

楝和梧桐对镉胁迫的生理响应及富集特性^①

陈 瑶, 李 凌, 周强英, 黄泽梅

西南大学 园艺园林学院, 重庆 400715

摘要:以楝(*Melia azedarach*)、梧桐(*Firmiana plataniifolia*)为试验材料,采用盆栽试验的方式研究 2 个树种在不同浓度土壤镉胁迫(轻度 1 mg/kg、中度 10 mg/kg、重度 50 mg/kg)下的耐性及富集能力。结果表明:重度镉胁迫下,楝和梧桐叶片和根系受到明显胁迫,且随时间延长而逐渐缓解。镉胁迫下,楝和梧桐生物量、总叶绿素呈先后减的趋势,MDA 增大,楝 SOD 活性升高,梧桐 SOD 活性显著降低。梧桐长期长势优于楝,表现出更强的耐性。楝对镉的累积情况为根系大于地上部,梧桐则表现为地上部大于根部。梧桐的单株镉富集量大于楝,表现出更强的镉富集能力,适用于重度镉污染土壤的植物提取或植物固定。综合来看,梧桐具备更强的土壤镉修复潜力。

关键词:楝;梧桐;镉;生理响应;富集特性

中图分类号: S718.43

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2020)09-0066-05

近年来,工业三废的大量排放、大气沉降、污水灌溉、农药和肥料的不合理使用造成了严重的土壤重金属污染^[1]。2014 年国家发布的《全国土壤污染状况调查公报》^[2]指出,镉的点位超标率达到 7.0%,在 8 种无机污染物中居最高,是目前污染最严重的重金属之一。镉具有很强的致癌致畸作用和生物累积效应,能够引发骨痛病、肝脏损伤^[3],潜在威胁人体健康。植物修复是生物修复的一种,它与传统的物理、化学修复相比具有成本低、不破坏土壤、不引起二次污染的优点。而木本植物与草本相比生物量大、寿命长,具备良好的环境生态效应,其可以将重金属累积在根、茎内,收获的木材可用作家具、建材,避免重金属再进入食物链。

楝(*Melia azedarach*)为楝科、楝属落叶乔木,其生长速度快,对土壤要求不严,木材易加工^[4],同时能大量吸收有毒有害气体,是优良的城市及矿区绿化树种^[5]。梧桐(*Firmiana plataniifolia*)是梧桐科、梧桐属落叶大乔木,其树形优美、寿命长、生长速度快,对多种有害气体有较强耐性,是优良的矿区绿化^[6]及农田防护林速生经济树种^[7]。康薇等^[8]对矿区植物调研发现,苦楝、梧桐对土壤镉的平均富集系数大于 1,具备优良的土壤镉修复潜力。

本研究以苦楝、梧桐 1 年生幼苗为试验材料,通过盆栽试验的方式,从形态特征、生物量、生理响应、重金属累积分配等方面探究 2 个树种对不同程度土壤镉污染的耐性及富集能力差异,以期为筛选具优良土壤镉修复潜力的树种用于植物修复提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以 1 年生楝、梧桐幼苗为试验材料。种子于 2017 年 10 月采集于西南大学校园内,干藏至来年 3 月^[9],50 ℃温水浸种催芽、播种。5 月挖取长势一致的幼苗(株高约 15~20 cm),移栽至底部带托盘的营养钵中

① 收稿日期:2020-01-20

作者简介:陈 瑶(1995-),女,硕士研究生,主要从事观赏植物培育与生理研究。

通信作者:李 凌,教授。

(直径 28 cm, 高 20 cm), 每盆装紫色土 5 kg(干质量), 移至西南大学农场遮阳网下培养 1 个月。

1.2 试验设计

用 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ (分析纯)配制不同浓度的 CdCl_2 溶液各 300 mL, 一次性浇入营养钵中, 渗出液反复回浇, 直到 Cd^{2+} 与盆土均匀混合。施加重金属后 2 d 内不浇水, 在实生苗上方搭建雨棚以防止雨水的淋溶作用, 后期进行常规管理。参照《土壤环境质量标准 GB15618—2018》设置 1 个对照组及 3 个镉处理组: 轻度污染(1 mg/kg)、中度污染(10 mg/kg)和重度污染(50 mg/kg)。每个处理 3 次重复(盆), 每盆 3 株。

1.3 指标测定与数据分析

处理 90 d 后收获植株, 用自来水洗净后, 再用蒸馏水冲洗 3 遍, 于 105 ℃杀青 30 min, 80 ℃恒温烘干至恒重, 称量地上部、根部及总生物量。将烘干材料研磨过 1 mm 筛, 硝酸-高氯酸混合消化后用 Z-5000 原子吸收分光光度计测定植株地上部、根部 Cd 含量^[10]。处理 10 d, 20 d, 30 d, 40 d 和 50 d 分别摘取幼苗功能叶, 采用丙酮乙醇混合液提取法^[10]测定叶绿素质量分数, 硫代巴比妥酸法^[10]测定丙二醛(MDA)含量, 氮蓝四唑法^[10]测定超氧化物歧化酶(SOD)活性, 考马斯亮蓝法^[10]测定可溶性蛋白含量。

采用 Microsoft Excel 2007 进行数据统计, SPSS. 25 进行方差分析及差异显著性分析, Duncan 多重比较检验各处理间组与对照间是否具有显著差异性, 采用 Orgin7. 5 进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 土壤 Cd^{2+} 胁迫下楝和梧桐 1 年生幼苗的形态学及生长特性

2.1.1 形态学特征

试验过程中, 轻、中度镉胁迫下, 楝、梧桐未出现明显的毒害症状。处理 10 d 后, 楝在重度镉胁迫下叶片褪绿发黄、叶脉扭曲, 随着时间的延长而逐渐缓解。梧桐在重度镉胁迫下叶片出现黑色病斑, 叶脉粗大呈红色, 叶柄发黑, 也随时间的延长而缓解。处理 90 d 后, 随镉浓度升高, 楝根长受到明显抑制, 根系变小, 梧桐全株未表现出毒害症状。

2.1.2 对各部位的生物量的影响

试验结果看出, 随重金属浓度升高, 楝、梧桐各部位生物量均先增大后减小, 除了梧桐根部, 均在轻度处理组达到峰值, 地上部生物量分别比对照(CK)增加了 32. 44%, 101. 6%, 差异有统计学意义($p<0. 01$)。重度镉胁迫下, 楝、梧桐各部分生物量小幅度降低。90 d 后, 梧桐各处理组总生物量增幅均大于楝, 体现出更强的镉耐性(表 1)。

表 1 土壤 Cd^{2+} 胁迫对楝和梧桐单株生物量的影响 g

树种	处理	地上部生物量	根部生物量	总生物量
楝	CK	4. 87±0. 48BCb	5. 11±0. 52ABab	9. 98±0. 48Bc
	Cd1	6. 45±0. 31Aa	6. 05±0. 34Aa	12. 50±0. 22Aa
	Cd10	5. 14±0. 57Bb	5. 74±0. 75ABa	10. 88±0. 33Bb
	Cd50	4. 01±0. 58Cc	4. 43±0. 08Bb	8. 43±0. 37Cd
梧桐	CK	4. 40±0. 57Bc	6. 95±0. 43ABa	11. 34±0. 91Cc
	Cd1	8. 87±0. 67Aa	7. 04±0. 34ABa	15. 91±0. 36Aa
	Cd10	5. 73±0. 56Bb	7. 46±0. 39Aa	13. 19±0. 72Bb
	Cd50	4. 26±0. 44Bc	6. 26±0. 12Bb	10. 52±0. 51Cc

注: Cd1, Cd10 和 Cd50 分别代表镉处理的轻度污染(1 mg/kg)、中度污染(10 mg/kg)和重度污染(50 mg/kg)。同列数据后不同小写字母表示差异在 5%水平有统计学意义, 不同大写字母表示差异在 1%水平有统计学意义。图 1 至图 3、表 2 同。

2.2 土壤 Cd^{2+} 胁迫下楝、梧桐 1 年生幼苗的生理耐性

2.2.1 对叶绿素的影响

试验结果看出, 镉胁迫 10 d, 楝各处理组叶绿素质量分数激增, 分别比 CK 高 120. 6%, 82%, 64. 4%, 差异有统计学意义($p<0. 05$)。10 d 以后, 重度处理组叶绿素质量分数均低于 CK, 50 d 降至最低。胁迫前 40 d, 梧桐叶绿素质量分数随镉浓度升高而先增大后减小, 在中度(10 mg/kg)处理组升至峰值, 10 d 比 CK 高 21. 74%($p<0. 05$)。处理 50 d 胁迫程度加重, 梧桐叶绿素含量随镉浓度升高而递减(图 1)。

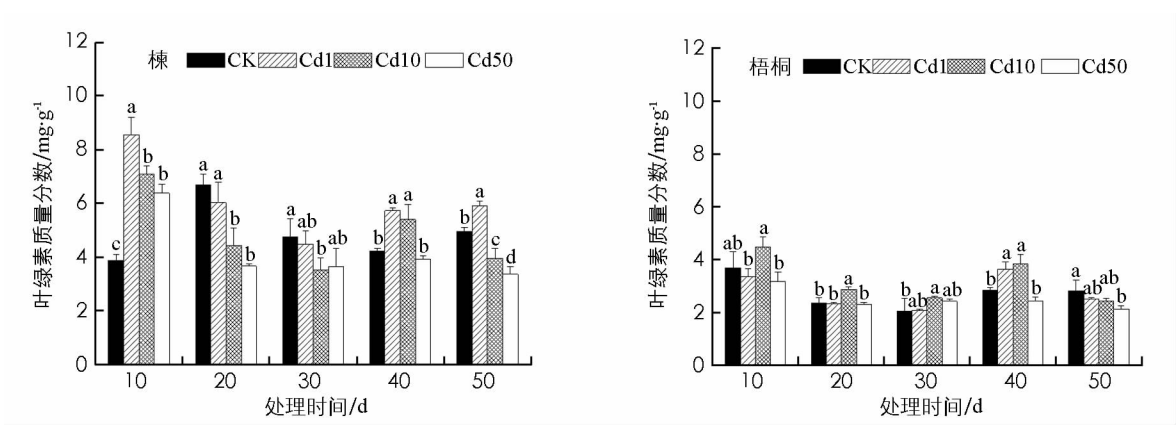


图 1 土壤 Cd²⁺ 胁迫对棟和梧桐叶绿素质量分数的影响

2.2.2 对 MDA 含量的影响

由图 2 可知, 镉胁迫下, 棟叶片 MDA 含量增加, 整体随镉浓度升高而递增. 各处理组 MDA 含量在 10 d 达到最大, 分别比 CK 增加了 51.32%, 164.5%, 178.3%, 差异有统计学意义 ($p < 0.05$). 随镉浓度升高, 梧桐 MDA 含量整体递增, 重度处理组在 10 d 时到达峰值, 为 34.1 nmol/g, 为对照的 2.13 倍, 差异有统计学意义 ($p < 0.01$).

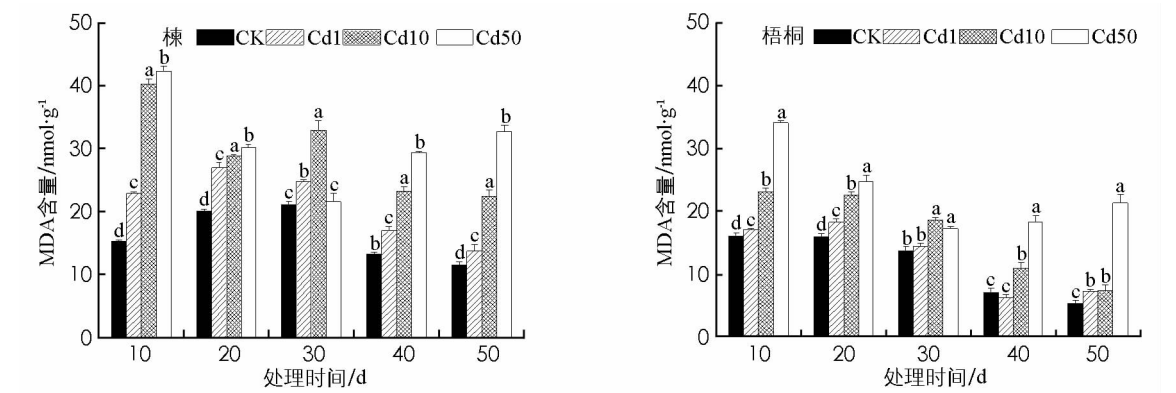


图 2 土壤 Cd²⁺ 胁迫对棟和梧桐 MDA 含量的影响

2.2.3 对 SOD 活性的影响

由图 3 可知, 胁迫前 20 d, 棟体内 SOD 活性随镉浓度升高而先升后降, 在轻度 (1 mg/kg) 胁迫下达到峰值, 20 d 比 CK 高 20.77%, 差异有统计学意义 ($p < 0.05$). 镉胁迫前 20 d, 梧桐 SOD 活性随镉浓度升高而降低, 后 30 d 轻度胁迫组 SOD 活性激增, 第 30 d 比 CK 高 18.11% ($p < 0.05$).

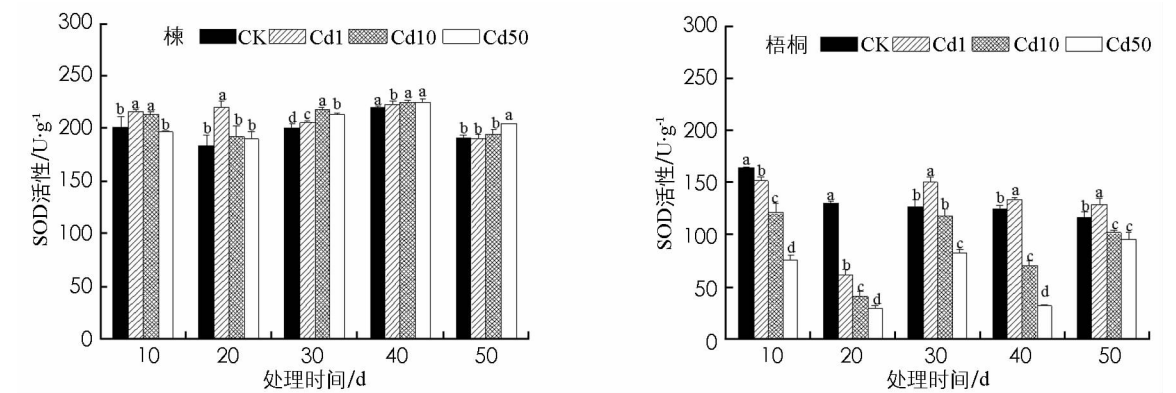


图 3 土壤 Cd²⁺ 胁迫对棟和梧桐 SOD 活性的影响

2.3 棟、梧桐对重金属镉的富集特性

试验结果看出, 所有处理浓度下, 棟体内镉质量分数均表现为根部大于地上部; 梧桐在重度处理组镉

质量分数分布为根部大于地上部, 其他处理下为地上部大于根部. 楝、梧桐各部位镉质量分数及单株富集量均随外源镉的升高而增大. 楝、梧桐单株镉富集量分别在重度污染下达到 162.590 mg 和 369.438 mg. 除了轻度处理组, 梧桐单株镉富集量均大于楝, 说明梧桐在中、重度污染下对镉的富集能力强于楝. 相同处理水平下, 梧桐的镉转移系数大于楝, 体现出更强的镉转运能力(表 2).

表 2 楝和梧桐各部位镉的分布

树种	处理	根部/mg · kg ⁻¹	地上部/mg · kg ⁻¹	单株富集量/mg	转移系数(TF)
楝	CK	0.005±0.002Dd	0.003±0.001Cc	0.043±0.011Dd	0.556±0.164Aa
	Cd1	5.066±0.943Cc	1.005±0.181Bb	37.13±5.083Cc	0.206±0.07Bb
	Cd10	12.40±0.25Bb	1.320±0.172Bb	77.97±2.293Bb	0.106±0.012Bb
	Cd50	32.01±1.73Aa	5.230±0.656Aa	162.6±10.31Aa	0.163±0.012Bb
梧桐	CK	0.002±0.001Cc	0.009±0.001Cc	0.053±0.015Cc	3.937±0.245Aa
	Cd1	1.230±0.131Cc	1.903±0.285Cc	25.54±3.837Cc	1.556±0.143Bb
	Cd10	5.045±0.096Bb	7.512±0.788Bb	80.68±7.265Bb	1.517±0.286Bb
	Cd50	39.45±1.385Aa	28.75±3.140Aa	369.4±31.36Aa	0.732±0.091Cc

3 讨论与结论

研究发现, 当植物体内镉含量超过临界值便会引起植物生长迟缓、根系发育受阻^[11]、生物量降低^[12], 甚至死亡. 本试验中, 楝、梧桐的胁迫症状体现出 2 个树种对轻、中度镉污染有较强的耐性, 对重度镉污染有短期的敏感性及长期的耐受能力. 生物量变化则说明 2 个树种均在 10 mg/kg 至 50 mg/kg 之间存在一个耐镉临界值, 胁迫浓度高出这个值植物生长受到抑制.

本试验中, 楝、梧桐在镉胁迫下叶绿素质量分数整体表现为先升后降, 与苹果幼苗^[13]的研究结果一致. 可能是低浓度镉的络合物促进了植物对于土壤中必需元素的吸收, 促进了叶啉环的合成, 增加了叶绿素质量分数^[14], 而重度镉可能破坏了叶绿素生物合成途径相关酶结构^[15], 导致叶绿素含量降低. MDA 作为膜脂过氧化的产物, 其含量高低反应出细胞膜损伤程度. 楝、梧桐在镉胁迫下质膜损伤加重, 与玉米^[16]、洋甘菊^[17]研究结果相似.

研究发现大多数植物通过将镉固定在根部, 限制其长距离运输, 降低对重要生理过程的干扰^[18]. 本研究发现楝将大部分的镉累积在根部, 而梧桐在轻、中度镉胁迫下将大部分镉累积在地上部分, 体现出 2 个树种不同的镉累积策略. 根据超富集植物的定义^[19], 楝、梧桐均不是超富集植物. 木本植物相比草本具有生物量大的优点, 因此可从单株富集量来评价 2 个树种的镉富集能力. 梧桐的镉富集能力强于楝, 且具备较强的镉转运能力, 适用于重度镉污染土壤的植物提取或植物固定修复. 楝对镉的单株富集量较大, 可用于植物固定修复.

综合来看, 楝、梧桐对土壤镉胁迫耐性较强, 轻、中度土壤镉污染对 2 个树种影响不大. 梧桐对镉的长期耐性大于楝, 且具备更强的镉富集、转移能力, 适用于重度镉污染土壤的植物修复.

本试验采取盆栽试验, 能更真实地反映幼苗在自然生长条件下对镉的耐受富集特性, 但田间试验不可控因素较多, 譬如土壤理化性质、根际微生物的差异等, 影响了试验的准确性. 而盆栽培养一定程度上限制了幼苗根系的生长, 影响幼苗总生物量的增长, 这有待进一步优化. 本试验采用的材料是 1 年生幼苗, 培养时间较短, 仅能反映 2 个树种在遗传特性上对镉的耐受富集特性, 具有一定局限性. 下一步研究可以采用多年生树种, 探究植物在不同年龄阶段对镉的耐受富集能力.

参考文献:

[1] 周建军, 周桔, 冯仁国. 我国土壤重金属污染现状及治理战略 [J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(3): 315-320, 350, 封 2.
[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] YADAV S K. Heavy Metals Toxicity in Plants: an Overview on the Role of Glutathione and Phytochelatins in Heavy Metal Stress Tolerance of Plants [J]. South African Journal of Botany, 2010, 76(2): 167-179.
[4] 曾东东. 家具用苦楝集成材的研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2011.

- [5] 刘丽云. 苦楝栽培技术及应用价值 [J]. 北方园艺, 2009(9): 144-145.
- [6] 田晓锋, 魏 虹, 贾中民, 等. 重金属镉(Cd^{2+})对梧桐幼苗根生长及根系形态的影响 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2008, 33(2): 93-98.
- [7] 陈西仓. 梧桐的繁育技术 [J]. 特种经济动植物, 2005, 8(7): 33-34.
- [8] 康 薇, 鲍建国, 郑 进, 等. 湖北铜绿山古铜矿遗址区木本植物对重金属富集能力的分析 [J]. 植物资源与环境学报, 2014, 23(1): 78-84.
- [9] 董玉峰, 荀守华, 姜岳忠, 等. 苦楝育苗与造林技术 [J]. 山东林业科技, 2012, 42(5): 84-87.
- [10] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测 [M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [11] 李丰涛. 红麻对重金属的吸收特征及外源 GSH 缓解镉毒的机理研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2013.
- [12] 林凡华, 陈海博, 白 军. 土壤环境中重金属污染危害的研究 [J]. 环境科学与管理, 2007, 32(7): 74-76.
- [13] 谷绪环. 重金属 Pb 和 Cd 对苹果砧木幼苗生长发育和光合特性的影响 [D]. 青岛: 青岛农业大学, 2008.
- [14] 杨金凤, 卜玉山, 郭小燕, 等. 土壤外源镉、铅污染对油菜生长的影响研究 [J]. 陕西农业科学, 2005, 51(3): 25-28.
- [15] KASTORI R, PLESNIĞAR M, SAKAĞ Z, et al. Effect of Excess Lead on Sunflower Growth and Photosynthesis [J]. Journal of Plant Nutrition, 1998, 21(1): 75-85.
- [16] 孔祥生, 郭秀璞, 张妙霞. 镉胁迫对玉米幼苗生长及生理生化的影响 [J]. 华中农业大学学报, 1999, 18(2): 111-113.
- [17] 孙 华. 镉、铅胁迫对野生地被植物甘野菊种子萌发、幼苗生长及生理特性的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.
- [18] CLEMENS S, AARTS M G, THOMINE S, et al. Plant Science: The Key to Preventing Slow Cadmium Poisoning [J]. Trends in Plant Science, 2013, 18(2): 92-99.
- [19] 刘周莉, 何兴元, 陈 玮. 忍冬——一种新发现的镉超富集植物 [J]. 生态环境学报, 2013, 22(4): 666-670.

On Physiological Responses and Accumulation Characteristics of *Melia azedarach* and *Firmiana Platanifolia* under Stress of Cd^{2+}

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

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

Abstract: Taking *Melia azedarach* and *Firmiana platanifolia* as experimental materials, the growth physiological responses, absorption and accumulation characteristics of Cd of the two species under different Cd concentration (mild 1 mg/kg, moderate 10 mg/kg, severe 50 mg/kg) have been investigated by pot experiment. The results show that the leaves and roots of the two species showed obvious signs of persecution under severe Cd stress, which was spontaneous remission with time. The biomass, total chlorophyll of the two species first increased and then decreased under Cd^{2+} stress, with MDA content increasing, the SOD activity of *Melia azedarach* increasing and the SOD activity of *Firmiana platanifolia* decreasing. Combined, *Firmiana platanifolia* was more tolerant in long term under Cd^{2+} stress. The Cd^{2+} accumulation was in an order of root > the overground parts in *Melia azedarach* and of the overground parts > root in *Firmiana platanifolia*. The Cd^{2+} average enrichment of single plants of *Firmiana platanifolia* was higher than that of *Melia azedarach*. The results show that *Firmiana platanifolia* has greater Cd^{2+} enrichment ability and it is more suitable for phytoextraction of heavy Cd contaminated soil. Taken together, *Firmiana platanifolia* has a greater potential for remediation of Cd contaminated soil than *Melia azedarach*.

Key words: *Melia azedarach*; *Firmiana platanifolia*; cadmium; physiological responses; accumulation characteristics