[10]</sup>。然而利用 AM 真菌联合植物进行土壤重金属修复, 主要集中在 Cd<sup>[11]</sup>、Mn<sup>[12]</sup>、Zn<sup>[13]</sup>等方面, 而较少有关联合观赏藤本植物进行 Pb 污染修复的研究报道。紫藤 (*Wisteria sinensis*) 是豆科木质藤本植物, 具有生长迅速、生物量大、寿命长、观赏性强、适应能力强等优点。周敏等<sup>[14]</sup>研究发现, 紫藤对 Pb 有较强的富集能力, 在 Pb 污染土壤修复方面具有较好的应用潜能。因此, 利用丛枝菌根真菌与紫藤的联合修复技术为重金属污染土壤的修复提供了新的可能性。本研究以紫藤为研究对象, 在接种 AM 真菌后进行不同 Pb 浓度处理, 以探究 AM 真菌对紫藤幼苗 Pb 富集和转运的影响及其生理机制, 为菌根化植物修复重金属污染土壤提供理论与实践依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试材料为紫藤扦插苗, 取自湖南湘潭仁芳园艺场。

供试土壤为红壤, 取自湖南科技大学生物园植物繁育基地园土, 土壤基本理化性质: pH 为 5.59, Pb 含量为 39.54 mg/kg, 全氮含量为 1.72 g/kg, 速效氮含量为 97.30 mg/kg, 速效磷含量为 20.50 mg/kg, 速效钾含量为 81.30 mg/kg。

供试菌株为丛枝菌根真菌摩西斗管囊霉 (*Funneliformis mosseae*), 来自亚热带丛枝菌根真菌资源保藏中心, 由湖南科技大学生态实验室采用白三叶草 (*Trifolium repens* L.) 作为宿主植物扩繁。接种物为菌丝、孢子和菌根, 活性孢子含量为每克 15 个, 菌丝侵染率为 61%。

### 1.2 方法

1.2.1 试验设计 湘潭重金属矿区土壤中的 Pb 平均浓度为 401.15 mg/kg<sup>[15]</sup>, 综合污染指数达 5 级, 为重度污染<sup>[16]</sup>。采用双因素完全随机区组设计。采用模拟 Pb 污染土壤培养, 将繁育基地园土粉碎风干过 5 mm 筛, 以液态形式加入 Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 分析纯, 以不加 Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 的园土基质作为空白对照 (T<sub>0</sub>)。在前期预试验的基础上, 设置 3 个 Pb 污染土壤浓度: 400、800、1200 mg/kg, 编号依次为 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>。将不同污染浓度的灭菌园土基质装入花盆中, 在土壤深度为 10 cm 处平铺 50 g 丛枝菌根真菌菌剂 (AM), 选择同期扦插的生长健壮、长势一致的紫藤扦插苗, 分别移栽至盆中, 再覆园土, 各浓度处理均设置不加菌剂为对照 (CK), 即共 8 个处理: CK-T<sub>0</sub>、AM-T<sub>0</sub>、CK-T<sub>1</sub>、AM-T<sub>1</sub>、CK-T<sub>2</sub>、AM-T<sub>2</sub>、CK-T<sub>3</sub>、AM-T<sub>3</sub>。利用原子吸收分光光度计 (AA-70000, Shimadzu, 日本) 检测到 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 土壤中的实测 Pb 浓度分别为 397.87、795.96、1193.65 mg/kg。移栽后定期浇水, 保持土壤湿润。为了减少 Pb 流失, 花盆底部设置托盘并将渗出的水再回补至盆中土壤内。每个处理 5 盆, 每个生物学重复 3 次, 处理 120 d 后进行指标测定。

1.2.2 测定指标及方法 (1) 生长指标。处理 120 d 后, 测定各处理紫藤幼苗植株的主蔓长 (AGL, cm)、地上部生物量 (AGB, g)、根长 (GL, cm)、根生物量 (RW, g)。利用耐性指数 (tolerance index, Ti) 分析 AM 真菌作用下紫藤对 Pb 污染的

耐受能力,耐性指数反映了植物对 Pb 耐受能力的大小。计算公式:  $Ti = \text{处理组植物生长参数} / \text{对照组植物生长参数}$ , 耐性指数为各处理的  $Ti$  均值。

(2) Pb 含量指标。利用原子吸收分光光度计检测紫藤不同部位的 Pb 含量及土壤中的 Pb 含量。利用检测到的 Pb 浓度, 分别计算其 Pb 转运系数 (translocation factors, TF) 及生物富集系数 (bio-concentration factors, BCF), 分析其修复效率, 探讨其转运机制。计算公式:  $TF = \text{地上部平均 Pb 浓度} / \text{根部平均 Pb 浓度}$ ;  $BCF = \text{地上 (地下) 部平均 Pb 浓度} / \text{土壤平均 Pb 浓度}$ 。

(3) 生理生化指标。使用乙醇-丙酮混合溶液浸泡法测定叶绿素含量<sup>[17]</sup>, 包括叶绿素 a (chl.a)、叶绿素 b (chl.b)、总叶绿素含量 (chl.a+b); 采用氮蓝四唑光化还原法测定超氧化物歧化酶 (SOD) 活性; 采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛 (MDA) 含量<sup>[18]</sup>; 采用愈创木酚法测定过氧化物酶 (POD) 活性; 采用抗坏血酸比色法测定抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性<sup>[19]</sup>; 采用试剂盒 (Solarbio, BC0295) 测定脯氨酸 (Pro) 含量。

### 1.3 数据处理

使用 Excel 2020、SPSS 8.0、Origin 2022 等软件整理、分析数据; 利用 Origin 2022 软件绘制图表。

## 2 结果与分析

### 2.1 AM 真菌对 Pb 污染土壤中紫藤生长的影响

2.1.1 紫藤主蔓长和根长 如图 1A、图 1B 所示, 随 Pb 处理浓度的升高, 紫藤扦插苗的主蔓长和根长呈持续下降的趋势, 表明 Pb 对紫藤的生长造成了一定伤害, 且 Pb 浓度越高伤害越大。T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 处理中, 接种 AM 真菌的主蔓长和根长均显著高于 CK, 表明接种 AM 真菌对 Pb 胁迫下的紫藤生长具有显著促进作用。在 AM 真菌作用下各处理植株的主蔓长和根长的下降幅度均小于 CK, T<sub>2</sub> 与 T<sub>1</sub> 处理相比, CK 的主蔓长下降 21.1%, 而 AM 真菌处理仅下降 3.8%。说明接种 AM 真菌提高了紫藤对 Pb 胁迫的耐受性。随着土壤 Pb 污染浓度升高至 1200 mg/kg (T<sub>3</sub>), 植株主蔓长和根长均降至最低, 且下降幅度高于 T<sub>2</sub> 处理, 但 AM 真菌处理后的下降幅度小于 CK, 说明 T<sub>3</sub> 处理时 Pb 污染已对紫藤的生长造成了显著伤害, 但 AM 真菌能缓解 Pb 污染对植株的伤害, 但有一定阈值范围。

2.1.2 紫藤地上部生物量和根生物量 由图 1C、

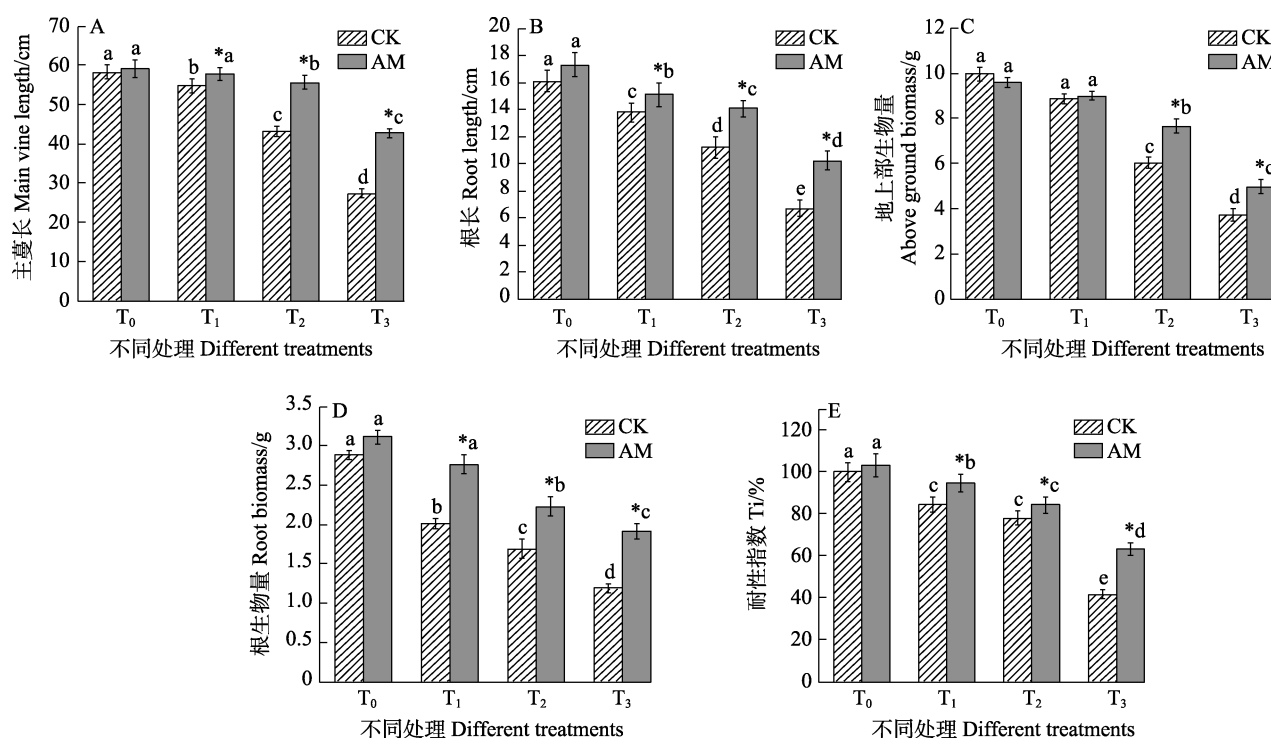
图 1D 可看出, 除 T<sub>0</sub> 处理的紫藤地上部生物量外, 其他不同 Pb 浓度处理接种 AM 真菌的紫藤地上部生物量和根生物量均高于 CK。随着 Pb 处理浓度的增加, 紫藤地上部生物量和根生物量均持续下降。T<sub>2</sub> 处理中接种 AM 真菌的紫藤地上部生物量和根生物量均显著下降, 并且 CK 的地上部生物量和根生物量均显著低于 AM 真菌处理, 表明 T<sub>2</sub> 处理的 Pb 污染未对接种 AM 真菌的紫藤造成显著胁迫, 与 CK 相比, AM 真菌促进了紫藤地上部和根的生长, 分别提高了 26.7% 和 32.0%, 说明 AM 真菌提高了紫藤对 Pb 胁迫的耐受性。T<sub>3</sub> 处理时, 地上部和根生物量均降至最低, 与 T<sub>2</sub> 相比, 其下降幅度均达到显著水平, 说明 T<sub>3</sub> 处理的 Pb 污染浓度已对接种 AM 真菌的紫藤造成了显著伤害, 同时也表明 AM 真菌对提高紫藤的抗 Pb 胁迫的能力是有阈值范围的。

### 2.2 AM 真菌对 Pb 污染土壤中紫藤耐性指数的影响

由图 1E 可知, 紫藤的耐性指数 ( $Ti$ ) 随着 Pb 处理浓度的增加持续下降, 但 AM 真菌作用下各处理  $Ti$  的下降幅度均小于 CK。T<sub>2</sub> 处理中, CK 的耐性指数仅为 78.0%, 而接种 AM 真菌的耐性指数却达到了 84.2%, 表明与 CK 相比, 接种 AM 真菌提高了紫藤对 Pb 污染的耐受性。T<sub>3</sub> 处理中, CK 与 AM 真菌处理的耐性指数均降至最低, 分别为 41.7% 和 63.1%, 说明 1200 mg/kg (T<sub>3</sub>) 的 Pb 污染浓度对接种 AM 真菌的紫藤造成了显著伤害, 表明 AM 真菌提高了紫藤对 Pb 胁迫的耐受能力, 但耐受 Pb 胁迫浓度已达最高值。

### 2.3 AM 真菌对 Pb 污染土壤中紫藤地上部和根系 Pb 含量的影响

由图 2 可看出, 随着 Pb 处理浓度的升高, 紫藤地上部和根系的 Pb 含量均呈先升后降的变化趋势, 表明植株中 Pb 富集量随着 Pb 处理浓度的升高而增加, 但在超过阈值后不会再富集 Pb, 导致 T<sub>3</sub> 处理的植株中 Pb 富集量反而降低。T<sub>2</sub> 处理中, AM 真菌处理的植株地上部和根系的 Pb 含量均显著高于 CK, 分别比 CK 提高了 18.3% 和 31.0%, 说明 AM 真菌提高了紫藤对 Pb 的富集能力, 且根系的富集提高幅度更高。与 T<sub>2</sub> 处理相比, T<sub>3</sub> 处理地上部和根系的 Pb 含量大幅下降, 说明 AM 真菌对提高紫藤对 Pb 的富集能力有一定阈值, 在 T<sub>2</sub> 处理时已基本达到了富集上限。

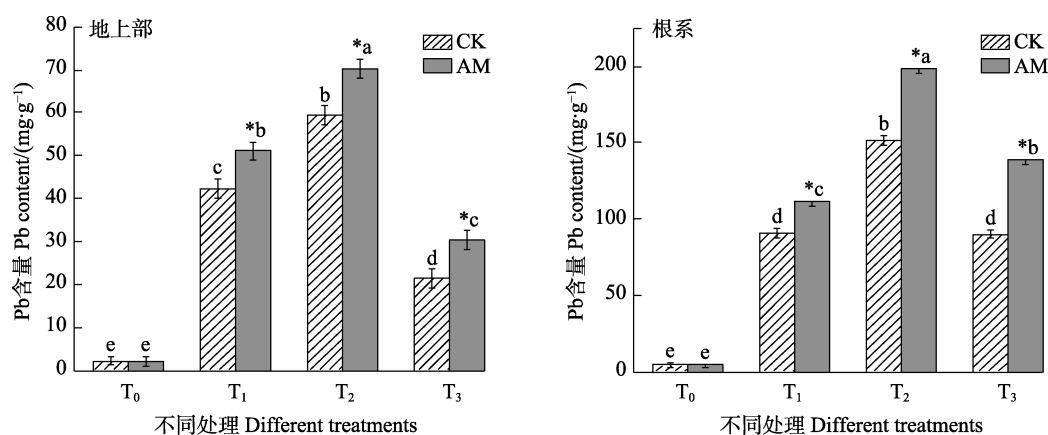


\*表示接种处理与 CK 间差异显著 ( $P < 0.05$ ) ; 不同小写字母表示不同 Pb 浓度处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) 。

\* indicates significant difference between the inoculation treatment and CK ( $P < 0.05$ ); Different lowercase letters indicate significant difference between treatments with different Pb concentrations ( $P < 0.05$ ).

图 1 不同处理紫藤生长指标的变化

Fig. 1 Changes in growth indicators of *W. sinensis* with different treatments



\*表示接种处理与 CK 间差异显著 ( $P < 0.05$ ) ; 不同小写字母表示不同 Pb 浓度处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) 。

\* indicates significant difference between the inoculation treatment and CK ( $P < 0.05$ ); Different lowercase letters indicate significant difference between treatments with different Pb concentrations ( $P < 0.05$ ).

图 2 不同处理紫藤地上部和根系的 Pb 含量

Fig. 2 Pb content in above-ground and root of *W. sinensis* with different treatments

## 2.4 AM 真菌对 Pb 污染土壤中紫藤地上部和根系 Pb 富集系数的影响

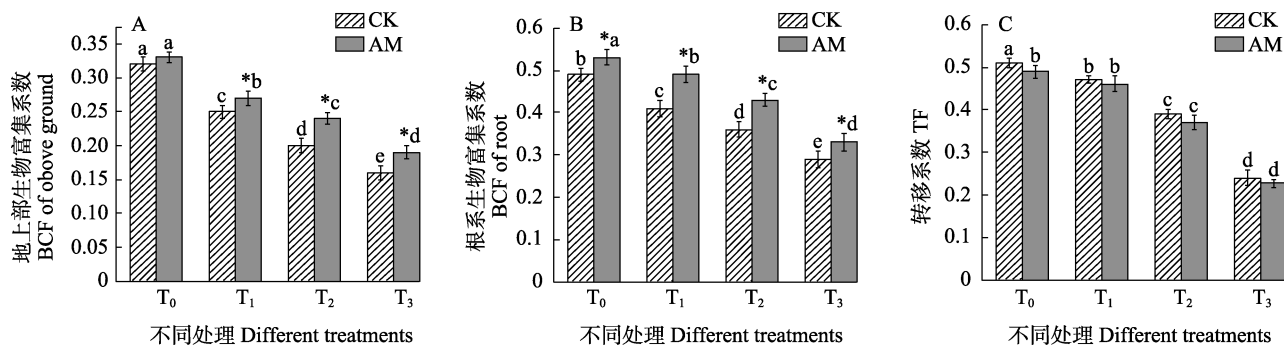
由图 3A、图 3B 可知, 在各 Pb 浓度处理中, 接种 AM 真菌的紫藤扦插苗地上部和根系富集 Pb 的能力均显著高于 CK, T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 处理的提升最大, 分别提高了 19.5% 和 20.0%。随着 Pb 胁迫浓度的

增加, 地上部及根系的 Pb 富集能力逐渐下降, 在 T<sub>3</sub> 时降至最低, 表明 AM 真菌能显著提高紫藤地上部及根系对 Pb 的富集能力。综上, Pb 污染下 AM 真菌处理能够通过增强紫藤地上部及根系的富集能力来减少 Pb 对植株的伤害, 但其富集能力是有阈值范围的。

## 2.5 AM 真菌对 Pb 污染土壤中紫藤地上部和根系 Pb 转移系数的影响

由图 3C 中可知,各处理的转运系数均小于 1,说明各处理对 Pb 的转运能力均尚未达到超富集水平。由 2.3 可知,  $T_1$  处理中, AM 处理的植株

Pb 含量显著上升,并且根系中的上升幅度高于地上部,故转移系数均小于 CK,但差异未达显著水平。说明随着 Pb 处理浓度的升高,接种 AM 真菌提高了紫藤扦插苗的 Pb 富集能力,对根的影响更明显。



\*表示接种处理与 CK 间差异显著 ( $P < 0.05$ ); 不同小写字母表示不同 Pb 浓度处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

\* indicates significant difference between the inoculation treatment and CK ( $P < 0.05$ ); Different lowercase letters indicate significant difference between treatments with different Pb concentrations ( $P < 0.05$ ).

图 3 不同处理紫藤的 Pb 富集系数与转移系数

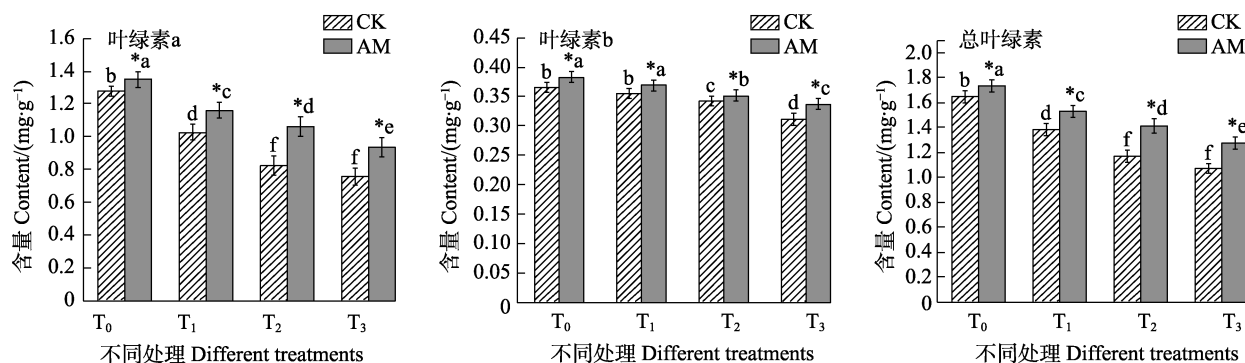
Fig. 3 BCF and TF of Pb in *W. sinensis* with different treatments

## 2.6 AM 真菌对 Pb 污染土壤中紫藤叶片叶绿素含量的影响

由图 4 可以看出,叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量均随着 Pb 处理浓度的升高总体呈下降趋势,说明 Pb 胁迫抑制了紫藤叶绿素的合成。接种 AM 真菌后,各 Pb 浓度处理的叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素含量均显著高于 CK,其中,  $T_2$  处理的总叶绿素含量比 CK 提高了 21.4%,并且  $T_2$  处理的叶绿素 a 与叶绿素 b 含量的比值也明显升高。说明 AM 真菌能显著缓解 Pb 胁迫对紫藤叶绿素合成的抑制。

## 2.7 AM 真菌对 Pb 污染土壤中紫藤叶片生理生化指标的影响

超氧化物歧化酶、过氧化物酶、抗坏血酸过氧化物酶是抗氧化防御系统中重要的保护酶,可以清除植物在生理活动中产生的过多的自由基和过氧化物,从而减轻植物受到的毒害,这些酶的活性水平与植物抗胁迫能力具有一定相关性。如图 5A~图 5C 所示,随着 Pb 处理浓度的升高,紫藤的 3 种抗氧化酶活性均呈先升后降的趋势,并且这 3 种酶的活性在  $T_2$  处理中均达最大值。接种 AM 真菌后,各 Pb 浓度处理的酶活性均高于

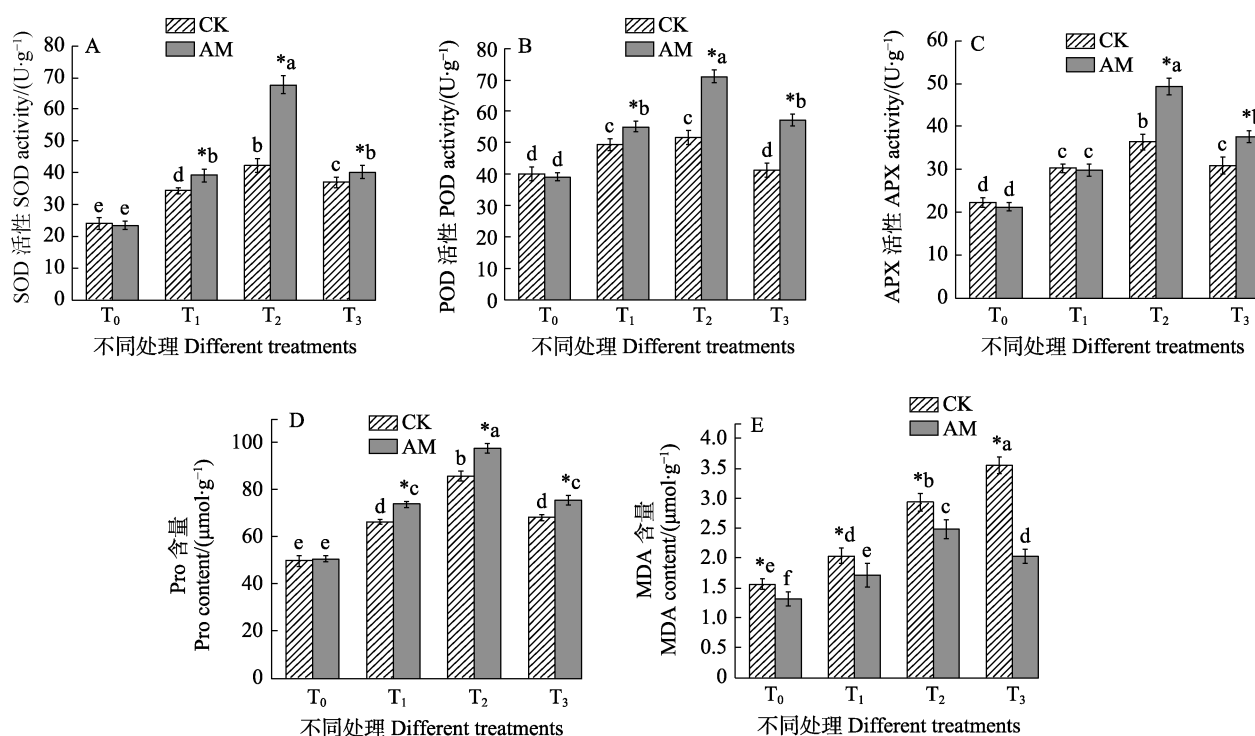


\*表示接种处理与 CK 间差异显著 ( $P < 0.05$ ); 不同小写字母表示不同 Pb 浓度处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

\* indicates significant difference between the inoculation treatment and CK ( $P < 0.05$ ); Different lowercase letters indicate significant difference between treatments with different Pb concentrations ( $P < 0.05$ ).

图 4 不同处理紫藤叶片的叶绿素含量

Fig. 4 Chlorophyll content of *W. sinensis* leaves with different treatments



\*表示接种处理与 CK 间差异显著 ( $P < 0.05$ ) ; 不同小写字母表示不同 Pb 浓度处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) 。

\* indicates significant difference between the inoculation treatment and CK ( $P < 0.05$ ); Different lowercase letters indicate significant difference between treatments with different Pb concentrations ( $P < 0.05$ ).

图 5 不同处理紫藤叶片相关生理生化指标的变化

Fig. 5 Changes in physiological and biochemical indicators of *W. sinensis* leaves with different treatments

CK, 表明 AM 真菌处理显著提高了抗氧化酶防御系统的酶活性, 从而显著提高了紫藤抗 Pb 胁迫的能力。随着 Pb 处理浓度的继续提高, T<sub>3</sub> 处理的酶活性却降低, 这表明 AM 真菌促进紫藤对土壤 Pb 污染的修复效应具有一定阈值。

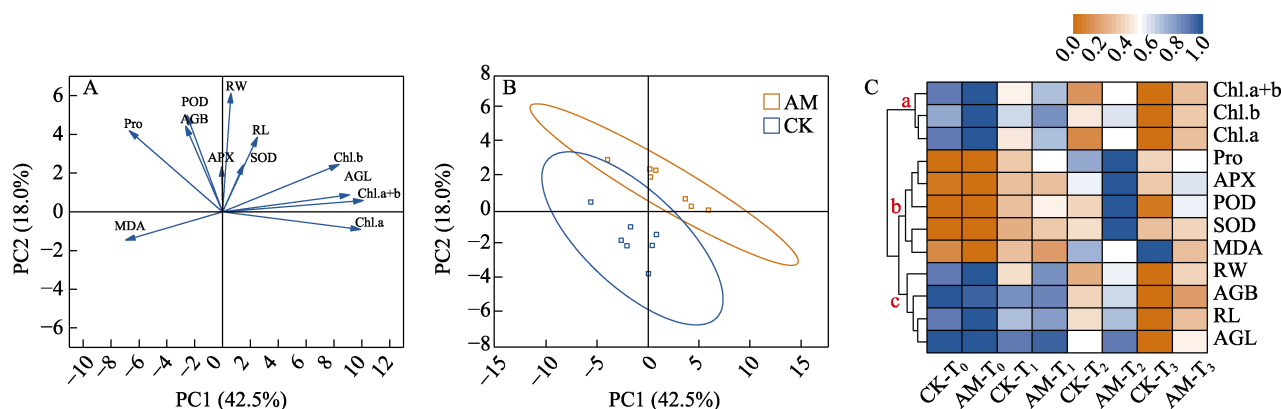
在 Pb 胁迫下, 紫藤扦插苗的脯氨酸含量总体呈先升后降的趋势 (图 5D)。接种 AM 真菌后, 与 CK 比, 各处理的 Pro 含量分别提升了 1.3%、11.5%、14.0%、10.4%。随着 Pb 处理浓度的提高, 紫藤扦插苗的丙二醛含量持续升高, 并在 T<sub>3</sub> 处理中 CK 的 MDA 含量达到最大值 (图 5E), 表明 Pb 浓度越高对紫藤胁迫越强。接种 AM 真菌后, 各处理的 MDA 含量均低于 CK, 且随 Pb 处理浓度的增加, 接种 AM 真菌的各处理呈先升后降的趋势, 而 CK 却显著增加。这表明接种 AM 真菌降低了 MDA 的累积, 减轻了氧化应激, 从而显著提高了紫藤抗 Pb 胁迫的能力。

## 2.8 紫藤生长和生理生化指标的主成分分析和聚类分析

采用主成分分析法 (PCA) 对所有检测指标进行综合分析, 结果发现, 前 2 个主成分 PC1 和

PC2 表达了总方差的 60.5%, 其中 PC1 包括叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、总叶绿素含量、主蔓长、根长、地上部生物量、根生物量; PC2 包括 MDA 含量、SOD 活性、POD 活性、APX 活性、Pro 含量。如图 6A、图 6B 所示, 在不同 Pb 浓度处理下, 接种 AM 真菌处理与 CK 明显地分为两类。这一结果初步表明, 接种 AM 真菌对提高紫藤幼苗抗 Pb 胁迫是有效的。

以皮尔逊相关性为聚类内核进行聚类分析, 如图 6C 所示, 各检测指标被分为 3 簇。a 簇包括总叶绿素含量、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量等指标, b 簇包括 Pro 含量、APX 活性、POD 活性、SOD 活性、MDA 含量等指标, c 簇包括根生物量、地上部生物量、根长、主蔓长等指标。聚类热图中, 颜色的深浅直观反映了不同处理条件下各指标的变化趋势。随着 Pb 胁迫浓度的升高, b 簇的各指标整体呈上升趋势, 表现为颜色由浅到深, 表明紫藤通过提高相关酶活性以缓解 Pb 胁迫的危害。相对地, a 簇和 c 簇中接种 AM 的各项指标的颜色整体上比 CK 深, 表明 AM 真菌能有效提高各项指标从而增强紫藤抗 Pb 胁迫的能力。



A: PCA 荷载图; B: PCA 得分图; C: 聚类热图。

A: PCA load diagram; B: PCA score plot; C: Cluster heatmap.

图 6 接种 AM 真菌和不同浓度 Pb 胁迫下紫藤生长和生理生化指标的 PCA 和聚类热图

Fig. 6 PCA and cluster heatmap of growth and physiological and biochemical indicators of *W. sinensis* under AM inoculation and different Pb concentrations stress

### 3 讨论

#### 3.1 AM 真菌对紫藤 Pb 胁迫的缓解效应

ZANGANEH 等<sup>[20]</sup>研究发现, Pb 污染会抑制株高发育并破坏其抗氧化系统, 从而干扰植物的正常生理过程而引发胁迫反应。本研究也发现在 3 种不同浓度的 Pb 胁迫下, 与不加 Pb 的对照组相比, 紫藤幼苗的生长受到显著抑制, 且随 Pb 处理浓度的提高其生长指标整体呈下降趋势。

HUSSAIN 等<sup>[21]</sup>研究发现, AM 真菌通过促进植物根系生长帮助植物获取土壤中更多的养分, 从而对植株生物量产生有益影响。本研究也发现, 接种 AM 真菌能促进紫藤生长, 但 AM 真菌在不同浓度 Pb 胁迫中的促生效果存在差异, 在 T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 处理中的促生效果更明显。表明 AM 真菌在一定程度上能够缓解 Pb 胁迫对紫藤幼苗生长的抑制作用。该促生效果可能与 AM 真菌促进了紫藤对土壤营养元素的吸收有关, 但具体促进了哪种元素有待后续进一步研究。也可能是植物的一种自我保护机制, 即紫藤在受到 Pb 胁迫后, 在与 AM 真菌作用下通过提高自身生长量和生物量, 以降低 Pb 在植株内的相对浓度, 从而达到保护自己的目的。

AM 真菌对紫藤的 Pb 富集效应产生了重要影响。已有研究表明, AM 真菌可通过降低西芹 (*Apium graveolens* Linn.) 地上部 Cd 含量以及富集系数, 增加根部 Cd 含量, 从而降低转移系数来缓解 Cd 污染带来的损伤, 而且可降低 Cd 污染土壤中植株地上部的 Cd 含量<sup>[7]</sup>。TAN 等<sup>[22]</sup>研究发现, 植株接种 AM 真菌后, 向地上部的重金属

转移系数降低, 使重金属固定在植物根系中。本研究也发现, AM 真菌处理后地上部及根系的 Pb 含量、根系富集系数均高于 CK, 转移系数稍低于 CK, 表明 AM 真菌能显著提高紫藤对 Pb 的富集能力, 且根部富集能力提高的幅度高于地上部。WANG 等<sup>[23]</sup>发现 Cd 污染下接种 AM 真菌能够提高龙葵根系中的 Cd 浓度, 降低地上部的 Cd 浓度。而邱丹<sup>[24]</sup>则研究发现砷 (As) 污染下接种 AM 真菌后, 使 As 主要累积在蜈蚣草的地上部, 降低了根系中的 As 浓度。这可能是由于 AM 真菌对不同植物、不同重金属的转运、富集作用存在差异。

#### 3.2 AM 真菌缓解紫藤生长 Pb 胁迫的生理机制

Pb 胁迫对光系统 I 产生影响, 光合作用的产物由于光合电子传递速率下降无法正常分解运转, 直接影响光捕获能力<sup>[9]</sup>。在对景天三七 (*Sedum aizoon* L.) 的研究中发现, 随着铅离子浓度的增加, 景天三七的叶绿素含量总体呈下降趋势<sup>[25]</sup>。白茅 [*Imperata cylindrica* (L.) P. Beauv.] 在 Pb 胁迫下总叶绿素含量显著降低, 接种 AM 真菌后总叶绿素含量显著提高<sup>[26]</sup>。本研究也发现, 随着 Pb 处理浓度的提高, 叶绿素含量逐渐降低, T<sub>2</sub> 处理的叶绿素总量相较于 CK 显著增加。由此可知, Pb 胁迫抑制了紫藤幼苗叶绿素的合成, 接种 AM 真菌缓解了 Pb 对叶绿素合成的抑制, 但缓解机制有待后续研究。

当植物遭受重金属胁迫时, 由 SOD 和 POD 共同组成的活性氧清除系统被激活, 能够有效抑制氧自由基的积累, 以避免自由基对植物细胞造成潜在的负面效应<sup>[27]</sup>。研究发现, Pb 胁迫增加了

蒺藜 (*Tribulus terrestris* L.) 中超氧负离子及 MDA 含量, 而接种 AM 真菌后, SOD、POD、APX 活性增高<sup>[28]</sup>。Pro 是植物体内重要的渗透调节物质和营养物质, 其含量越高说明植物体的代谢活动越强<sup>[29]</sup>。本研究也发现, 紫藤的 SOD、POD、APX 活性及 Pro 含量均呈先升后降的趋势。表明 AM 真菌在低浓度 Pb 处理时能够通过调节抗氧化酶系统活性以提高植株对 Pb 的耐受性, 但在较高浓度 Pb 胁迫下, 由于植株受胁迫程度过大, 可能导致抗氧化酶系统调节效率下降。紫藤的 MDA 含量也随 Pb 浓度的升高而升高, 与 CK 相比, 接种 AM 真菌后 MDA 含量显著降低, 表明在 Pb 胁迫下, AM 真菌能够降低植物的 MDA 含量, 以缓解 Pb 的毒性, 进一步证实了 AM 真菌对紫藤幼苗抗氧化能力的调控作用, 且这种调控作用因 Pb 浓度的不同而有所差异。

### 3.3 AM 真菌联合紫藤修复土壤 Pb 污染的应用价值

当前铅锌矿区等重金属污染严重的区域, 土壤肥力低下、植被覆盖率低, 传统的修复方法往往难以奏效。紫藤对 Pb 具有一定的富集能力, 与 AM 真菌联合, 紫藤可作为修复 Pb 污染的先锋植物, 可增强生态修复的效果。AM 真菌联合紫藤修复技术可以改善 Pb 污染的土壤质量, 促进植被恢复, 加速土壤生态系统的恢复, 同时也可以发挥紫藤的观赏作用让矿区景观化。因此, 该技术在农业土壤生态修复、矿山公园植物营建、观赏植物菌根化工厂化育苗等方面的应用前景广阔。

尽管 AM 真菌与紫藤的联合修复技术在 Pb 污染土壤的治理中展现出良好的应用前景, 但其实际应用仍存在一定局限性。AM 真菌与紫藤的修复效果易受环境因素的影响, 并且当土壤中的 Pb 浓度超过一定限度时, Pb 会对 AM 真菌和紫藤产生严重的毒害作用, 导致 AM-紫藤共生体的生长受阻, 从而无法达到更高的修复目标, 因此, 为了 AM 真菌与紫藤的联合修复技术的高效应用仍需开展后续深度研究。

## 4 结论

Pd 污染下紫藤植株地上部及其根生长量、生物量呈下降趋势, 叶绿素合成等受到抑制, 抗氧化系统被打破。接种 AM 真菌后紫藤幼苗在 Pb 污染土壤中的生长均高于对照, 表现出良好的促生效果, 显著提升 Pb 污染土壤中紫藤的地上部及

其根生长量、生物量, 并提高了紫藤对 Pb 污染的耐受性。接种 AM 真菌增强了紫藤根系对 Pb 的富集能力。AM 真菌主要通过增强抗氧化酶活性和 Pro 含量, 缓解 Pb 对叶绿素合成的胁迫影响等途径, 有效增强了紫藤幼苗抗 Pb 胁迫的能力, 紫藤接种 AM 真菌的菌-苗联合模式可作为修复重金属 Pb 污染的有效途径。

## 参考文献

- [1] YANG X L, CHEN Y G, LIU W G, HUANG T W, YANG Y, MAO Y Q, MENG Y. Combined transcriptomics and metabolomics to analyse the response of *Cuminum cyminum* L. under Pb stress[J]. *The Science of the Total Environment*, 2024, 923: 171497.
- [2] YANG Y, ZHAO Y, WANG M, MENG H, YE Z. Real-time detection method for heavy metal pollution in soil of mining area[J]. *Global Nest Journal*, 2021, 22(4): 570-578.
- [3] 张金青, 陈金龙, 李凡, 赵炳森, 贾新风, 马晖玲. 草地早熟禾种子萌发和幼苗生长对铅胁迫的适应性[J]. *草地学报*, 2020, 28(1): 130-140.  
ZHANG J Q, CHEN J L, LI F, ZHAO B S, JIA X F, MA H L. Responses of seed germination and seedling growth of *Poa pratensis* to lead stress[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(1): 130-140. (in Chinese)
- [4] 于培鑫, 潘芳慧, 王友保, 李晶. 叶绿醇对铅污染土壤酶活性及土壤铅有效态影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 358-363.  
YU P X, PAN F H, WANG Y B, LI J. Effects of phytol on soil enzyme activity and lead availability in lead contaminated soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5): 358-363. (in Chinese)
- [5] 苗志加, 孟祥源, 李书缘, 马超, 李晴, 安贺鑫, 赵鑫, 赵志瑞. 丛枝菌根真菌修复重金属污染土壤及增强植物耐性研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(2): 252-262.  
MIAO Z J, MENG X Y, LI S Y, MA C, LI Q, AN H L, ZHAO X, ZHAO Z R. Research progress on arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in remediation of heavy metal contaminated soil and enhancement of plant tolerance[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(2): 252-262. (in Chinese)
- [6] 刘润进, 陈应龙. 菌根学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.  
LIU R J, CHEN Y L. *Mycorrhizology*[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [7] 何红君. 丛枝菌根真菌接种对 Cd 胁迫下芹菜生长、生理及富集特征的影响[J]. *东北农业科学*, 2020, 45(3): 70-75.  
HE H J. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on the growth, physiology and accumulation characteristics

- of celery (*Apium graveolens* L.) under cadmium stress[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2020, 45(3): 70-75. (in Chinese)
- [8] SCHWARZOTT D, WALKER C, SCHÜßLER A. *Glomus*, the largest genus of the arbuscular mycorrhizal fungi (Glomales), is nonmonophyletic[J]. Molecular Phylogenetics and Evolution, 2001, 21: 33-38.
- [9] 孙晓刚, 年昊, 殷佳慧, 尹福良, 张烜赫, 唐雪东. 丛枝菌根真菌对铅胁迫下王族海棠生长和光合特性的影响[J]. 山东农业科学, 2022, 54(8): 79-86.
- SUN X G, NIAN H, YIN J H, YIN F L, ZHANG X H, TANG X D. Effects of arbuscular mycorrhiza fungi on growth and photosynthetic characteristics of *Malus 'Royalty'* under lead stress[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2022, 54(8): 79-86. (in Chinese)
- [10] LEI L L, ZHU Q Y, XU P X, JING Y X. The intercropping and arbuscularmycorrhizal fungus decrease Cd accumulation in upland rice and improve phytoremediation of Cd-contaminated soil by *Sphagneticola ca-lendulacea* (L.) Pruski[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 298: 113516.
- [11] XIE Y, BU S H, FENG Q J, WASSIE M, AMEE M, JIANG Y, BI Y, HU L, CHEN L. Identification of Cd-resistant microorganisms from heavy metal-contaminated soil and its potential in promoting the growth and Cd accumulation of bermudagrass[J]. Environmental Research, 2021, 200: 111730.
- [12] 王雯颖, 徐宝珠, 胡佳瑶, 潘高, 刘文胜. 锰矿区大叶胡枝子灌丛土壤的丛枝菌根真菌多样性[J]. 生态学报, 2024, 44(12): 5269-5279.
- WANG W Y, XU B Z, HU J Y, PAN G, LIU W S. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the soil of *Lespedeza davidii* scrub in manganese mining area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(12): 5269-5279. (in Chinese)
- [13] 廖妤婕. 丛枝菌根真菌作用下桉树对土壤中 Pb、Zn 和 Cd 的耐受机理研究[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
- LIAO Y J. Study on the tolerance mechanism of *Eucalyptus* to Pb, Zn and Cd in soil under arbuscular mycorrhizal fungi[D]. Nanning: Guangxi University, 2014. (in Chinese)
- [14] 周敏, 袁菊红, 陈小娇, 江灶发. 铅胁迫对紫藤幼苗生长、生理指标及 Pb<sup>2+</sup>富集的影响[J]. 生物学杂志, 2019, 36(1): 43-47.
- ZHOU M, YUAN J H, CHEN X J, JIANG Z F. Effects of lead stress on growth, physiology, and lead ion accumulation and transportation in *Wisteria* seedling[J]. Journal of Biology, 2019, 36(1): 43-47. (in Chinese)
- [15] 方晰, 田大伦, 谢荣秀. 湘潭锰矿矿渣废弃地植被修复前的土壤诊断[J]. 生态学报, 2006(5): 1494-1501.
- FANG X, TIAN D L, XIE X R. Soil diagnosis before vegetation restoration in manganese slag wasteland of Xiangtan mine[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006(5): 1494-1501. (in Chinese)
- [16] 谢荣秀, 田大伦, 方晰. 湘潭锰矿废弃地土壤重金属污染及其评价[J]. 中南林学院学报, 2005(2): 38-41.
- XIE X R, TIAN D L, FANG X. Soil heavy metal pollution and its evaluation in abandoned land of Xiangtan manganese mine[J]. Journal of Central South College of Forestry, 2005(2): 38-41. (in Chinese)
- [17] 杨敏文. 快速测定植物叶片叶绿素含量方法的探讨[J]. 光谱实验室, 2002(4): 478-481.
- YANG M W. Study on rapid determination of chlorophyll content in plant leaves[J]. Spectral Laboratory, 2002(4): 478-481. (in Chinese)
- [18] 赵世杰, 许长成, 邹琦, 孟庆伟. 植物组织中丙二醛测定方法的改进[J]. 植物生理学通讯, 1994(3): 207-210.
- ZHAO S J, XU C C, ZOU Q, MENG Q W. Improvement of methods for determination of malondialdehyde in plant tissues[J]. Plant Physiology Communication, 1994(3): 207-210. (in Chinese)
- [19] 李忠光, 龚明. 愈创木酚法测定植物过氧化物酶活性的改进[J]. 植物生理学通讯, 2008(2): 323-324.
- LI Z G, GONG M. Improved determination of plant peroxidase activity by guaiacol method[J]. Plant Physiology Communication, 2008(2): 323-324. (in Chinese)
- [20] ZANGANEH R, JAMEI R, RAHMANI F. Role of salicylic acid and hydrogen sulfide in promoting lead stress tolerance and regulating free amino acid composition in *Zea mays* L.[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2019, 41(6): 1-9.
- [21] HUSSAIN H A, ZHANG O W, HUSSAIN S, HONGBO L, WAQQAS A, LI Z. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on maize growth, root colonization, and root exudates varied with inoculum and application method[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2021, 21: 1577-1590.
- [22] TAN S Y, JANG 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 pholeinocarpum*[J]. PLoS One, 2015, 10(7): e0132347.
- [23] 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[J]. Environmental Pollution, 2021, 272: 115980.
- [24] 邱丹. 接种 AM 真菌对玉米、蜈蚣草吸收转运 As 的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
- QIU D. The effect of AMF in inoculum on arsenic uptake and transport in maize and *Pteris vittata* L.[D]. Nanning: Guangxi University, 2017. (in Chinese)
- [25] 赵英鹏. 铅胁迫下丛枝菌根真菌(AMF)对景天三七生长和

- 生理特性的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2018.
- ZHAO Y P. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on growth and physiological characteristics of *Sedum aizoon* L. under lead stress[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [26] 王雪蓉, 梁如玉, 王玉龙, 郭婷艳, 贾彤. 重金属胁迫下丛枝菌根真菌对白茅生长和生理生态特征的影响[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2023, 46(2): 439-448.
- WANG X R, LIANG R Y, WANG Y L, GUO T Y, JIA T. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and physiological characteristics of *Imperata cylindrica* under heavy metal stress[J]. Journal of Shanxi University (Natural Science Edition), 2023, 46(2): 439-448. (in Chinese)
- [27] 吴丽芳, 魏晓梅, 蔡建. 白刺花幼苗抗旱与耐寒协同响应的生理生化评价[J]. 热带作物学报, 2023, 44(10): 2051-2059.
- WU L F, WEI X M, CAI J. Physiological and biochemical evaluation of synergistic responses in drought and cold tolerance of *Sophora davidii* seedlings[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2023, 44(10): 2051-2059. (in Chinese)
- [28] ZHANG X, ZHANG H, LOU X, TANG M. Mycorrhizal and non-mycorrhizal *Medicago truncatula* roots exhibit differentially regulated NADPH oxidase and antioxidant response under Pb stress[J]. Environmental and Experimental Botany, 2019, 164: 10-19.
- [29] 任艳芳, 何俊瑜, 刘畅, 罗辛灵, 黄天兴. 镉胁迫对葛苣幼苗生长及抗氧化酶系统的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(2): 494-497.
- REN Y F, HE J Y, LIU C, LUO X N, HUANG T X. Effects of Cd stress on seedling growth and activities in antioxidant enzymes of lettuce[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(2): 494-497. (in Chinese)