

# 木芙蓉对土壤铅离子的耐性及转移富集特性研究<sup>①</sup>

黄泽梅, 周强英, 李 凌

西南大学 园艺园林学院, 重庆 400715

**摘要:** 为了解木芙蓉对土壤铅污染的修复潜力, 以木芙蓉扦插幼苗为材料, 通过盆栽试验研究不同程度土壤铅污染对木芙蓉幼苗生长、生理生化指标及铅离子转移富集特性的影响。结果表明: 轻度(300 mg/kg)、中度(800 mg/kg)铅污染对木芙蓉幼苗生物量的影响不显著, 植株生长正常; 重度(1 300 mg/kg)铅污染对木芙蓉光合系统、抗氧化系统造成严重伤害, 显著抑制了木芙蓉幼苗根长、根粗和生物量的增长。随着铅污染质量分数升高, 幼苗根系铅含量显著上升, 在重度铅污染时达到最大值, 为 1 610.106 mg/kg; 地上地下部转移率在重度铅污染时达到最大值, 为 0.093; 地下部富集系数在重度铅污染下大于 1, 与对照差异明显。说明木芙蓉根系对铅离子有较强富集能力, 向茎叶转移较少, 可作为修复轻度、中度铅污染的树种之一。

**关键词:** 木芙蓉; 铅污染; 耐受性; 转移富集

**中图分类号:** S718.45

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5471(2020)01-0108-05

随着工业生产的迅速发展,“三废”排放量大幅增加,同时农药、化肥等的不合理施用及污水灌溉,均导致土壤重金属污染日益严重<sup>[1]</sup>。2014年发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示<sup>[2]</sup>,干线公路两侧的点位超标率达到20.3%,铅(Lead, Pb)是其中的主要污染物。不同于有机污染,重金属一般难以被降解,铅会随雨水淋溶进入土壤下层富集,污染地下水;同时在植物中长期存在并积累,影响植物生长,若通过食物链进入并富集在人体内,则会严重危害人体健康<sup>[3-5]</sup>。治理铅污染的方法很多,与传统的物理、化学和工程方面的治理技术相比,植物修复成本低,无二次污染,并且适用于大范围的污染防治<sup>[6]</sup>。近年来,有关铅污染的植物修复研究大多是利用草本植物进行,虽然能富集高浓度的重金属离子,但草本生物量小、生长缓慢、主根系不发达<sup>[7]</sup>;因此,筛选生物量大,根系发达,耐性强的木本植物进行铅污染治理具有较大实践价值。

木芙蓉(*Hibiscus mutabilis* Linn.)为西南地区常见园林绿化树种,适应性强,耐瘠薄,分布范围广,具有较强的观赏性<sup>[8]</sup>。本研究以木芙蓉为研究对象,采用盆栽试验方式,研究木芙蓉对铅污染的耐受性和对铅离子的转移富集状况,为选择具有较大潜力的铅污染修复树种提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验材料为木芙蓉1年生扦插幼苗,于2018年3月进行扦插生根培育,供试土壤为重庆紫色土,于西南大学3号温室后试验田中采集。土壤pH值6.48,全氮0.832 g/kg,有效氮69.7 mg/kg,有效钾230.9 mg/kg,有效磷67.1 mg/kg,有机质1.55 g/kg,总铅16.2 mg/kg。

### 1.2 试验设计

待扦插苗均出苗完全展叶后,选取生长状况相近幼苗在西南大学3号温室后试验田进行盆栽试验。根

① 收稿日期: 2019-03-26

作者简介: 黄泽梅(1994—),女,硕士研究生,主要从事园林植物育种与栽培研究。

通信作者: 李 凌,博士,教授。

据土壤环境质量标准(GB15618—1995)中铅二级标准的 1~3 倍、3~5 倍和 >5 倍, 分别设置轻度污染(铅质量分数为 300 mg/kg)、中度污染(铅质量分数为 800 mg/kg)和重度污染(铅质量分数为 1 300 mg/kg)3 个梯度的醋酸铅溶液. 以蒸馏水作对照, 分别对盆栽木芙蓉扦插苗进行一次性的浇灌处理, 保证盆土浇透, 至盆底托盘有处理液渗出. 每个浓度处理 5 盆, 3 次重复, 共 15 盆.

### 1.3 测定指标与方法

#### 1.3.1 生长指标

处理前 1 d 与处理后 30 d, 60 d 和 90 d 分别用卷尺测定木芙蓉株高, 计算株高净生长量. 处理 90 d 后, 拔出幼苗测量根长、根粗、植株鲜质量, 于烘箱内 105 °C 杀青 30 min, 80 °C 烘干至恒质量后称植株干质量.

#### 1.3.2 生理指标

处理 30 d 时采取幼苗相同部位完全展开功能叶测定叶片各项生理指标, 丙酮乙醇混合液提取法测定叶绿素质量分数, 考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白, 氮蓝四唑(NBT)法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性, 硫代巴比妥酸比色法测定丙二醛(MDA)质量分数<sup>[9]</sup>.

#### 1.3.3 植株中铅的测定

将测定干质量后的植株用植物粉碎机粉碎, 过 1 mm 筛, 经 HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> 混合消化后, 采用原子吸收分光光度计测定植株根、茎和叶中铅的质量分数.

### 1.4 数据处理

采用 SPSS 19.0 和 Microsoft Excel 2010 进行数据分析与作图.

## 2 结果与分析

### 2.1 不同程度铅污染对木芙蓉幼苗生长性状的影响

试验结果看出, 在铅污染下, 木芙蓉幼苗株高净生长量均低于对照. 处理 30 d 时, 中度铅污染下的株高净生长量最小, 比对照降低 23.69%; 处理 60 d 时, 轻、中、重度铅污染下株高净生长量分别比对照降低 15.61%, 19.66%, 17.48%, 差异均具有统计学意义; 处理 90 d 时, 重度铅污染下株高净生长量比对照降低 10.05%, 比轻、中度铅污染下分别增加了 7.11%, 7.21%; 随着铅污染质量分数的增加, 木芙蓉根长和根粗呈逐渐降低趋势, 铅污染为重度时木芙蓉根长与根粗均降至最低, 分别比对照减少了 30.84% 和 21.16%(表 1).

铅污染下的木芙蓉鲜质量均低于对照, 其中重度污染下的鲜质量与干质量最低值分别为 31.85 g 和 10.34 g, 分别低于对照 38.16% 和 44.14%, 且与对照相比, 差异均具有统计学意义; 轻、中度污染下鲜质量与干质量高于重度污染(铅含量 1 300 mg/kg)处理, 但差异不具有统计学意义.

表 1 不同程度铅污染对木芙蓉幼苗生长的影响

处理	株高净生长量/cm			根长 /cm	根粗 /mm	叶片鲜质量 /g	叶片干质量 /g
	30 d	60 d	90 d				
对照	7.05±0.45a	12.36±0.35a	14.22±0.86a	31.48±1.03a	1.28±0.02a	51.50±3.14a	18.51±2.67a
轻度	6.65±0.64ab	10.43±0.67b	11.94±0.64b	29.44±0.25ab	1.16±0.06b	36.09±5.37ab	13.83±1.26ab
中度	5.38±0.18c	9.93±0.43b	11.93±0.18b	25.37±0.92ab	1.04±0.05c	39.18±4.11ab	14.42±2.16ab
重度	5.94±0.66bc	10.20±0.28b	12.79±0.66ab	21.77±1.84b	1.01±0.05c	31.85±3.47b	10.34±1.18b

注: 轻度、中度和重度污染的铅质量分数分别为 300 mg/kg, 800 mg/kg, 1 300 mg/kg 的醋酸铅溶液, 对照为蒸馏水, 分别对盆栽木芙蓉扦插苗进行一次性的浇灌处理. 同列数值后不同小写字母表示处理间差异在 5% 水平有统计学意义, 表 2 至表 4 同.

### 2.2 不同程度铅污染对木芙蓉叶片生理指标的影响

试验结果看出, 木芙蓉幼苗在铅污染下, 叶绿素 a+b 值随着处理质量分数的升高而大体降低, 其中铅污染浓度为重度时叶绿素 a+b 含量最低, 分别较对照和 800 mg/kg 处理减少 36.53%, 26.99%, 均具有统计学意义; 叶绿素 a、b 值也在重度铅污染下分别降至最低, 分别低于对照 36.29% 和 37.18%.

在不同质量分数铅污染下, 木芙蓉幼苗可溶性蛋白均大于对照, 呈先增后降趋势, 在中度铅污染时达

到最大值, 是对照的 2.34 倍; MDA 质量分数也随铅污染质量分数增加呈先升后降趋势, 中度铅污染时 MDA 值最大, 是对照的 1.52 倍, 轻、中、重度铅污染下 MDA 质量分数分别比对照增加了 9.11%, 52.30%, 6.80%, 差异均具有统计学意义; 中度铅污染下, SOD 活性是对照的 1.10 倍, 而在中度和重度污染下, SOD 活性分别比对照减少了 29.00%, 35.14%(表 2)。

表 2 不同程度铅污染对木芙蓉幼苗叶片生理指标的影响

处理	叶绿素 a+b /mg·g <sup>-1</sup>	叶绿素 a /mg·g <sup>-1</sup>	叶绿素 b /mg·g <sup>-1</sup>	SOD 活性 /U·g <sup>-1</sup>	可溶性蛋白 /mg·g <sup>-1</sup>	MDA 质量分数 /μmol·g <sup>-1</sup>
对照	1.62±0.28a	1.18±0.20a	0.43±0.08a	97.99±1.75b	22.70±1.04b	22.70±1.08b
轻度	1.2±0.05bc	0.91±0.06bc	0.35±0.02ab	107.63±1.76a	17.27±0.60c	24.77±2.50b
中度	1.40±0.07ab	1.01±0.06ab	0.40±0.04ab	69.58±0.93c	29.06±1.49a	34.57±0.60a
重度	1.03±0.09c	0.75±0.07c	0.27±0.03b	63.55±3.31d	20.92±1.60b	24.24±0.58b

### 2.3 不同程度铅污染下木芙蓉幼苗各器官的铅离子质量分数

试验结果看出, 不同浓度铅污染下, 木芙蓉幼苗根、叶对铅离子的吸收差异有统计学意义, 不同器官中根系铅离子质量分数均为最高. 同一污染度不同器官中铅离子质量分数表现为: 轻度(300 mg/kg)铅污染下, 从大到小依次为根、茎、叶; 中、重度(800 mg/kg, 1 300 mg/kg)铅污染下, 从大到小依次为根、叶、茎. 幼苗根、叶中铅离子含量随着铅质量分数增加呈上升趋势, 但上升幅度不同, 根、叶中铅离子质量分数均在重度铅污染下分别达到最大值, 分别为 1 610.106 mg/kg, 41.402 mg/kg, 是对照的 108.87 倍和 118.34 倍; 茎中铅离子质量分数随铅污染程度增加而先增加后降低, 在中度铅(800 mg/kg)污染时达到最大值, 为 36.598 mg/kg, 是对照的 27.31 倍(表 3)。

表 3 不同程度铅污染对木芙蓉幼苗根、茎、叶铅离子质量分数的影响

处理	根	茎	叶
对照	14.789±0.64d	1.340±0.16c	0.35±0.08d
轻度	208.366±3.06c	5.024±1.81b	2.107±0.30c
中度	796.836±2.63b	36.598±0.77a	37.200±0.64b
重度	1 610.106±37.30a	33.899±3.14a	41.402±0.96a

### 2.4 不同程度铅污染下木芙蓉幼苗的铅离子转移率及吸收富集能力

试验结果看出, 轻、中、重度铅污染下, 植株地上、地下部铅离子转移率均低于对照, 分别为 0.034, 0.093, 0.047, 比对照减少了 70.18%, 18.42%, 58.77%; 对照组根茎转移率显著高于其他处理, 重度污染下的根茎铅离子转移率最低为 0.021, 比中度污染减少了 54.35%; 3 种铅污染程度下茎叶铅离子转移率、地下部生物富集系数均随着污染质量分数的升高, 转移率、富集系数逐渐增大, 在重度铅污染下茎叶转移率、地下部生物富集系数分别达到最大值, 分别为 1.226, 1.239, 比对照增加了 372.10%, 48.03%; 轻度铅污染下植株地上部生物富集系数最低, 为 0.024, 与对照相比分别降低了 74.74%, 中、重度下植株地上部生物富集系数分别比对照降低了 3.16% 和 38.95%(表 4)。

表 4 不同程度铅污染对木芙蓉幼苗根、茎、叶间铅离子转移率的影响

处理	地上、地下部 铅离子转移率	根茎铅离子 转移率	茎叶铅离子 转移率	地下部生物 富集系数	地上部生物 富集系数
对照	0.114±0.01a	0.090±0.01a	0.260±0.03d	0.837±0.02c	0.095±0.01a
轻度	0.034±0.01d	0.024±0.01c	0.043±0.10c	0.695±0.01d	0.024±0.01c
中度	0.093±0.00b	0.046±0.00b	1.017±0.00b	0.996±0.00b	0.092±0.00a
重度	0.047±0.00c	0.021±0.00c	1.226±0.09a	1.239±0.03a	0.058±0.00b

## 3 讨 论

### 3.1 不同程度铅污染对木芙蓉幼苗生长、生理特性的影响

重金属污染程度一旦超过植株对其的耐受范围, 便会对植株的形态结构、生理代谢产生毒害. 本试验中, 在轻、中和重度(300 mg/kg, 800 mg/kg 和 1 300 mg/kg)铅污染下, 对木芙蓉幼苗株高、根长生长产生

明显抑制作用的临界浓度为 800 mg/kg; 轻、中度污染对植株鲜质量和干质量的影响不显著, 说明轻、中度铅污染没有对木芙蓉生物量合成产生负效应; 重度(1 300 mg/kg)铅污染会严重抑制木芙蓉幼苗生物量增长以及地下部伸长生长和径向生长. 分析其原因, 可能是随着土壤中铅污染质量分数的增加, 植株体内富集的重金属逐渐增多, 影响了幼苗的生长、细胞分裂及多种代谢活动<sup>[10]</sup>.

叶绿素是植物光合作用的物质基础, 叶绿素 a、b 质量分数的高低决定着光合作用的强弱<sup>[11]</sup>. 本试验中, 3 个处理木芙蓉叶绿素质量分数均低于对照, 但中度(800 mg/kg)铅污染下叶绿素质量分数大于轻、重度, 重度(1 300 mg/kg)污染下叶绿素总量及叶绿素 a、b 值均最低, 与对照差异显著, 说明重度铅污染下植物的光合系统受到严重破坏. 可能是叶绿体酶活性在重度铅污染下比例失调, 结构和功能遭到严重破坏, 导致叶绿素质量分数显著降低<sup>[12]</sup>.

可溶性蛋白是植物体内重要的渗透调节物质, 有助于维持细胞正常的生理代谢, 提高其抗逆性<sup>[12]</sup>. 本试验中, 不同质量分数铅污染下, 木芙蓉体内为适应铅污染而加速诱导蛋白质的合成, 因此表现出蛋白质质量分数的升高. 可溶性蛋白在中度(800 mg/kg)铅污染时达最大值 29.06 mg/g, 之后明显下降, 说明此时木芙蓉体内的代谢活动和生理反应较旺盛<sup>[13]</sup>, 而在重度(1 300 mg/kg)铅污染下的细胞结构可能已经被破坏, 导致蛋白质的合成受阻, 可溶性蛋白质量分数降低; 植物体内活性氧平衡遭到破坏后, 植物细胞便会发生膜脂过氧化反应, 细胞膜受到损害, 稳定性降低, MDA 是膜脂过氧化反应的最终产物, 其质量分数的大小能反应膜脂过氧化作用强度和膜损伤的程度<sup>[14]</sup>. 本试验中, 轻、中、重度铅污染下木芙蓉 MDA 质量分数均显著高于对照, 表明铅污染引起了木芙蓉产生氧化胁迫, 在中度(800 mg/kg)铅污染下 MDA 达到最大值, 为 34.568  $\mu\text{mol/L}$ , 说明膜脂过氧化程度增大, 导致细胞膜透性变大, 细胞毒害作用增加; 之后 MDA 质量分数降低, 可能是植物为了抵御重度铅污染的毒害, 启动自身的保卫系统降低 MDA 浓度<sup>[13]</sup>; SOD 能清除植物体内多余的超氧阴离子, 减少对膜系统的伤害, 其活性大小能反映植物抗逆性强弱<sup>[14]</sup>. 本试验中, SOD 在轻度(300 mg/kg)铅污染时达最大值, 之后活性明显降低, 可能是因为中高质量分数的铅污染使植物细胞内产生过多的  $\text{H}_2\text{O}_2$  衍生物, 对植物的伤害超过了 SOD 的清除阈值, SOD 活性受到限制<sup>[15]</sup>.

### 3.2 不同程度铅污染对木芙蓉幼苗铅离子转移富集能力的影响

植物通过对重金属离子的各种跨膜抑制机制, 将大量重金属离子固定在根部, 限制其往地上部位转移, 降低体内重金属质量分数, 进而起到减轻重金属危害的作用<sup>[16]</sup>. 分析木芙蓉各器官间铅离子质量分数及转移、富集情况, 发现根系和地上部分铅离子质量分数随着污染浓度的升高呈上升趋势, 但增加幅度不同, 根系铅离子质量分数增加幅度比地上部分大, 表明不同程度铅污染对木芙蓉体内铅离子质量分数影响很大. 重度(1 300 mg/kg)铅污染下根系铅离子质量分数最大, 而茎铅离子质量分数却不是最大值, 说明重铅污染对木芙蓉根系和茎的铅离子富集存在差异. 茎叶铅离子转移率与地下部铅离子富集系数逐渐升高, 地上与地下部转移率、根茎转移率、地上部富集系数先升高后降低, 均在中度铅污染下达到最大值. 可见, 铅质量分数为 800 mg/kg 时是木芙蓉幼苗的一个关键阈值, 当铅质量分数大于该值时, 铅离子在组织中的储存、转移发生了改变, 向叶的铅离子转移量增多, 可能是因为重度铅污染下, 木芙蓉的生长、生理代谢活动遭到破坏, 影响了铅离子在其体内的转移与富集<sup>[17]</sup>.

## 4 结 论

1) 轻、中度(300 mg/kg, 800 mg/kg)铅污染下木芙蓉幼苗株高和根长生长虽然低于对照, 但均能保持正常生长状态, 而重度(1 300 mg/kg)铅污染对光合系统、抗氧化系统等造成伤害, 明显限制了木芙蓉幼苗地下部分和生物量的增长.

2) 转移率与富集系数表明, 木芙蓉幼苗根系具有较强铅富集能力, 向地上部转移少, 茎与叶的铅离子聚集能力相当, 可将木芙蓉应用于轻、中度(300 mg/kg, 800 mg/kg)铅污染土壤的修复.

### 参考文献:

[1] 胡鹏杰, 李 柱, 钟道旭, 等. 我国土壤重金属污染植物吸取修复研究进展 [J]. 植物生理学报, 2014, 50(5): 577-584.

- [2] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报 [J]. 国土资源通讯, 2014(8): 26-29.
- [3] ALI H, KHAN E, SAJAD M A. Phytoremediation of Heavy metals—Concepts and Applications [J]. Chemosphere, 2013, 91(7): 869-881.
- [4] 段德超, 于明革, 施积炎. 植物对铅的吸收、转运、累积和解毒机制研究进展 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(1): 287-296.
- [5] 邱清华, 邓绍云, 黄娟, 等. 铅胁迫对十字花科种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. 中国农学通报, 2010, 26(18): 175-179.
- [6] PULFORD I. Phytoremediation of Heavy Metal-Contaminated Land by Trees—a Review [J]. Environment International, 2003, 29(4): 529-540.
- [7] 韦朝阳, 陈同斌. 重金属污染植物修复技术的研究与应用现状 [J]. 地球科学进展, 2002, 17(6): 833-839.
- [8] 陈功, 李骏捷, 徐慧, 等. 锦葵科观赏花卉资源及园林应用 [J]. 中国观赏园艺研究进展, 2014: 98-102.
- [9] 高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2015: 71-211.
- [10] 卢玲丽. 超积累植物东南景天 (*Sedum alfredii* Hance) 对锡的吸收及转运机制研究 [D]. 浙江: 浙江大学, 2009.
- [11] 蒋运生, 柴胜丰, 唐辉, 等. 光照强度对广西地不容光合特性和生长的影响 [J]. 广西植物, 2009, 29(6): 792-796, 723.
- [12] 鲁艳, 谌月, 李凌. 香樟、君迁子实生苗对土壤  $Cd^{2+}$  污染的修复潜力研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2017, 42(11): 44-51.
- [13] 何安. 日本榎木和香椿对铅、镉胁迫的响应研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2017.
- [14] 王君. 麻栎 (*Quercus acutissima* Carr.) 幼苗对  $Cd^{2+}$ 、 $Pb^{2+}$  复合污染的生理耐性及累积特性研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [15] 王小雪. 海滨木槿不同家系对重金属 Cd 胁迫的响应 [D]. 重庆: 西南大学, 2012.
- [16] AKINCII E, AKINCIS, YILMAZK. Response of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) to Lead Toxicity: Growth, Element Uptake, Chlorophyll and Water Content [J]. Afr J Agric Res, 2010, 5(6): 416-423.
- [17] 周建, 江泽平, 魏远. 重金属铅胁迫对刺槐幼苗生长及铅离子转运特性的影响 [J]. 浙江农林大学学报, 2016, 33(5): 742-748.

## *Hibiscus Mutabilis* Linn. in Pb-Polluted Soil

HUANG Ze-mei, ZHOU Qiang-ying, LI Ling

School of Horticulture and Landscape Architecture, Southwest University, Chongqing 400715, China

**Abstract:** In order to explore the potential of *Hibiscus mutabilis* Linn. for Pb-polluted soil, cuttings of them were used as experimental materials to study the growth, physiology and biochemical indexes and lead ion transfer and accumulation characteristics, under different concentrations of lead ion, by pot experiment. The results show that the effects of light (300 mg/kg) and medium (800 mg/kg) lead on *Hibiscus mutabilis* Linn. biomass were not significant, with plants grew normally; heavy (1 300 mg/kg) lead caused serious damage to the photosynthetic system and antioxidant system, so the growth of root length, root thickness and biomass of *Hibiscus mutabilis* Linn. cuttings were significantly inhibited. With the lead concentration increasing, the roots' lead content increased significantly and to maximum 1 610.106 mg/kg on heavy lead; the above-ground transfer rate reached a maximum value of 0.093 in moderate lead; the underground enrichment factor was greater than 1 under highly contaminated soils, which was significantly different from the control. It indicated that the roots of *Hibiscus mutabilis* Linn. had strong enrichment abilities for lead ions and transplanted to stems and leaves less. So *Hibiscus mutabilis* Linn. could be used as one of the tree species to repair light and medium Pb-polluted soil.

**Key words:** *Hibiscus mutabilis* Linn.; lead pollution; tolerance; transport and accumulation