

# 微生物菌剂对芦竹修复 Pb 污染土壤的影响

王柯懿, 陈霞霞, 莫 凌, 曾丹娟, 蒲高忠<sup>①</sup>

(广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所 广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室, 广西 桂林 541006)

**摘要:** 为了探明微生物菌剂对芦竹(*Arundo donax* Linn.) 修复 Pb 污染土壤的影响, 以 ETS 微生物菌剂为供试微生物菌剂, 将对照组(未添加微生物菌剂和 Pb)、微生物菌剂单一处理组(每个水泥池 200 mL 微生物菌剂)、Pb 单一处理组(土壤 Pb 终质量浓度 300 mg · kg<sup>-1</sup>)和微生物菌剂-Pb 复合处理组(每个水泥池 200 mL 微生物菌剂, 土壤 Pb 终质量浓度 300 mg · kg<sup>-1</sup>)芦竹的生长情况和光合特性以及 Pb 的积累和迁移特征进行比较。结果显示: Pb 单一处理组芦竹的株高、分蘖数和单丛地上部干质量显著( $P < 0.05$ ) 低于对照组, 叶绿素相对含量、净光合速率和水分利用效率与对照组差异不显著( $P > 0.05$ ), 气孔导度、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度和蒸腾速率显著高于对照组; 而微生物菌剂-Pb 复合处理组芦竹的株高、分蘖数、单丛地上部干质量和水分利用效率显著高于 Pb 单一处理组, 叶绿素相对含量和胞间 CO<sub>2</sub> 浓度与 Pb 单一处理组差异不显著, 净光合速率、气孔导度和蒸腾速率显著低于 Pb 单一处理组。Pb 单一处理组芦竹根和茎的 Pb 含量显著高于对照组, 叶的 Pb 含量和根的 Pb 富集系数与对照组差异不显著, 茎和叶的 Pb 富集系数显著低于对照组; 而微生物菌剂-Pb 复合处理组芦竹根和茎的 Pb 含量以及根、茎和叶的 Pb 富集系数不显著高于 Pb 单一处理组, 叶的 Pb 含量显著高于 Pb 单一处理组。从不同器官看, Pb 单一处理组芦竹根的 Pb 含量和 Pb 富集系数最高, 而微生物菌剂-Pb 复合处理组芦竹叶的 Pb 含量和 Pb 富集系数最高。另外, 芦竹的 Pb 转运系数在 4 个处理组间差异显著, 其中, Pb 单一处理组芦竹的 Pb 转运系数最低, 微生物菌剂-Pb 复合处理组芦竹的 Pb 转运系数显著高于 Pb 单一处理组。研究结果显示: 微生物菌剂能够促进 Pb 胁迫下芦竹的生长, 提高芦竹的 Pb 吸收和转运能力, 进而增强其对 Pb 污染土壤的修复能力。

**关键词:** 芦竹; 微生物菌剂; Pb 污染土壤; 植物修复

中图分类号: Q945.78; X53; S564+.9 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2023)06-0043-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2023.06.05

**Effects of microbial agent on remediation of Pb-contaminated soil by *Arundo donax*** WANG Keyi, CHEN Xiaxia, MO Ling, ZENG Danjuan, PU Gaozhong<sup>①</sup> (Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain, Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2023, 32(6): 43-49

**Abstract:** To figure out the effects of microbial agent on remediation of Pb-contaminated soil by *Arundo donax* Linn., taking ETS microbial agent as the test microbial agent, the growth and photosynthetic characteristics as well as Pb accumulation and translocation characteristics of *A. donax* in the control group (not adding microbial agent and Pb), single treatment group of microbial agent (200 mL microbial agent per cement tank), single treatment group of Pb (300 mg · kg<sup>-1</sup> of final mass concentration of Pb in soil), and combined treatment group of microbial agent-Pb (200 mL microbial agent per cement tank, 300 mg · kg<sup>-1</sup> of final mass concentration of Pb in soil) were compared. The results show that plant height, tiller number, and dry mass of above-ground part per clump of *A. donax* in single treatment group

收稿日期: 2023-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(31660154); 中国科学院“西部之光”项目([2019]90); 广西重点研发计划项目(桂科 AB22035038); 广西科学院基础研究基金项目(CQZ-D-1904); 广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室基金项目(20-065-7; 19-050-6)

作者简介: 王柯懿(1994—), 女, 瑶族, 广西桂林人, 硕士, 研究实习员, 主要从事环境生态学研究。

<sup>①</sup>通信作者 E-mail: pukouchy@163.com

引用格式: 王柯懿, 陈霞霞, 莫 凌, 等. 微生物菌剂对芦竹修复 Pb 污染土壤的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2023, 32(6): 43-49.

of Pb are significantly ( $P < 0.05$ ) lower than those in the control group, relative chlorophyll content, net photosynthetic rate, and water use efficiency are not significantly ( $P > 0.05$ ) different from those in the control group, and stomatal conductance, intercellular  $\text{CO}_2$  concentration, and transpiration rate are significantly higher than those in the control group; while plant height, tiller number, dry mass of above-ground part per clump, and water use efficiency of *A. donax* in combined treatment group of microbial agent-Pb are significantly higher than those in single treatment group of Pb, relative chlorophyll content and intercellular  $\text{CO}_2$  concentration are not significantly different from those in single treatment group of Pb, and net photosynthetic rate, stomatal conductance, and transpiration rate are significantly lower than those in single treatment group of Pb. Pb contents in root and stem of *A. donax* in single treatment group of Pb are significantly higher than those in the control group, Pb content in leaf and Pb concentration coefficient in root are not significantly different from those in the control group, and Pb concentration coefficients in stem and leaf are significantly lower than those in the control group; while Pb contents in root and stem and Pb concentration coefficients in root, stem, and leaf of *A. donax* in combined treatment group of microbial agent-Pb are not significantly higher than those in single treatment group of Pb, and Pb content in leaf is significantly higher than that in single treatment group of Pb. In terms of different organs, Pb content and Pb concentration coefficient in root of *A. donax* in single treatment group of Pb are the highest, while those in leaf of *A. donax* in combined treatment group of microbial agent-Pb are the highest. In addition, Pb translocation coefficient of *A. donax* is significantly different between four treatment groups, in which, Pb translocation coefficient of *A. donax* in single treatment group of Pb is the lowest, and that in combined treatment group of microbial agent-Pb is significantly higher than that in single treatment group of Pb. It is suggested that microbial agent can promote the growth of *A. donax* under Pb stress, elevate its Pb absorption and translocation ability, and thus enhance its capacity to remediate Pb-contaminated soil.

**Key words:** *Arundo donax* Linn.; microbial agent; Pb-contaminated soil; phytoremediation

Pb 是一种生命非必需元素,在土壤中无法被生物降解,可通过食物链在人和动物体内不断积累,对土壤生态系统以及人类和动物健康造成严重威胁<sup>[1]</sup>。中国耕地土壤 Pb 的点位超标率为 1.5%,在金属污染物点位超标率中排名第 6 位<sup>[2]</sup>。研究发现,Pb 在广西中部岩溶地区农田土壤中的点位超标率和平均超标倍数均最高<sup>[3]</sup>,因此,亟需解决该区域的土壤 Pb 污染问题。

植物修复技术是一种廉价、环境友好且可持续原位治理土壤重金属污染的方法,通过植物的吸收、固定、转移和蒸腾作用,达到降低或去除土壤中重金属的目的<sup>[4-5]</sup>。芦竹 (*Arundo donax* Linn.) 为禾本科 (Poaceae) 多年生草本植物,具有生物量高、适应能力强和生长快等优点<sup>[6]</sup>。芦竹可作为非粮生物能源作物,能避免重金属元素在食物链中传递,被广泛应用于重金属污染土壤修复<sup>[7]</sup>。Pu 等<sup>[8-9]</sup>认为,芦竹对 Cd、As、Pb、Cr 和 Tl 的耐受性较强,是修复重金属污染土壤的理想植物材料。Pb 胁迫会破坏植物正常的生长发育过程及生理生化功能<sup>[10-13]</sup>,这在一定程度上限制了芦竹在 Pb 污染土壤修复中的应用。因此,如何提高芦竹对土壤中 Pb 的吸收能力是利用芦竹

修复 Pb 污染土壤面临的首要问题。

微生物菌剂为通过工业化加工方法以功能微生物活菌为原料制成的制剂,具有成本低、易操作、促进植物生长、提高植物吸收重金属能力等特性,在土壤改良与修复中应用广泛且成效显著<sup>[14]</sup>。微生物及其分泌物(如吡啶乙酸、赤霉素、细胞分裂素等)可以有效刺激和调节 Pb 胁迫下植物的生长发育及防御应答能力<sup>[15-18]</sup>。ETS 微生物菌剂为一种商业微生物制剂,具有功能性强、经济效益高的优点,可明显提高土壤微生物多样性,促进植物生长<sup>[19]</sup>,是一种极具强化植物修复 Pb 污染土壤潜力的微生物菌剂<sup>[20]</sup>。

鉴于此,本研究以未添加微生物菌剂和 Pb 为对照组,对微生物菌剂单一处理组、Pb 单一处理组和微生物菌剂-Pb 复合处理组芦竹的生长情况和光合特性以及 Pb 积累和迁移特征进行比较,以期利用微生物菌剂强化植物修复 Pb 污染土壤提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

实验使用的 ETS 微生物菌剂购自 ETS(天津)生

物科技发展有限公司,产品名为金水土黑白液(每毫升有效活菌数大于等于2.0亿),由托马斯菌群和巴斯德菌群叠加而成,其中,好氧菌种类占40%,厌氧菌种类占60%。受试芦竹为2年生芦竹的四倍体组培苗。栽培土壤为红黏土,即广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所内的表层(0~20 cm)土壤,土壤总氮含量 $1.078 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、总磷含量 $0.932 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、总钾含量 $0.812 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Pb含量 $22.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , pH 6.80。

栽培实验在顶部透光的温室(温度 $20 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )内进行,供试芦竹按“品”字型种植在长、宽和高均为100 cm且底部具1个出水口的水泥池(先填充10 cm高的砾石,再填充200 kg红黏土,相邻水泥池间隔50 cm)中,每池3丛,丛距50 cm。

## 1.2 方法

1.2.1 实验设计 实验设置4个处理组,分别为对照组(未添加微生物菌剂和Pb)、微生物菌剂单一处理组(每个水泥池200 mL微生物菌剂)、Pb单一处理组(土壤Pb终质量浓度 $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、微生物菌剂-Pb复合处理组(每个水泥池200 mL微生物菌剂,土壤Pb终质量浓度 $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。每个处理组各1个水泥池,每丛视为1个重复。依照产品使用说明书上的灌根方法配制微生物菌剂溶液,稀释300倍后灌施于芦竹根部;微生物菌剂溶液分2次灌施,每次100 mL,种植当天第1次灌施,1周后再次灌施。按照土壤质量,使用分析纯 $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 粉末配制质量浓度 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  Pb溶液,喷洒到相应处理组的土壤中。

1.2.2 生长指标测定 培养120 d时,使用卷尺(精度1 mm)测量每丛芦竹从基部到顶部的高度,即株高;统计每丛芦竹茎秆高度在1 m及以上的分蘖数;采集每丛芦竹的完整植株,分成根、茎、叶3个部分,先于 $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 杀青30 min,再于 $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒质量,使用地秤(精度0.01 kg)称量单丛根、茎、叶的干质量,并计算单丛地上部干质量(即单丛茎干质量和单丛叶干质量的总和)。

### 1.2.3 光合指标测定

1.2.3.1 叶绿素相对含量(SPAD)测定 培养16周后,在晴朗日9:00,参照李泽等<sup>[21]</sup>的方法,采用SPAD-502叶绿素测定仪(日本Konica公司)测定供试植株旗叶(即花序下第1枚叶)的SPAD值,测定时避开叶片主脉。每个处理组测定3丛,每丛检测1枚

旗叶,每枚旗叶测定2个点,结果取平均值。

1.2.3.2 气体交换参数测定 培养16周后,在晴朗日9:00,采用LI-6400xt便携式光合仪(美国LI-COR公司)测定芦竹叶片的气体交换参数。选取供试植株的旗叶,测定时保持叶片自然生长角度,记录叶片的净光合速率、气孔导度、胞间 $\text{CO}_2$ 浓度和蒸腾速率。测定过程中设定光合有效辐射为 $(1200 \pm 1) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,空气温度为 $(20 \pm 1) \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,空气相对湿度为40%,大气 $\text{CO}_2$ 浓度为 $(400 \pm 20) \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。每个处理组测定3丛,每丛检测1枚旗叶,每枚旗叶测定2个点,结果取平均值。根据检测结果计算水分利用效率,计算公式为水分利用效率=净光合速率/蒸腾速率<sup>[22]</sup>。

1.2.4 芦竹Pb含量测定及Pb富集系数和Pb转运系数的计算 培养120 d时,测定芦竹根、茎和叶中的Pb含量。使用不锈钢粉碎机将烘干的根、茎、叶粉碎,过60目尼龙筛,用于芦竹根、茎、叶Pb含量测定。每个处理组测定3丛,视为3个重复。使用Multiwave Pro微波消解仪(奥地利Anton Paar公司)对植物样品进行消解,利用7700e ICP-MS电感耦合等离子体质谱仪(美国Agilent公司)测定样品中的Pb含量。根据测定结果,参照文献<sup>[23]</sup>计算不同器官的Pb富集系数和Pb转运系数,计算公式分别为某器官的Pb富集系数=该器官的Pb含量/土壤Pb含量,Pb转运系数=地上部Pb含量/根Pb含量。其中,地上部Pb含量=(单丛茎Pb质量+单丛叶Pb质量)/单丛地上部干质量,单丛茎(叶)Pb质量为茎(叶)Pb含量和单丛茎(叶)干质量的乘积。

## 1.3 数据处理分析

采用EXCEL 2010软件整理数据和制图,采用SPSS 23软件进行数据统计分析,并采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)进行差异显著性检验。

## 2 结果和分析

### 2.1 不同处理组芦竹生长指标的比较

结果(表1)表明:在4个处理组中,微生物菌剂单一处理组(每个水泥池200 mL微生物菌剂)芦竹的株高、分蘖数和单丛地上部干质量均最高,其中,株高和分蘖数与对照组(未添加微生物菌剂和Pb)和微生物菌剂-Pb复合处理组(每个水泥池200 mL微生物

物菌剂,土壤 Pb 终质量浓度  $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 的差异不显著 ( $P>0.05$ ), 而单丛地上部干质量显著 ( $P<0.05$ ) 高于对照组和微生物菌剂-Pb 复合处理组, 增幅分别为 36.6% 和 52.5%。Pb 单一处理组(土壤 Pb 终质量浓度  $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 芦竹的株高、分蘖数和单丛地上部干质量显著低于对照组, 降幅分别为 59.4%、57.4% 和 88.1%。微生物菌剂-Pb 复合处理组芦竹的株高、分蘖数和单丛地上部干质量显著高于 Pb 单一处理组, 增幅分别为 119.9%、64.9% 和 650.0%。

## 2.2 不同处理组芦竹光合指标的比较

结果(表2)表明:4个处理组间芦竹的叶绿素相对含量(SPAD)无显著( $P>0.05$ )差异。微生物菌剂单一处理组(每个水泥池 200 mL 微生物菌剂)芦竹的气孔导度和胞间  $\text{CO}_2$  浓度显著( $P<0.05$ )高于对照组(未添加微生物菌剂和 Pb), 而净光合速率、蒸腾速率和水分利用效率与对照组无显著差异。Pb 单一处理组(土壤 Pb 终质量浓度  $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )芦竹的气孔导度、胞间  $\text{CO}_2$  浓度和蒸腾速率显著高于对照组, 而净光合速率和水分利用效率与对照组无显著差异。微生物菌剂-Pb 复合处理组(每个水泥池 200 mL 微生物菌剂, 土壤 Pb 终质量浓度  $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )芦竹的净光合速率和蒸腾速率显著低于对照组, 胞间  $\text{CO}_2$  浓度和水分利用效率显著高于对照组, 而气孔导度

与对照组无显著差异。微生物菌剂-Pb 复合处理组芦竹的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率显著低于 Pb 单一处理组, 降幅分别为 24.9%、53.2% 和 58.0%, 而水分利用效率显著高于 Pb 单一处理组, 增幅为 80.7%。

表1 不同处理组芦竹株高、分蘖数和单丛地上部干质量的比较 ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 1 Comparisons on plant height, tiller number, and dry mass of above-ground part per clump of *Arundo donax* Linn. in different treatment groups ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

| 处理组 <sup>2)</sup><br>Treatment<br>group <sup>2)</sup> | 株高/m<br>Plant height | 分蘖数<br>Tiller number | 单丛地上部干质量/kg<br>Dry mass of above-ground part per clump |
|---|----------------------|----------------------|--|
| CK  | 3.72±0.33a           | 15.7±4.0a            | 1.34±0.51b   |
| ETS   | 3.75±0.41a           | 16.7±3.2a            | 1.83±0.56a   |
| Pb  | 1.51±0.09b           | 6.7±2.5b             | 0.16±0.01c   |
| ETS-Pb  | 3.32±0.28a           | 11.0±5.3a            | 1.20±0.13b   |

<sup>1)</sup> 同列中不同小写字母表示在不同处理组间差异显著 ( $P<0.05$ ) Different lowercases in the same column indicate the significant ( $P<0.05$ ) differences between different treatment groups.

<sup>2)</sup> CK: 对照组(未加入微生物菌剂和 Pb) The control group (not adding microbial agent and Pb); ETS: 微生物菌剂单一处理组(每个水泥池 200 mL 微生物菌剂) Single treatment group of microbial agent (200 mL microbial agent per cement tank); Pb: Pb 单一处理组(土壤 Pb 终质量浓度  $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) Single treatment group of Pb ( $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  of final mass concentration of Pb in soil); ETS-Pb: 微生物菌剂-Pb 复合处理组(每个水泥池 200 mL 微生物菌剂, 土壤 Pb 终质量浓度  $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) Combined treatment group of microbial agent-Pb (200 mL microbial agent per cement tank,  $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  of final mass concentration of Pb in soil).

表2 不同处理组芦竹光合指标的比较 ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 2 Comparisons on photosynthetic indexes of *Arundo donax* Linn. in different treatment groups ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

| 处理组 <sup>2)</sup><br>Treatment<br>group <sup>2)</sup> | 叶绿素<br>相对含量<br>Relative<br>chlorophyll<br>content (SPAD) | 净光合<br>速率/ $(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$<br>Net photosynthetic<br>rate | 气孔<br>导度/ $(\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$<br>Stomatal<br>conductance | 胞间 $\text{CO}_2$<br>浓度/ $(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$<br>Intercellular $\text{CO}_2$<br>concentration | 蒸腾<br>速率/ $(\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$<br>Transpiration rate | 水分利用<br>效率/ $(\text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1})$<br>Water use efficiency |
|---|--|--|---|---|---|---|
| CK  | 51.01±0.59a  | 25.67±2.06a  | 0.41±0.09c  | 270.58±24.97b   | 4.09±0.37b  | 6.29±0.56b  |
| ETS   | 49.82±1.55a  | 25.41±1.86a  | 0.69±0.03b  | 307.60±5.79a  | 4.02±0.47b  | 6.34±0.38b  |
| Pb  | 52.64±2.32a  | 28.07±1.00a  | 0.77±0.19a  | 314.37±16.36a   | 5.62±0.44a  | 5.02±0.54b  |
| ETS-Pb  | 50.81±4.11a  | 21.07±2.54b  | 0.36±0.12c  | 280.12±17.92a   | 2.36±0.53c  | 9.07±1.00a  |

<sup>1)</sup> 同列中不同小写字母表示在不同处理组间差异显著 ( $P<0.05$ ) Different lowercases in the same column indicate the significant ( $P<0.05$ ) differences between different treatment groups.

<sup>2)</sup> CK: 对照组(未加入微生物菌剂和 Pb) The control group (not adding microbial agent and Pb); ETS: 微生物菌剂单一处理组(每个水泥池 200 mL 微生物菌剂) Single treatment group of microbial agent (200 mL microbial agent per cement tank); Pb: Pb 单一处理组(土壤 Pb 终质量浓度  $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) Single treatment group of Pb ( $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  of final mass concentration of Pb in soil); ETS-Pb: 微生物菌剂-Pb 复合处理组(每个水泥池 200 mL 微生物菌剂, 土壤 Pb 终质量浓度  $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) Combined treatment group of microbial agent-Pb (200 mL microbial agent per cement tank,  $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  of final mass concentration of Pb in soil).

## 2.3 不同处理组芦竹 Pb 积累和迁移指标的比较

结果(表3)表明:微生物菌剂单一处理组(每个水泥池 200 mL 微生物菌剂)芦竹根、茎和叶的 Pb 含量不显著 ( $P>0.05$ ) 高于对照组(未添加微生物菌剂

和 Pb), 增幅分别为 113.1%、94.1% 和 2.2%。Pb 单一处理组(土壤 Pb 终质量浓度  $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 芦竹根的 Pb 含量显著 ( $P<0.05$ ) 高于对照组和微生物菌剂单一处理组, 茎的 Pb 含量显著高于对照组, 叶的 Pb

含量显著低于微生物菌剂-Pb复合处理组(每个水泥池200 mL微生物菌剂,土壤Pb终质量浓度 $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。微生物菌剂-Pb复合处理组芦竹根、茎和叶的Pb含量最高,分别较Pb单一处理组升高了15.2%、27.2%和141.6%。比较同一处理组不同器官Pb含量,对照组和微生物菌剂单一处理组表现为叶最高、茎次之、根最低,Pb单一处理组表现为根最高、茎次之、叶最低,而微生物菌剂-Pb复合处理组则表现为叶最高、根次之、茎最低。

结果(表3)表明:微生物菌剂单一处理组芦竹根、茎和叶的Pb富集系数均最高,其中,根和茎的Pb富集系数显著高于其他3个处理组;对照组芦竹根、茎、叶的Pb富集系数均次之,其中,茎和叶的Pb富集系数显著高于Pb单一处理组和微生物菌剂-Pb复

合处理组;Pb单一处理组芦竹根、茎、叶的Pb富集系数均最低,微生物菌剂-Pb复合处理组芦竹根、茎、叶的Pb富集系数也较低,但芦竹根、茎、叶的Pb富集系数在这2个处理组间的差异不显著。比较同一处理组不同器官Pb富集系数,对照组和微生物菌剂单一处理组表现为叶最高、茎次之、根最低,Pb单一处理组表现为根最高、叶次之、茎最低,而微生物菌剂-Pb复合处理组则表现为叶最高、根次之、茎最低。

结果(表3)表明:4个处理组芦竹的Pb转运系数由高到低依次为对照组、微生物菌剂单一处理组、微生物菌剂-Pb复合处理组、Pb单一处理组,且芦竹的Pb转运系数在不同处理组间存在显著差异。值得注意的是,微生物菌剂-Pb复合处理组芦竹的Pb转运系数较Pb单一处理组升高了43.08%。

表3 不同处理组芦竹Pb含量、Pb富集系数和Pb转运系数的比较( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 3 Comparisons on Pb content, Pb concentration coefficient, and Pb translocation coefficient of *Arundo donax* Linn. in different treatment groups ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

| 处理组 <sup>2)</sup><br>Treatment<br>group <sup>2)</sup> | 不同器官Pb含量/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )<br>Pb content in different organs |                 |                | 不同器官Pb富集系数<br>Pb concentration coefficient in different organs |             |             | Pb转运系数<br>Pb translocation<br>coefficient |
|---|---|-----------------|----------------|--|-------------|-------------|---|
|   | 根 Root  | 茎 Stem          | 叶 Leaf         | 根 Root   | 茎 Stem      | 叶 Leaf      |   |
| CK  | 41.61±12.48bB   | 61.71±31.65bB   | 128.69±15.44bA | 1.86±0.56bB  | 2.76±1.42bB | 5.75±0.70aA | 1.94±0.01a                                |
| ETS   | 88.75±38.82bA   | 119.76±46.89abA | 131.59±36.95bA | 3.97±1.74aA  | 5.36±2.10aA | 5.89±1.61aA | 1.38±0.00b                                |
| Pb  | 241.55±125.00aA   | 167.99±94.33aA  | 146.10±89.83bA | 0.80±0.42bA  | 0.56±0.31cA | 0.49±0.30bA | 0.65±0.00d                                |
| ETS-Pb  | 278.15±123.67aA   | 213.67±92.87aA  | 352.96±51.41aA | 0.93±0.41bA  | 0.71±0.31cA | 1.18±0.17bA | 0.93±0.01c                                |

<sup>1)</sup> 同列中不同小写字母表示在不同处理组间差异显著( $P < 0.05$ ) Different lowercases in the same column indicate the significant ( $P < 0.05$ ) differences between different treatment groups; 同行中不同大写字母表示在不同器官间差异显著( $P < 0.05$ ) Different uppercases in the same row indicate the significant ( $P < 0.05$ ) differences between different organs.

<sup>2)</sup> CK: 对照组(未加入微生物菌剂和Pb) The control group (not adding microbial agent and Pb); ETS: 微生物菌剂单一处理组(每个水泥池200 mL微生物菌剂) Single treatment group of microbial agent (200 mL microbial agent per cement tank); Pb: Pb单一处理组(土壤Pb终质量浓度 $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) Single treatment group of Pb ( $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  of final mass concentration of Pb in soil); ETS-Pb: 微生物菌剂-Pb复合处理组(每个水泥池200 mL微生物菌剂,土壤Pb终质量浓度 $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) Combined treatment group of microbial agent-Pb (200 mL microbial agent per cement tank,  $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  of final mass concentration of Pb in soil).

### 3 讨论和结论

重金属胁迫对植物生长发育具有毒害作用,微生物在辅助植物修复污染土壤方面表现出较大潜力,并且取得了良好的效果<sup>[24-25]</sup>。简敏菲等<sup>[26]</sup>对丁香蓼(*Ludwigia prostrata* Roxb.)的研究发现,Pb污染下丁香蓼的株高、根长和根质量等生长指标均下降; Punamiya等<sup>[27]</sup>发现,香根草[*Chrysopogon zizanioides* (Linn.) Rob.]地上部干质量随着土壤Pb浓度的增加而降低。本研究结果显示:Pb单一处理组(土壤Pb终质量浓度 $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )芦竹株高、分蘖数和单

丛地上干质量显著( $P < 0.05$ )低于其他处理组,说明土壤Pb污染抑制了芦竹的正常生长。江润海等<sup>[28]</sup>发现,微生物可以有效地刺激和调节Pb胁迫下植物的生长发育能力。Karimi等<sup>[29]</sup>发现,Pb胁迫下微生物可以显著提高黄瓜(*Cucumis sativus* Linn.)的地上部干质量。本研究对添加ETS微生物菌剂的Pb污染土壤中芦竹的生长状况进行了研究,结果显示:微生物菌剂-Pb复合处理组(每个水泥池200 mL微生物菌剂,土壤Pb终质量浓度 $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )芦竹的株高、分蘖数和单丛地上部干质量显著高于Pb单一处理组,表明微生物菌剂能够缓解Pb胁迫对芦竹生长的伤害。

已有研究表明:Pb胁迫可直接或间接影响植物的光合作用,高浓度Pb会对植物的叶绿素合成、CO<sub>2</sub>固定和细胞色素蛋白复合体等酶的正常运转产生抑制作用<sup>[30]</sup>。微生物菌剂-Pb复合处理组芦竹的叶绿素相对含量不显著低于Pb单一处理组,净光合速率显著低于Pb单一处理组,说明微生物菌剂对Pb胁迫下芦竹的光合能力具有一定的抑制作用。微生物菌剂-Pb复合处理组芦竹的气孔导度和蒸腾速率显著低于Pb单一处理组,胞间CO<sub>2</sub>浓度不显著低于Pb单一处理组。气孔是植物叶表皮与外界进行气体交换的主要通道,是植物体吸收CO<sub>2</sub>、发生蒸腾作用的重要器官<sup>[31]</sup>。植物通过调节气孔开度调控CO<sub>2</sub>吸收能力和蒸腾作用水平<sup>[32]</sup>,以适应环境的变化。推测微生物菌剂-Pb复合处理组芦竹气孔导度、蒸腾速率和胞间CO<sub>2</sub>浓度的变化可能与微生物对气孔的影响<sup>[33-34]</sup>有关,具体作用机制有待后续研究。研究发现,植物的水分利用效率与其生长情况呈正相关<sup>[35]</sup>。本研究中,微生物菌剂-Pb复合处理组芦竹的水分利用效率显著高于Pb单一处理组,芦竹的株高、分蘖数和单丛地上部干质量也显著高于Pb单一处理组,验证了上述结论。总体来看,微生物菌剂会抑制Pb胁迫下芦竹的光合作用,但作用机制尚不清楚,有待深入研究。

Gupta等<sup>[36]</sup>的研究结果表明:Pb在植物体内主要以Pb<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>和PbCO<sub>3</sub>等形式存在,导致Pb胁迫下植物根系吸收的大部分Pb难以运输到地上部,仍停留在根系中。Su等<sup>[37]</sup>认为,Pb主要累积在植物根和茎的非活性代谢区域(即细胞壁和囊泡),这可能是植物缓解Pb胁迫的主要机制。本研究发现,Pb单一处理组芦竹根的Pb含量最高、茎次之、叶最低,在一定程度上印证了上述结论。微生物菌剂-Pb复合处理组芦竹不同器官的Pb含量则表现为叶最高、根次之、茎最低,说明添加微生物菌剂能够促进Pb胁迫下芦竹根系吸收的Pb向地上部尤其是叶的转移。

植物对重金属的富集系数和转运系数是评价植物修复重金属污染土壤能力的重要指标。一般认为,植物运输重金属的能力越强越有利于植物吸收重金属<sup>[38]</sup>。Rezvani等<sup>[39]</sup>发现,丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)能够显著提高大麦(*Hordeum vulgare* Linn.)对Pb的吸收能力;Xiao等<sup>[40]</sup>研究发现,混合菌种制备的微生物菌剂能够显著提高五节芒[*Miscanthus floridulus* (Lab.) Warb. ex Schum. et

Laut.]地上部生物量和Pb修复效率。本研究中,微生物菌剂-Pb复合处理组芦竹叶的Pb含量显著高于Pb单一处理组,增幅达141.6%,根、茎和叶的Pb富集系数高于Pb单一处理组,Pb转运系数显著高于Pb单一处理组,说明添加微生物菌剂能够有效增强芦竹对Pb的积累和转运能力,从而提高芦竹对Pb污染土壤的修复能力。

综上所述,微生物菌剂能够显著促进Pb胁迫下芦竹的生长,提高芦竹的Pb积累和转运能力,增强芦竹对Pb污染土壤的修复能力。因此,ETS微生物菌剂作为一种商业微生物菌剂,经济效益明显,有望成为重金属污染土壤植物修复领域具有大规模应用前景的候选菌剂。

#### 参考文献:

- [1] YUAN W, YANG N, LI X. Advances in understanding how heavy metal pollution triggers gastric cancer [J]. *BioMed Research International*, 2016, 2016: 7825432.
- [2] 周文波, 高东东, 李明顺. 土壤重金属污染修复综述及土壤Pb污染固化修复对比研究[J]. *环境保护与循环经济*, 2020, 40(5): 22-26.
- [3] 唐豆豆, 袁旭音, 汪宜敏, 等. 地质高背景农田土壤中水稻对重金属的富集特征及风险预测[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(1): 18-26.
- [4] 王赛怡, 王逸君, 赵亚洲, 等. 土壤重金属污染及其植物修复研究进展[J]. *农学学报*, 2023, 13(2): 20-23, 55.
- [5] 石文广, 李靖, 张玉红, 等. 7种杨树铅抗性和积累能力的比较研究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(3): 61-70.
- [6] 曾鹏, 郭朝晖, 肖细元, 等. 芦竹和木本植物间修复重金属污染土壤[J]. *环境科学*, 2018, 39(11): 5207-5216.
- [7] FIORENTINO N, FAGNANO M, ADAMO P, et al. Assisted phytoextraction of heavy metals: compost and *Trichoderma* effects on giant reed (*Arundo donax* L.) uptake and soil N-cycle microflora [J]. *Italian Journal of Agronomy*, 2013, 8: e29.
- [8] PU G, ZHANG D, ZENG D, et al. Physiological response of *Arundo donax* L. to thallium accumulation in a simulated wetland [J]. *Marine and Freshwater Research*, 2018, 69: 714-720.
- [9] PU G, ZENG D, MO L, et al. Cadmium accumulation and its effects on physiological characteristics of *Arundo donax* L. in a simulated wetland [J]. *Global NEST Journal*, 2018, 21(4): 423-429.
- [10] SHAHID M, POURRUT B, DUMAT C, et al. Heavy-metal-induced reactive oxygen species: phytotoxicity and physicochemical changes in plants [M]//WHITACRE D M. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology: Volume 232*. Berlin: Springer, 2014: 1-44.

- [11] SHAHID M, DUMAT C, POURRUT B, et al. Role of metal speciation in lead-induced oxidative stress to *Vicia faba* roots [J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2015, 62(4): 448-454.
- [12] CHEN Q, ZHANG X Y, LIU Y Y, et al. Hemin-mediated alleviation of zinc, lead and chromium toxicity is associated with elevated photosynthesis, antioxidative capacity; suppressed metal uptake and oxidative stress in rice seedlings [J]. Plant Growth Regulation, 2017, 81: 253-264.
- [13] KUMAR A, PRASAD M N V. Plant-lead interactions; transport, toxicity, tolerance, and detoxification mechanisms [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 166: 401-418.
- [14] 李 婷, 吴明辉, 杨馨婷, 等. 植物与微生物对重金属的抗性机制及联合修复研究进展 [J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(5): 1405-1414.
- [15] RAJKUMAR M, FREITAS H. Influence of metal resistant-plant growth-promoting bacteria on the growth of *Ricinus communis* in soil contaminated with heavy metals [J]. Chemosphere, 2008, 71: 834-842.
- [16] 刘英杰, 朱雪梅, 林立金, 等. 冬季农田杂草芥菜对铅的生理响应及积累特性研究 [J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 29-36.
- [17] 袁金玮, 陈 笈, 陈 芳, 等. 强化植物修复重金属污染土壤的策略及其机制 [J]. 生物技术通报, 2019, 35(1): 120-130.
- [18] 黄秋良, 杨先吉, 罗佳佳, 等. 不同微生物菌剂组合处理对芳香樟生长和精油积累的影响 [J]. 植物资源与环境学报, 2020, 29(2): 38-45.
- [19] GE X Y, HE C E, LI T, et al. Effect of *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas fluorescens* on growth of greenhouse tomato and rhizosphere microbial community [J]. Journal of Northeast Agricultural University (English Edition), 2015, 22(3): 32-42.
- [20] 陈 奇, 王 妹, 蔡新华. ETS 微生物菌肥对养蟹稻田水环境及稻蟹产量的影响 [J]. 渔业现代化, 2017, 44(2): 20-24.
- [21] 李 泽, 谭晓风, 卢 锐, 等. 干旱胁迫对两种油桐幼苗生长、气体交换及叶绿素荧光参数的影响 [J]. 生态学报, 2017, 37(5): 1515-1524.
- [22] 曹生奎, 冯 起, 司建华, 等. 植物水分利用效率研究方法综述 [J]. 中国沙漠, 2009, 29(5): 853-858.
- [23] 卢 楠, 魏 样, 李 燕. 5 种矿区土著植物对铅污染土壤的修复潜力研究 [J]. 环境工程, 2022, 40(11): 134-142.
- [24] CHANDRA H, KUMARI P, PRASAD R, et al. Antioxidant and antimicrobial activity displayed by a fungal endophyte *Alternaria alternata* isolated from *Picrorhiza kurroa* from Garhwal Himalayas, India [J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2021, 33: 101955.
- [25] RAKLAMI A, TAHIRI A I, BECHTAOUI N, et al. Restoring the plant productivity of heavy metal-contaminated soil using phosphate sludge, marble waste, and beneficial microorganisms [J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, 99: 210-221.
- [26] 简敏菲, 史雅甜, 陈 涛, 等. 重金属镉、铅胁迫下湿地植物丁香蓼的生理生化特征研究 [J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2017, 41(1): 93-98.
- [27] PUNAMIYA P, DATTA R, SARKAR D, et al. Symbiotic role of *Glomus mosseae* in phytoextraction of lead in vetiver grass [*Chrysopogon zizanioides* (L.)] [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 177: 465-474.
- [28] 江润海, 姜冉冉, 朱城强, 等. 微生物强化植物修复铅污染土壤的机制研究进展 [J]. 生物技术通报, 2023, 39(8): 114-125.
- [29] KARIMI A, KHODAVERDILOO H, RASOULI-SADAGHIANI M H, et al. Microbial-enhanced phytoremediation of lead contaminated calcareous soil by *Centaurea cyanus* L. [J]. Clean-Soil, Air, Water, 2018, 46(2): 1700665.
- [30] SHARMA P, DUBEY R S. Lead toxicity in plants [J]. Brazilian Journal of Plant Physiology, 2005, 17(1): 35-52.
- [31] 郭 飞, 吉喜斌, 金博文, 等. 干旱区荒漠-绿洲过渡带 3 种典型灌木气孔导度对环境变化的响应及其对蒸腾的调控 [J]. 高原气象, 2021, 40(03): 632-643.
- [32] FLÜTSCH S, WANG Y Z, TAKEMIYA A, et al. Guard cell starch degradation yields glucose for rapid stomatal opening in Arabidopsis [J]. The Plant Cell, 2020, 32: 2325-2344.
- [33] ZHANG D D, TIAN C J, YIN K Q, et al. Postinvasive bacterial resistance conferred by open stomata in rice [J]. Molecular Plant-Microbe Interactions, 2019, 32(2): 255-266.
- [34] 刘沙沙, 付建平, 蔡信德, 等. 重金属污染对土壤微生物生态特征的影响研究进展 [J]. 生态环境学报, 2018, 27(6): 1173-1178.
- [35] 刘 纯, 王亚东, 崔鹏飞, 等. 西北旱区不同灌水下限对紫花苜蓿生长与光合特征的影响 [J]. 中国草地学报, 2021, 43(4): 1-12.
- [36] GUPTA D K, HUANG H G, CORPAS F J. Lead tolerance in plants; strategies for phytoremediation [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(4): 2150-2161.
- [37] SU R, XIE T, YAO H, et al. Lead responses and tolerance mechanisms of *Koeleria paniculata*: a newly potential plant for sustainable phytoremediation of Pb-contaminated soil [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19: 14968.
- [38] 邓 婷, 吴家龙, 卢维盛, 等. 不同玉米品种对土壤镉富集和转运的差异性 [J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(6): 1265-1271.
- [39] REZVANI M, ARDAKANI M R, REJALI F, et al. Uptake of heavy metals by mycorrhizal barley (*Hordeum vulgare* L.) [J]. Journal of Plant Nutrition, 2015, 38(6): 904-919.
- [40] XIAO Y H, LIU H M, CHEN R, et al. Heteroauxin-producing bacteria enhance the plant growth and lead uptake of *Miscanthus floridulus* (Lab.) [J]. International Journal of Phytoremediation, 2022, 24(11): 1205-1212.