

DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2020.05.017

复合胁迫下复羽叶栎树对 Cd 和 Pb 的吸收富集研究^①

李萧萧, 冯丽涵, 李 凌

西南大学 园艺园林学院, 重庆 400716

摘要: 通过盆栽(紫色土)试验, 研究复合胁迫下, 2 年生复羽叶栎树实生苗对 Cd 和 Pb 的吸收富集特征. 结果表明: 在复合胁迫下(Cd 胁迫质量比不高于 50 mg/kg, Pb 胁迫质量比不高于 2 000 mg/kg), 植株内的 Cd 和 Pb 质量比随土壤 Cd 和 Pb 质量比的增加而增大; 复羽叶栎树对 Cd 的吸收能力与转运能力均大于 Pb; 地上部对 Cd 和 Pb 的富集系数分别在 0.102~0.548 和 0.061~0.406 之间; 随着土壤 Cd 质量比增大, 复羽叶栎树对 Cd 的富集系数逐渐减小, 对 Pb 的富集系数先增大后减小, 对 Cd 和 Pb 转运系数均先减小后增大; 在土壤 Cd 质量比 50 mg/kg, Pb 质量比 500 mg/kg 时, 整株植物对 Cd 的累积量最大, 为每株 0.461 mg; 在土壤 Cd 质量比 10 mg/kg, Pb 质量比 2 000 mg/kg 时, 整株植物对 Pb 的累积量最大, 为每株 35.495 mg.

关键词: 镉; 铅; 富集; 复羽叶栎树

中图分类号: Q949.755.5; Q945.78

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2020)05-0103-06

由于工农业生产中“三废”的不合理处理及金属矿山的开采, 土壤中重金属离子不断累积, 对环境和人民生命健康造成了很大的威胁^[1]. 与传统的化学修复和物理修复相比, 植物修复技术具有成本低、修复范围广、修复时效长的优点. 植物修复的研究多为超富集植物, 但目前发现的超富集植物多为草本, 体内虽能富集高质量比的重金属, 但生物量小, 生长缓慢, 耐性差, 回收困难, 所累积的重金属总量也非常有限^[2-3]. 木本植物生物量巨大, 生长迅速且根系庞大, 因此具有很强的修复潜力^[4]. 研究发现, 木本植物中的杨树^[5]、桉树^[6]、柳树^[7-8]、樟树^[9]、紫穗槐^[10]、松树^[11]及栎属植物^[12]等对重金属有极强的耐受和吸收能力, 能在体内积累大量的重金属离子, 因此在国内外已被广泛应用于植物修复实践中. 寻求耐性好、富集能力强的乡土植物也成为了目前我国急需解决的问题. 本研究采用盆栽试验对乡土植物复羽叶栎树进行 Cd 和 Pb 复合胁迫, 研究复羽叶栎树对 Cd 和 Pb 的吸收和转运能力, 探索复羽叶栎树在重金属污染修复中的应用潜力.

1 材料与方法

1.1 试验材料

将盆栽紫色土(采自西南大学农场)铺在塑料薄膜上晾干、压碎, 并剔除植物根系及石块等异物. 其基本理化性质见表 1.

表 1 供试土壤基本理化性质

pH 值	有机质质量比 /(g · kg ⁻¹)	全氮质量比 /(mg · kg ⁻¹)	有效磷质量比 /(mg · kg ⁻¹)	速效钾质量比 /(mg · kg ⁻¹)	全 Pb 质量比 /(mg · kg ⁻¹)	全 Cd 质量比 /(mg · kg ⁻¹)
6.54	1.48	736.5	72.8	269.7	18.9	0.16

① 收稿日期: 2018-11-08

作者简介: 李萧萧(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事园林植物对重金属污染的修复研究.

复羽叶栎树种子采自西南大学校内,并于 2017 年 3 月播种,5 月初挑选株高(33.2±2.1) cm 和地径(7.8±1.6) mm 基本一致的实生苗移栽到双层无纺布容器(直径 40 cm,高 25 cm)中,每袋 11 kg 土壤,每盆植 3 株,共 60 盆,180 株. 2018 年 3 月,用 Cd Cl₂ · 2.5H₂O 和(CH₃COO)₂Pb · 3H₂O(分析纯)配制成不同质量比的处理液各 3 L,对照组为蒸馏水 3 L,向土壤分 3 次均匀浇灌. 容器底部用黑色厚塑料袋套住,防止重金属溶液从盆底流出.

1.2 试验设计

根据西南地区土壤 Cd 和 Pb 的污染状况调查中已出现的最大质量比^[13],并考虑到污染有可能增加的可能,研究中对重金属质量比的上限作适当延伸,同时结合《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB15618—2018)中的农用地土壤污染风险筛选值和农用地土壤污染风险管制值进行重金属土壤质量比梯度划分,土壤(干质量)Cd 质量比为:1(A1),10(A2),50(A3) mg/kg; Pb 质量比为:500(B1),1 000(B2),2 000(B3)mg/kg;进行 Cd 和 Pb 二因子正交,对照 CK(不加外源 Cd 和 Pb),每个处理组重复 6 次,详见表 2.

表 2 土壤 Cd 和 Pd 胁迫的 10 种实验处理质量比 mg/kg

处理	Cd	Pb	处理	Cd	Pb
CK	0	0	A2B2	10	1 000
A1B1	1	500	A2B3	10	2 000
A1B2	1	1 000	A3B1	50	500
A1B3	1	2 000	A3B2	50	1 000
A2B1	10	500	A3B3	50	2 000

1.3 测定方法

重金属胁迫处理 40 d 后,采集植株叶片进行叶绿素和 MDA(丙二醛)含量测定^[14]. 经胁迫处理 100 d 后收获,采集植物样品,用自来水反复冲洗干净后再用去离子水反复冲洗并吸干水分. 将植物样品分为根、茎、叶三部分,经 105 ℃杀青 2 h,80 ℃烘干至恒质量,称量并用不锈钢粉碎机粉碎后过 60 目尼龙筛备用.

土壤理化指标采用土壤农化常规分析方法^[15]. 土壤样品用 HNO₃-HF-HClO₄ 三酸消化法消解^[16]. 植物样品用 GB/T5009 规定的 HNO₃-HClO₄ 混合酸消化法消解,Cd 和 Pb 质量比用日立 Z-5000 原子吸收光谱仪测定,供试试剂均为分析纯,试验器皿在使用前均用 10%硝酸溶液浸泡 24 h 以上.

1.4 数据处理

数据采用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 22.0 进行统计分析、作图等.
生物富集系数和转运系数分别为:

$$k_{BCF_R} = C_{\text{地下部分}} / C_{\text{生长介质}} \quad k_{BCF_S} = C_{\text{地上部分}} / C_{\text{生长介质}} \quad k_{TF} = C_{\text{地上部分}} / C_{\text{地下部分}}$$

2 结果与分析

2.1 Cd 和 Pb 复合胁迫对复羽叶栎树生理生长的影响

数据显示,在轻度 Pb 污染(B1)时,复羽叶栎树叶片内的叶绿素质量比和 MDA 摩尔质量比与对照差异不具有统计学意义,A1B1 和 A2B1 生物量显著高于 CK(P<0.05)(表 3),表明复羽叶栎树对 Cd 的耐性较强.

表 3 Cd 和 Pb 复合胁迫条件下复羽叶栎树生理生长指标

处 理	叶绿素质量比/(mg · g ⁻¹)	MDA 摩尔质量比/(μmol · g ⁻¹)	总生物量/g
CK	2.97±0.07ab	21.92±0.65e	41.66±0.6c
A1B1	2.95±0.09ab	23.72±1.32cde	59.72±1.04a
A1B2	2.47±0.1c	25.1±1.45bcd	31.03±0.17d
A1B3	2.26±0.1d	24.67±0.25bcd	21.5±0.85f
A2B1	2.86±0.12b	23.63±1.46cde	47.35±1.11b
A2B2	2.43±0.04c	25.4±0.36abc	31.41±1.59d
A2B3	1.37±0.05f	27.3±1.08a	19.42±1.00g
A3B1	3.09±0.07a	23.42±0.81cde	29.1±1.02e
A3B2	2.55±0.05c	25.92±1.56ab	19.7±0.76g
A3B3	1.53±0.13e	23.25±0.85de	13.71±0.51h

注:数值表示 3 次重复的平均值和标准差,采用 Duncan 多重比较,同一列的小写字母不同表示数值在 5%水平上差异具有统计学意义.

即使在土壤低 Cd(A1)时, 中高质量比 Pb(B2—B3)也会使复羽叶栎树的植株出现矮化失绿的现象, 叶片 MDA 摩尔质量比显著高于 CK, 叶绿素质量比和生物量下降显著($P<0.05$). 表明复羽叶栎树对 Pb 比较敏感.

2.2 复合胁迫下复羽叶栎树对 Cd 和 Pb 的吸收

与 CK 相比, 复羽叶栎树根、茎和叶中的 Cd 质量比均随土壤 Cd 胁迫质量比的增加而显著升高($P<0.05$)(表 4). 通常植物对重金属的吸收具有就近积累效应^[17], 即重金属质量比从高到低顺序为根、茎、叶, 但在复羽叶栎树中其排序为根、叶、茎, 表明 Cd 元素从其茎转移到叶的能力较强.

与 CK 相比, 复羽叶栎树根茎中的 Pb 质量比均随着土壤中 Pb 胁迫质量比的增加而显著升高($P<0.05$), 但叶片中 Pb 增加不显著, 表明 Pb 在复羽叶栎树体内的移动性较差. 复羽叶栎树对 Pb 吸收表现出就近积累的特性, 及其体内 Pb 质量比从高到低依次为根、茎、叶.

复羽叶栎树体内 Cd 和 Pb 质量比(干质量)分别可达到 68.04 mg/kg 和 4 858.1 mg/kg. 据资料, 杂交杨(干质量)中 Cd 质量比最高可达 209 mg/kg^[18]. Hammer 等发现, 在 Cd 和 Zn 轻度污染的土壤进行 5a 的修复试验后, 蒿柳(*Salix viminalis* L.)于同等条件下超过 Cd 超积累植物油菜(*Brassica napus* L.)等草本植物^[19]; Jensen 等发现, 即使在 Cd,Zn,Pb 和 Cu 严重污染的情况下, 蒿柳依旧能有效从土壤中转运、积累重金属, 只是生物量与轻度污染土壤情况相比有所下降^[20]. 因此, 相比草本超富集植物, 木本植物表现出更强的实际可应用性.

表 4 Cd 和 Pb 复合胁迫条件下复羽叶栎树(干质量)不同部位 Cd 质量比							mg/kg
处理	各部位中 Cd			各部位中 Pb			
	叶	茎	根	叶	茎	根	
CK	0.05±0.01i	0.02±0.01h	0.16±0.02g	1.60±0.16g	14.08±1.64g	26.13±0.55j	
A1B1	0.73±0.05g	0.35±0.02g	3.22±0.03f	21.99±0.46a	51.09±0.84f	856.30±1.48h	
A1B2	0.34±0.01h	0.33±0.00g	2.81±0.02f	20.48±0.24b	112.70±0.54e	1 534.20±6.00e	
A1B3	0.26±0.01h	0.26±0.01g	2.59±0.04f	19.03±0.68c	219.00±16.70c	3 546.30±60b	
A2B1	4.00±0.03f	1.45±0.04f	21.84±0.49e	20.74±0.42b	43.91±1.59f	990.80±10.20g	
A2B2	4.21±0.06e	1.80±0.08e	23.76±1.68d	18.66±0.60cd	163.92±1.50d	2 024.10±21.00c	
A2B3	5.49±0.05c	2.16±0.08d	23.94±0.22d	17.91±0.20ef	357.16±0.50b	4 585.10±43.00a	
A3B1	9.20±0.16a	4.25±0.12c	36.94±0.12c	18.14±0.10de	111.33±5.20e	600.46±1.60i	
A3B2	4.50±0.03d	5.43±0.12b	53.43±0.97b	17.35±0.33f	215.15±1.90c	1 062.10±55f	
A3B3	8.22±0.29b	11.55±0.12a	68.04±0.56a	18.71±0.20cd	582.60±3.30a	1 642.80±26d	

注: 数值表示 3 次重复的平均值和标准差, 采用 Duncan 多重比较, 同一列的小写字母不同表示数值在 5%水平上差异具有统计学意义.

2.3 Cd 和 Pb 复合污染对复羽叶栎树 Cd 和 Pb 累积量的影响

由表 5 可知, 随着土壤 Cd 质量比的增加, 复羽叶栎树单株 Cd 累积量相应增大, 处理组与 CK, 各组间差异均具有统计学意义. 在 A3B1 组, 单株 Cd 积累量达到最大, 为 0.468 mg/株. 随着土壤 Pb 质量比的增大, 植株对 Cd 的总累积量呈下降趋势. Pb 会抑制整株植物对重金属 Cd 的累积量.

表 5 Cd 和 Pb 复合条件下复羽叶栎树体内总累积量		
处 理	植株总累积量/($\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$)	
	Cd 累积量	Pb 累积量
CK	2.92±0.11h	580.88±22.47i
A1B1	84.77±1.39f	17 896.2±22.83d
A1B2	38.45±0.31g	18 891.74±70.63c
A1B3	22.37±1.00gh	18 899.36±333.36c
A2B1	403.15±17.79c	15 711.75±176.23e
A2B2	323.24±14.40d	26 487.24±263.72b
A2B3	186.75±9.71e	35 494.95±283.28a
A3B1	468.54±14.78a	6 503.82±36.70h
A3B2	337.27±10.37d	7 426.2±282.02g
A3B3	426.32±24.40b	11 567.21±142.72f

注: 数值表示 3 次重复的平均值和标准差, 采用 Duncan 多重比较, 同一列的小写字母不同表示数值在 5%水平上差异具有统计学意义.

随着土壤 Pb 质量比的增加,复羽叶栎树单株 Pb 累积量相应增大,处理组与 CK,组间差异均具有统计学意义.在 A2B3 组,单株 Pb 累积量(干质量)达到最大值,为 35.495 mg/株,随着土壤 Cd 质量比的增大,植株对 Pb 的总累积量呈先升高后下降趋势,低质量比 Cd 促进植株 Pb 累积,而高质量比的 Cd 会抑制 Pb 累积.本试验显示土壤中 Pb 会使复羽叶栎树生长受阻,从而抑制植株对 Cd 的富集.低质量比 Cd 会增加复羽叶栎树生物量从而对植株 Pb 总累积量有促进作用.

2.4 复合条件下 Cd 和 Pb 质量比对复羽叶栎树各器官重金属质量比的影响

为揭示土壤 Cd 和 Pb 复合污染对复羽叶栎树各器官吸收 Cd 和 Pb 的影响规律,以土壤中 Cd 和 Pb 质量比为自变量 X_1 和 X_2 ,植物不同器官中相应元素质量比为因变量 Y (根为 Y_R ,茎为 Y_S ,叶为 Y_L ,平均值为 Y_A),进行二元线性回归分析(表 6).复羽叶栎树不同器官中 Cd 和 Pb 质量比与土壤中 Cd 与 Pb 质量比的相关性大部分具有统计学意义($P<0.05$).回归分析表明,在 Cd 和 Pb 复合污染条件下,复羽叶栎树对 Cd 的吸收主要受土壤 Cd 质量比的影响,对 Pb 的吸收主要受土壤 Pb 质量比的影响.但叶片内 Pb 质量比受土壤 Pb 质量比影响较小.说明 Pb 在复羽叶栎树体内移动性差.

表 6 复羽叶栎树各器官重金属质量比与土壤重金属质量比的二元线性回归分析

元素	二元线性回归方程	R^2	元素	二元线性回归方程	R^2
Cd	$Y_R = 0.330 + 0.925X_1^* + 0.06X_2^*$	0.884	Pb	$Y_R = 269.41 - 21.988X_1^* + 1.73X_2^*$	0.834
	$Y_S = -1.151 + 0.131X_1^* + 0.01X_2^*$	0.812		$Y_S = -65.755 + 2.99X_1^* + 0.188X_2^*$	0.856
	$Y_L = -0.899 + 0.123X_1^* + 0.01X_2^*$	0.708		$Y_L = 13.933 + 0.019X_1 + 0.031X_2$	0.157
	$Y_A = -0.767 + 0.383X_1^* + 0.03X_2^*$	0.835		$Y_A = 78.827 - 6.248X_1^* + 0.628X_2^*$	0.926

注:方程中的系数均为标准化偏回归系数,*表示相关性具有统计学意义($P<0.05$).

2.5 复羽叶栎树对 Cd 和 Pb 的富集与转运

在 Cd 和 Pb 复合胁迫下,复羽叶栎树 Cd 富集系数基本大于 Pb(图 1),表明复羽叶栎树对 Cd 的吸收累积能力大于 Pb, Cd 更容易被植物吸收. A1B1 处理复羽叶栎树地上和地下部分对 Cd 的富集系数均最大,分别为 3.215 和 0.544. A2B3 处理,根系对 Pb 的富集最大,为 2.293. 王广林^[21]提出木本植物地上部分富集系数大于 0.4,即可认为该植物的修复能力强,富集系数在 0.1~0.4 时,即可认为该植物对土壤重金属污染有一定的修复能力.据此认为复羽叶栎树在轻度 Cd 和 Pb 污染下栎树富集能力较强.

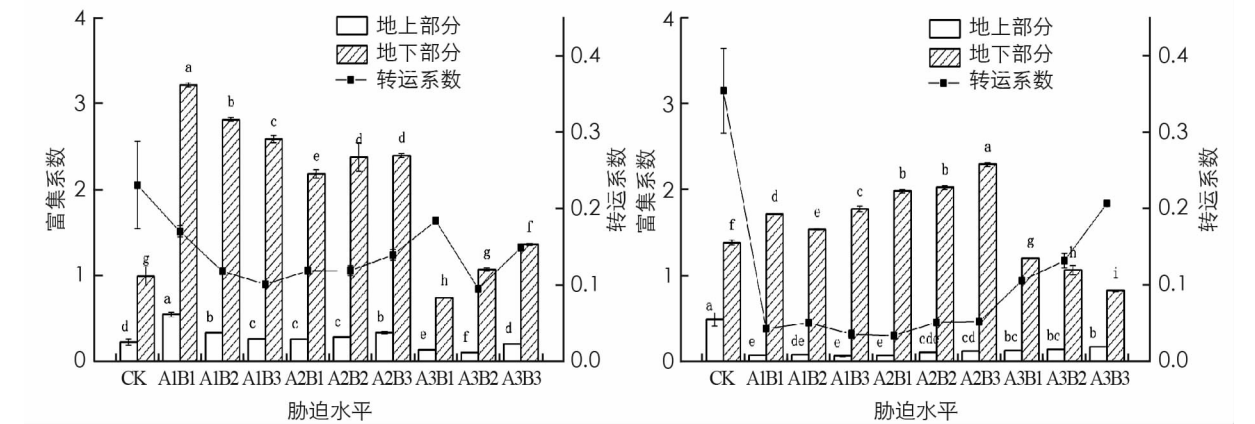


图 1 不同 Cd 和 Pb 复合胁迫条件下,复羽叶栎树不同部位对 Cd 和 Pb 的富集系数和转运系数
复羽叶栎树对 Cd 和 Pb 的转运系数均小于 1(Cd 为 0.095~0.230, Pb 为 0.036~0.353).说明 Cd 和 Pb 在复羽叶栎树地上部分的转运能力低,根系固定能力较强.

3 结 论

- 1) 复羽叶栎树对 Cd 和 Pb 具有较强的耐性,对 Cd 耐性强于 Pb.
- 2) 复羽叶栎树在 A3B1 组,单株 Cd 累积量最大,为 0.468 mg/株. A2B3 组, Pb 累积量最大,为 35.495 mg/株. Cd 和 Pb 更容易积累在根部,表现出较强的固定作用.土壤中 Pb 会抑制整株植物对 Cd 的累积;土壤低质量比 Cd 促进植株 Pb 累积,高质量比 Cd 抑制整株植物 Pb 累积.

3) 复羽叶栎树对Cd的吸收能力和迁移能力均大于Pb. 复羽叶栎树不属于超富集植物,但生物富集系数较高,对土壤Cd和Pb离子有较高的累积能力,且相较于Pb,对Cd的吸收累积效果更强.

复羽叶栎树还具有耐贫瘠,根系发达,生物量大,对Cd和Pb耐性强等优势. 对重金属污染土壤具有较强的修复能力,可以为重金属污染土壤的植物修复提供了新的资源选择,也可考虑将复羽叶栎树与其他具有超积累的植物套作,达到协同治理土壤的目的.

参考文献:

- [1] 李思亮,杨 斌,陈 燕,等. 浙江省铅锌矿区土壤重金属污染及重金属超富集植物筛选 [J]. 环境污染与防治, 2016, 38(5): 48-54.
- [2] 殷永超,吉普辉,宋雪英,等. 龙葵(*Solanum nigrum* L.)野外场地规模Cd污染土壤修复试验 [J]. 生态学杂志, 2014, 33(11): 3060-3067.
- [3] 杨 勇,王 巍,江荣凤,等. 超累积植物与高生物量植物提取镉效率的比较 [J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2732-2737.
- [4] KELLER C, HAMMER D, KAYSER A, et al. Root Development and Heavy Metal Phytoextraction Efficiency: Comparison of Different Plant Species in the Field [J]. Plant and Soil, 2003, 249(1): 67-81.
- [5] 张春燕,王瑞刚,范稚莲,等. 杨树和柳树富集Cd、Zn、Pb的品种差异性 [J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3): 530-538.
- [6] ROCKWOOD D, CARTER D, LANGHOLTZ M, et al. Eucalyptus and Populus Short Rotation Woody Crops for Phosphate Mined Lands in Florida USA [J]. Biomass and Bioenergy, 2006, 30(8-9): 728-734.
- [7] 杨卫东,陈益泰. 不同杞柳品种对镉(Cd)吸收与忍耐的差异 [J]. 林业科学研究, 2008, 21(6): 857-861.
- [8] 徐爱春,陈益泰,王树凤,等. 柳树对Cd吸收、积累和耐性的初步研究 [J]. 环境科学研究, 2006, 19(5): 96-100.
- [9] 陈良华,徐 睿,杨万勤,等. 镉污染条件下香樟和油樟对镉的吸收能力和耐性差异 [J]. 生态环境学报, 2015, 24(2): 316-322.
- [10] 施 翔,陈益泰,王树凤,等. 废弃尾矿库15种植物对重金属Pb、Zn的积累和养分吸收 [J]. 环境科学, 2012, 33(6): 2021-2027.
- [11] 智颖颀,王再岚,王中生,等. 公路绿化植物油松(*Pinus tabulaeformis*)和小叶杨(*Populus simonii*)对重金属元素的吸收与积累 [J]. 生态学报, 2007, 27(5): 1863-1872.
- [12] 王 君. 麻栎(*Quercus acutissima* Carr.)幼苗对Cd²⁺、Pb²⁺复合污染的生理耐性及累积特性研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [13] 贾中民,冯汉茹,鲍丽然,等. 渝西北土壤重金属分布特征及其风险评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(7): 106-114.
- [14] 高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 74-230.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [16] TESSIER A, CAMPBELL P G C, BISSON M. Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals [J]. Analytical Chemistry, 1979, 51(7): 844-851.
- [17] 鲁 艳,谌 月,李 凌. 香樟、君迁子实生苗对土壤Cd²⁺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.
- [18] ROBINSON B, MILLS T, PETIT D, et al. Natural and Induced Cadmium-accumulation in Poplar and Willow: Implications for Phytoremediation [J]. Plant and Soil, 2000, 227(1-2): 301-306.
- [19] HAMMER D, KAYSER A, KELLER C. Phytoextraction of Cd and Zn with *Salix Viminalis* in Field Trials [J]. Soil Use and Management, 2003, 19(3): 187-192.
- [20] JENSEN J K, HOLM P E, NEJRUP J, et al. The Potential of Willow for Remediation of Heavy Metal Polluted Calcareous Urban Soils [J]. Environmental Pollution, 2009, 157(3): 931-937.
- [21] 王广林,张金池,庄家尧,等. 31种园林植物对重金属的富集研究 [J]. 皖西学院学报, 2011, 27(5): 83-87.

On Absorption and Accumulation Characteristics of *Koelreuteria Bipinnata* Franch. under Combined Pollution of Cd^{2+} and Pb^{2+}

LI Xiao-xiao, FENG Li-han, LI Ling

School of Horticulture and Landscape Architecture, Southwest University, Chongqing 400716, China

Abstract: In this paper, the effects have been investigated of Cd, Pb combined pollution of purple soils from the Chongqing regions on the uptake and translocation of Cd and Pb by *Koelreuteria bipinnata* Franch. The results of pot experiment show that the concentration of Cd or Pb was promoted when the concentration of Cd in soil was less than $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and the concentration of Pb in soil was less than $2\ 000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in Cd, Pb combined pollution. The enrichment and translocation ability of Cd was greater than that of Pb. The bio-concentration factors of Cd^{2+} and Pb^{2+} of in stem were $0.102\text{--}0.548$ and $0.061\text{--}0.406$. As the concentration of Cd in soil increased in Cd, Pb combined pollution, the enrichment ability of Cd in *Koelreuteria bipinnata* Franch. was reduced continuously. The enrichment ability of Pb in *Koelreuteria bipinnata* Franch. was firstly improved and then reduced. And translocation ability of Cd and Pb in *Koelreuteria bipinnata* Franch. was firstly reduced and then improved. *Koelreuteria bipinnata* Franch. had the largest Cd concentration per plant in the group were $0.461 \text{ mg} \cdot \text{plant}^{-1}$, when the concentration of Cd in soil was $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and Pb in soil was $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in Cd, Pb combined pollution. *Koelreuteria bipinnata* Franch. had the largest Pb concentration per plant in the group were $35.495 \text{ mg} \cdot \text{plant}^{-1}$, when the concentration of Cd in soil was $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and Pb in soil was $2\ 000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in Cd, Pb combined pollution.

Key words: Cd; Pb; enrichment; *Koelreuteria bipinnata* Franch.

责任编辑 潘春燕