

文章编号: 1001-1498(2008)06-0857-05

# 不同杞柳品种对镉(Cd)吸收与忍耐的差异

杨卫东, 陈益泰

(中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 富阳 311400)

**摘要:** 柳树是适宜植物修复的木本植物。通过水培筛选方法, 比较 3 种杞柳品种对镉(Cd)的积累与忍耐差异。Cd 处理浓度为 0, 10, 50  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CdCl}_2$ , 处理 6 周。结果显示: 3 个品种的枝、根生物量以及对 Cd 忍耐和积累水平存在差异。Cd 不同程度降低了 3 种杞柳茎高, 减少侧根数以及枝、根生物量; 介质中 Cd 剂量的提高降低了杞柳从根到茎运输 Cd 的能力, Cd 在根中积累显著高于枝部, 枝根 Cd 浓度比值低于 1, 并且随介质中 Cd 剂量的提高, 其比值降低, 但枝根 Cd 总量比值高于 1, 并随介质浓度升高而降低; 微山湖品种的忍耐系数  $T_{\text{根}}$  为 0.61~0.82; 大红头品种的  $T_{\text{根}}$  为 0.88, 一枝笔品种的  $T_{\text{根}}$  为 0.92~0.93。3 种杞柳品种对 Cd 有一定的吸收和忍耐能力, 初步说明 3 种杞柳品种能够修复低中等污染的土壤。

**关键词:** 杞柳; 品种; 镉; 积累; 忍耐

中图分类号: S792.12

文献标识码: A

## Differences in Uptake and Tolerance to Cadmium in Varieties of *Salix integra*

YANG Wei-dong, CHEN Yi-tai

(Research Institute of Subtropical Forestry, CAF, Fuyang 311400, Zhejiang, China)

**Abstract:** Willows (*Salix* spp.) have been proposed for use in phytoremediation technology. Three varieties of *Salix integra* in hydroponic experiments for their metal resistance and accumulation were investigated. Plants were exposed for 6 weeks with 0  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 10  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 50  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CdCl}_2$ , measurements of growth parameters have been combined with Cd concentration in shoots and roots. Plant biomass, metal tolerance and Cd accumulation pattern in shoots and roots varied among varieties. Shoot growth and number of lateral roots were significantly reduced under cadmium treatment, 10  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  and 50  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CdCl}_2$  treatments reduced the dry biomass of shoots and roots, Elevated Cd concentration in medium decreased Cd transport from roots to shoots in all varieties. The leaf:root ratios for Cd in all varieties were  $<1$ , but the total amount of Cd in shoot:root were highly significantly  $>1$ , the ratios of total amount of Cd decreased with Cd level in the medium. Tolerance Index ( $T_{\text{root}}$ ) of *S. integra* 'Weishanhu' variety was 0.61—0.82, *S. integra* 'Dahongtou' variety had a  $T_{\text{root}}$  of 0.88,  $T_{\text{root}}$  of *S. integra* 'Yizhibi' was about 0.92—0.93. These results showed that *Salix integra* has the potential to be used for phytoremediation of Cd in moderately contaminated soil.

**Key words:** *Salix integra*; variety; cadmium; accumulation; tolerance

重金属导致的土壤和水体污染, 引起了社会广泛关注。植物修复是一种依赖植物的清洁方法, 其技术简单、成本低、对环境友好, 受到人们欢迎。镉

(Cd) 是非必需元素, 也是最危险的重金属之一, 它在生态系统中运动性强, 有进入食物链的风险, 频繁引发 Cd 污染, 这种污染主要是磷肥施用和污水排放

收稿日期: 2007-11-23

基金项目: 浙江省科技厅重大项目(2006C12065)资助

作者简介: 杨卫东(1976—), 男, 山东菏泽人, 硕士, 助理研究员, 主要从事抗逆育种及植物修复研究。E-mail: ywdheze@sohu.com

等引起<sup>[1]</sup>。满足修复目标的植物具有 2 个特点:枝(地上部分)能够高富集金属,生物量高。许多超积累植物满足第一点,而不能满足第二点,因此许多农作物和一些速生树木富集重金属浓度低,但是生物量产出高,具有运用于植物修复的潜力<sup>[2]</sup>。柳树(*Salix* spp.)为重金属高积累的木本植物,而不是重金属超积累植物,草本植物有较浅的根系,而柳树根系深,可以应用于较深的土壤系统<sup>[3]</sup>。由于植物不能在重污染的土壤中生存<sup>[4]</sup>,植物修复一般适用于低、中浓度的金属污染。

高忍耐、吸收重金属能力强的柳树可以通过田间、盆栽试验等方法选择,但是操作费时、费力。T. Punshon 等<sup>[5]</sup>首次研究和应用水培方法选择适合植物修复的柳树,水培方法能够快速、规模化筛选不同树种、杂交种和无性系对重金属毒性反应的差异。现在水培筛选方法已成为选择耐重金属、高吸收重金属柳树的常规方法。

柳树是我国重要的树种资源,种类丰富,分布广泛,用于造林能护堤防浪、治水保土,防风固沙、绿化沙荒,具有很高的经济价值,我国已在柳树造林、经营和育种方面取得显著进展。杞柳(*Salix integra* Thunb.)为丛生性灌木,耐水湿,耐干旱,耐盐碱,适生于沙质水湿地;枝条柔软、韧性强,是编织的理想材料。杞柳是我国栽培面积大,分布地区广,改良程度高,经济效益大的重要灌木柳<sup>[6]</sup>。杞柳变异很大,分化出许多栽培品种和变种,经过多年栽培,已经培养出许多优良新品种。杞柳作为重要灌木柳,对 Cd 吸收和忍耐情况仍不清楚。本研究以 3 种杞柳主栽品种为材料,通过水培筛选方法,测定、比较杞柳对 Cd 吸收和忍耐的特征和差异,为将来杞柳应用于植物修复 Cd 污染提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料及培养

3 个杞柳品种为微山湖(*S. integra* 'Weishanhu'),一枝笔(*S. integra* 'Yizhibi'),大红头(*S. integra* 'Dahongtou'),引自山东省,为当地主栽品种,在浙江富阳繁殖。选择粗细均匀的 1 年生枝条,插条长度为 8 cm,扦插于 10 L 塑料盆内的泡沫板上,采用 C. Watson 等<sup>[7]</sup>改进的营养液配方,大量元素  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{KNO}_3$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 、Fe-EDTA 分别为 1、1.25、0.5、0.5、0.025  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,微量元素  $\text{H}_3\text{BO}_4$ 、 $\text{ZnCl}_2$ 、 $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、

$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  分别为 1.43、0.055、0.03、0.905、0.015  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,pH 值 5.5~6.0。连续不断充气,自然光照,温度为 15~27℃,培养 60 d 后,以 10  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CdCl}_2$  为基本浓度,50  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CdCl}_2$  为提高浓度添加处理,每 3 d 更换一次营养液,维持营养液浓度,处理时间为 42 d。然后收获植株,用自来水反复冲洗根 3 次,再用 20  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  EDTA 浸泡 10 min,用去离子水冲洗 3 次,以备分析用。

### 1.2 生长参数测定

测定杞柳茎高、一级侧根数、枝生物量(干质量)、根生物量(干质量)和冠根比。

### 1.3 Cd 测定

杞柳收获后,分成枝和根,在 80℃ 下干燥 48 h,粉碎成粉末,65%  $\text{HNO}_3$  消解,用原子吸收分光光度计测定 Cd 含量。

### 1.4 数据分析

枝或根吸收 Cd 总量 = 枝或根单位吸收量 ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ) × 枝或根干质量 (g)

忍耐系数 (TI) 以处理与对照枝或根干质量比值表示,即:

$$T_{\text{枝}} = \text{处理枝干质量} / \text{对照枝干质量}$$

$$T_{\text{根}} = \text{处理根干质量} / \text{对照根干质量}$$

数据用 Excel 和 DPS 8.01 软件统计分析, Duncan's 法多重比较 ( $P < 0.05$ ),对于生长参数 ( $n = 12$ ) 结果表示为 mean ± SD;而对于枝和根中 Cd 含量,结果表示为 mean ± SE。

## 2 结果与分析

### 2.1 Cd 对杞柳茎高、侧根数、生物量及冠根比的影响

试验表明,Cd 影响微山湖、大红头、一支笔 3 个杞柳品种茎高生长 ( $P < 0.05$ ) (表 1),并且随着培养介质中  $\text{CdCl}_2$  浓度的升高,茎高不同程度的降低。当  $\text{CdCl}_2$  为 50  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,微山湖茎高显著降低 ( $P < 0.05$ ),当  $\text{CdCl}_2$  浓度高于 10  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,大红头茎高显著降低,但  $\text{CdCl}_2$  对一支笔茎高的影响不显著 ( $P < 0.05$ )。Cd 也影响 3 个杞柳品种的侧根数,当  $\text{CdCl}_2$  为 50  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,微山湖和大红头侧根数显著减少,而一支笔各处理间侧根数差异并不显著 ( $P < 0.05$ ) (表 1)。同对照相比,Cd 影响杞柳枝生物量,当  $\text{CdCl}_2$  为 10  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,微山湖、大红头、一支笔的枝生物量降低,但当  $\text{CdCl}_2$  为 10  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和 50  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,3 个品种枝生物

量差异并不显著 ( $P < 0.05$ )。当  $CdCl_2$  为  $50 \mu mol \cdot L^{-1}$  时,微山湖的根生物量显著降低,而大红头、一支笔的根生物量并没有明显改变 ( $P < 0.05$ )。受 Cd 影响,当  $CdCl_2$  分别为  $10、50 \mu mol \cdot L^{-1}$  时,一支笔、大红头冠根比发生改变,微山湖的冠根比并没有显著变化 ( $P < 0.05$ ) (表 1)。

表 1 Cd对杞柳生长参数的影响

$CdCl_2$ 浓度 / ( $\mu mol \cdot L^{-1}$ )	微山湖	大红头	一支笔
茎高/cm			
0	78.7 <sup>a</sup> ±11.9	80.9 <sup>a</sup> ±10.2	77.7 <sup>a</sup> ±11.5
10	70.0 <sup>ab</sup> ±11.2	69.2 <sup>b</sup> ±8.0	74.5 <sup>a</sup> ±12.0
50	66.9 <sup>b</sup> ±12.8	67.5 <sup>b</sup> ±6.4	67.1 <sup>a</sup> ±6.6
侧根数/根			
0	25 <sup>a</sup> ±4	27 <sup>a</sup> ±5	28 <sup>a</sup> ±4
10	23 <sup>a</sup> ±5	26 <sup>a</sup> ±7	26 <sup>a</sup> ±4
50	19 <sup>b</sup> ±5	19 <sup>b</sup> ±4	25 <sup>a</sup> ±5
枝生物量/g			
0	3.53 <sup>a</sup> ±0.62	2.98 <sup>a</sup> ±0.89	3.48 <sup>a</sup> ±0.92
10	2.45 <sup>b</sup> ±0.83	2.13 <sup>b</sup> ±0.71	2.53 <sup>b</sup> ±1.05
50	2.19 <sup>b</sup> ±0.96	2.16 <sup>b</sup> ±0.63	2.52 <sup>b</sup> ±0.54
根生物量/g			
0	0.59 <sup>a</sup> ±0.17	0.39 <sup>a</sup> ±0.10	0.49 <sup>a</sup> ±0.18
10	0.48 <sup>ab</sup> ±0.18	0.34 <sup>a</sup> ±0.16	0.42 <sup>a</sup> ±0.12
50	0.36 <sup>b</sup> ±0.16	0.33 <sup>a</sup> ±0.09	0.42 <sup>a</sup> ±0.05
冠根比			
0	6.4 <sup>a</sup> ±1.3	7.7 <sup>a</sup> ±1.5	7.5 <sup>a</sup> ±1.3
10	5.4 <sup>a</sup> ±1.4	7.0 <sup>ab</sup> ±1.8	5.4 <sup>b</sup> ±1.2
50	6.4 <sup>a</sup> ±0.8	6.0 <sup>b</sup> ±1.3	5.4 <sup>b</sup> ±0.6

注:依照 Duncan's法多重比较 ( $P < 0.05$ ),同一列中字母相同表示差异不显著。下表同。

### 2.2 Cd在杞柳枝、根中的积累

表 2显示 Cd在 3个杞柳品种中的积累。随着培养介质 Cd剂量的增加,枝中 Cd含量也相应增加,而且当  $CdCl_2$  分别为  $10、50 \mu mol \cdot L^{-1}$  时,3个品种之间的 Cd积累量有一定差异:当  $CdCl_2$  为  $10 \mu mol \cdot L^{-1}$  时,枝中 Cd积累量的顺序为 一支笔 > 微山湖 > 大红头;当  $CdCl_2$  为  $50 \mu mol \cdot L^{-1}$  时,枝中 Cd积累量的顺序为 大红头 > 一支笔 > 微山湖 (表 2)。Cd在根中积累量高于枝中,而且随着介质中 Cd浓度的增加,Cd在根中含量也相应增加,同样 3个品种之间 Cd在根中积累也有差异,积累量顺序为 微山湖 > 一支笔 > 大红头。在 3个品种各处理中枝根 Cd浓度比值均  $< 1$  ( $P < 0.05$ ),枝根 Cd浓度比值随介质中 Cd浓度的增加而降低;但枝根 Cd总量比值均显著大于 1,比值为  $1.87 \sim 5.56$ ,表明 3个杞柳品种对 Cd吸收总量为地上部分 > 地下部分,但随着处理剂量增加,此比值有降低趋势。

表 2 Cd在杞柳枝、根中的浓度、浓度比和总量比

$CdCl_2$ 浓度 / ( $\mu mol \cdot L^{-1}$ )	微山湖	大红头	一支笔
枝中浓度 / ( $\mu g \cdot g^{-1}$ )			
0	16.38 <sup>c</sup> ±16.11	16.21 <sup>c</sup> ±3.15	15.81 <sup>c</sup> ±9.30
10	200.66 <sup>b</sup> ±10.17	189.80 <sup>b</sup> ±40.62	223.37 <sup>b</sup> ±34.40
50	303.14 <sup>a</sup> ±17.68	331.20 <sup>a</sup> ±21.36	322.29 <sup>a</sup> ±36.96
根中浓度 / ( $\mu g \cdot g^{-1}$ )			
0	14.71 <sup>c</sup> ±4.30	12.96 <sup>c</sup> ±2.97	5.37 <sup>c</sup> ±1.99
10	419.73 <sup>b</sup> ±105.52	269.57 <sup>b</sup> ±108.26	374.90 <sup>b</sup> ±45.75
50	927.59 <sup>a</sup> ±155.13	852.76 <sup>a</sup> ±99.69	917.20 <sup>a</sup> ±155.55
枝根浓度比			
0	0.97 <sup>a</sup> ±0.66	1.31 <sup>a</sup> ±0.44	3.56 <sup>a</sup> ±2.83
10	0.49 <sup>b</sup> ±0.12	0.74 <sup>b</sup> ±0.34	0.60 <sup>b</sup> ±0.13
50	0.33 <sup>b</sup> ±0.05	0.41 <sup>b</sup> ±0.07	0.33 <sup>b</sup> ±0.07
枝根总量比			
0	3.84 <sup>a</sup> ±1.99	9.84 <sup>a</sup> ±2.86	33.4 <sup>a</sup> ±18.5
10	3.11 <sup>ab</sup> ±1.28	5.56 <sup>b</sup> ±2.55	3.03 <sup>b</sup> ±0.56
50	2.17 <sup>b</sup> ±0.48	2.24 <sup>c</sup> ±0.45	1.87 <sup>b</sup> ±0.39

### 2.3 杞柳对 Cd忍耐系数

以相对枝或根干质量表示的忍耐系数反映杞柳品种对 Cd忍耐情况。从图 1、2看出:在 Cd胁迫下,3个品种(无论以枝还是根表示)的忍耐系数  $T_{枝}$  或  $T_{根}$  不同程度降低,表明 Cd抑制枝和根的生长,3个品种对 Cd忍耐也不相同,在  $10、50 \mu mol \cdot L^{-1}$   $CdCl_2$  处理之间忍耐系数差异不显著 ( $P < 0.05$ )。微山湖的忍耐系数  $T_{枝}$  为 0.69 ( $10 \mu mol \cdot L^{-1}$   $CdCl_2$ )和 0.62 ( $50 \mu mol \cdot L^{-1}$   $CdCl_2$ ),大红头的忍耐系数  $T_{枝}$  为 0.71 ( $10 \mu mol \cdot L^{-1}$   $CdCl_2$ )和 0.73 ( $50 \mu mol \cdot L^{-1}$   $CdCl_2$ ),而一支笔在  $10、50 \mu mol \cdot L^{-1}$   $CdCl_2$  时  $T_{枝}$  分别为 0.72、0.75 (图 1)。在  $10、50 \mu mol \cdot L^{-1}$   $CdCl_2$  时,微山湖的忍耐系数  $T_{根}$  分别为 0.81和 0.61,大红头的忍耐系数  $T_{根}$  分别为 0.88和 0.89,而一支笔的忍耐系数  $T_{根}$  较高 (图 2)。

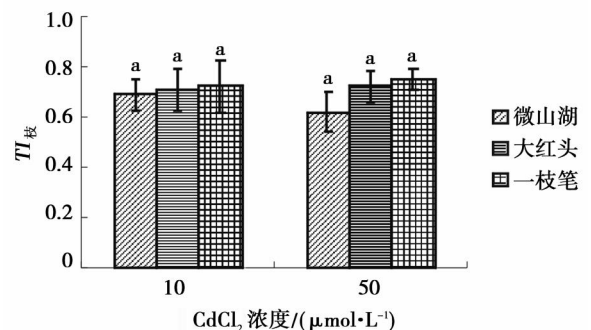


图 1 杞柳枝对 Cd的忍耐系数 ( $T_{枝}$ )

说明:依照 Duncan's法多重比较 ( $P < 0.05$ ),同一品种字母相同表示差异不显著。下图同。

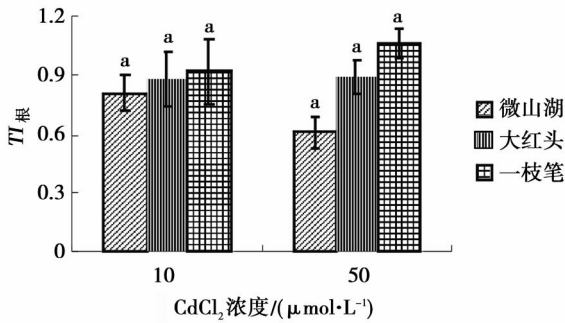


图 2 杞柳根对 Cd 的忍耐系数 ( $T_{根}$ )

### 3 小结与讨论

柳树具有适合于环境修复的特点,如根系深,萌发能力强,易繁殖,蒸腾速率高,积累较高重金属等,柳树是最适宜植物修复的木本植物<sup>[2-3]</sup>。在欧美国家,柳树广泛应用于环境修复,最后生物量转化为生物能。柳树通过短轮伐期集约化栽培,周期性收获地上生物量达到修复目的。柳树可对 Cd 和 Zn 高吸收<sup>[2]</sup>。盆栽试验表明,柳树能够清除土壤中 83% 的 Cd 和 71% 的 Zn<sup>[3]</sup>。蒿柳 (*S. viminalis* L.) 等柳树已经应用于废水处理,清除有机化合物和重金属污染<sup>[8-9]</sup>。柳树富集重金属能力是不同的,不同无性系之间存在差异<sup>[10]</sup>。

杞柳对 Cd 吸收和忍耐的试验表明, Cd 影响杞柳生长,与对照相比,杞柳茎高分别降低了 9% ( $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CdCl}_2$ )、15% ( $50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CdCl}_2$ ),枝生物量分别降低了 28% ( $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CdCl}_2$ ) 和 31% ( $50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CdCl}_2$ ),根生物量分别降低 16% ( $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 和 24% ( $50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) (均为 3 个杞柳品种降低百分比的平均值)。生长指标测定结果显示, 3 个杞柳品种在  $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CdCl}_2$  时,枝和根并没发生明显异常情况,形态表现出对 Cd 高忍耐,而在  $50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  处理时, 3 种杞柳品种枝顶端、根部显示 Cd 对植物的毒性,引起严重黄化,部分失绿,根粗而短、发黑,二级侧根短而少,说明  $50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CdCl}_2$  对 3 种杞柳品种显现出明显毒性。一种理想的修复植物,植株外观不应该发生显著变化,一般的植物修复用于低污染土壤,高浓度重金属对植物产生伤害。柳树忍耐 Cd 剂量并不高,在  $50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CdCl}_2$  时, 3 个杞柳品种枝顶端都明显黄化,而且根也出现不同程度伤害,说明杞柳不适于高剂量 Cd 污染环境的修复;而当  $\text{CaCl}_2$  为  $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 3 个品种并没有受到明显伤害,表现出较强

抗性,以枝、根生物量计算的忍耐系数普遍较高。

杞柳对 Cd 积累与一些已报道柳树相比, 3 个杞柳品种中,在  $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CdCl}_2$  时,枝中 Cd 积累的浓度为  $189.80 \sim 223.37 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,而在  $50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CdCl}_2$  时,枝中 Cd 浓度为  $303.14 \sim 331.20 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,明显高于 Šottníková 等<sup>[11]</sup>报道的蒿柳枝  $2.02 \sim 62.11 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,爆竹柳 (*S. fragilis* L.) 等 17 种柳树或无性系枝中  $11.9 \sim 315.0 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ <sup>[12]</sup>,蒿柳枝中  $19 \sim 30 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  ( $7 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CdCl}_2$ )<sup>[11]</sup>,褪色柳 (*S. discolor* Muhl.) 等  $60 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ <sup>[13]</sup>。在 3 种杞柳根中,  $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CdCl}_2$  时, Cd 积累量为  $269.57 \sim 419.73 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,而  $50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CdCl}_2$  时,根中 Cd 浓度为  $852.76 \sim 927.59 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,高于所报道的褪色柳等根中  $75 \sim 550 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ <sup>[13]</sup>,低于 Cosío 等<sup>[14]</sup>报道的蒿柳  $706 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  ( $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CdCl}_2$ ) 和  $4048 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  ( $50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CdCl}_2$ )。虽然 3 种杞柳品种根部 Cd 吸收量显著高于枝部,枝根 Cd 浓度比值仍小于 1 (超积累植物此比值一般大于 1),但由于冠根比较大,地上部分生长量明显大于地下部分生长量,枝根 Cd 吸收总量比值显著大于 1,这说明杞柳可以用于植物修复 Cd 污染。

水培筛选方法已成为评价柳树对重金属吸收和忍耐的有效方法。用水培筛选方法进行 20 种杨树 (*Populus* spp.) 和柳树树种或无性系选择取得了良好效果<sup>[12]</sup>。使用温室水培筛选系统,更加快了柳树筛选以及重金属吸收检测周期<sup>[13]</sup>。Watson 等<sup>[7]</sup>研究的营养液膜技术 (nutrient film technique, NFT) 加快了柳树对重金属抗性筛选,此系统提供了一种有效地、快速区别不同柳树对重金属的忍耐和积累差异;但水培筛选也有一些缺点,如不能反映土壤中真实情况、土壤根际环境、植物与微生物互作以及对重金属活化,在水培中植物对 Cd 积累量高于土培等。Watson 等<sup>[15]</sup>发现短期温室水培筛选系统和田间试验具有显著的相关性,用水培筛选系统仅用 6 周时间,水培技术是最适宜应用于柳树大量变异耐重金属筛选。我国柳树种质资源丰富,分布广泛,用水培筛选方法筛选耐重金属、高吸收重金属柳树,根据各地环境特点和实际污染情况,因地制宜开展柳树植物修复具有广阔前景。

一般来说,对柳树耐重金属筛选要结合土壤重金属含量进行。本研究应用水培筛选方法对我国 3 个杞柳主栽品种进行了 Cd 忍耐与积累的初步评价,杞柳对  $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{CdCl}_2$  具有较高忍耐和富集能

力(忍耐系数高,枝根浓度比值大),作为广泛使用的栽培品种,3个品种对 Cd的忍耐和积累并没有显著差异,具有应用于植物修复的潜力;但杞柳对 Cd忍耐的剂量有待于进一步研究。另外,本研究只是评价杞柳品种对 Cd积累和忍耐的苗期表现,木本植物生长周期长,因此它们的积累和忍耐应结合长期试验进行评价。

### 参考文献:

- [1] Djingova R, Wagner G, Kuleff I. Screening of heavy metal pollution in Bulgaria using *Populus nigra* 'Italica' [J]. *The Science of the Total Environment*, 1999, 234: 175 - 184
- [2] Pulford ID, Watson C. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees—a review [J]. *Environment International*, 2003, 29: 529 - 540
- [3] Vysloužilov ĀM, Tlustoš P, Sz Ākov ĀJ. Cadmium and zinc phytoextraction potential of seven clones of *Salix* spp. planted on heavy metal contaminated soils [J]. *Plant Soil Environ*, 2003, 49 (12): 542 - 547
- [4] Kuzovkina Y A, Quigley M F. Willows beyond wetlands: uses of *Salix* L. species for environmental projects [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2005, 162: 183 - 204
- [5] Punshon T, Lepp N W, Dickinson N M. Resistance to copper toxicity in some British willows [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1995, 52: 259 - 266
- [6] 涂忠虞. 柳树育种与栽培 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1982
- [7] Watson C, Pulford ID, Riddell B lack D. Development of a hydroponic screening technique to assess heavy metal resistance in willow (*Salix*) [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2003, 5 (4): 333 - 349
- [8] Mant C, Peterkin J, May E, *et al*. A feasibility study of a *Salix viminalis* gravel hydroponic system to renovate primary settled wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2003, 90: 19 - 25
- [9] Vervaeke P, Luysaert S, Mertens J, *et al*. Phytoremediation prospects of willow stands on contaminated sediment: a field trial [J]. *Environmental Pollution*, 2003, 126: 275 - 282
- [10] Landberg T, Greger M. Differences in uptake and tolerance to heavy metals in *Salix* from unpolluted and polluted areas [J]. *Applied Geochemistry*, 1996, 11: 175 - 180
- [11] Šotn Ākov ĀA, Lun Ākov ĀL, MasaroviĀov ĀE, *et al*. Changes in the rooting and growth of willows and poplars induced by cadmium [J]. *Biologia Pantarum*, 2003, 46 (1): 129 - 131
- [12] Dos Santos Utmazian M N, Wieshammer G, Vega R, *et al*. Hydroponic screening for metal resistance and accumulation of cadmium and zinc in twenty clones of willows and poplars [J]. *Environmental Pollution*, 2007, 148 (1): 155 - 165
- [13] Kuzovkina Y A, Knee M, Quigley M F. Cadmium and copper uptake and translocation in five willow (*Salix* L.) species [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2004, 6 (3): 269 - 287
- [14] Cosio C, Vollenweider P, Keller C. Localization and effects of cadmium in leaves of a cadmium-tolerant willow (*Salix viminalis* L.) I. Macrolocalization and phytotoxic effects of cadmium [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 58 (1~2): 64 - 74
- [15] Watson C, Pulford ID, Riddell B lack D. Screening of willow species for resistance to heavy metals: comparison of performance in a hydroponics system and field trials [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2003, 5 (4): 351 - 365