

不同品种杞柳对高锌胁迫的忍耐与积累研究*

杨卫东 陈益泰

(中国林业科学研究院亚热带林业研究所 富阳 311400)

摘 要 采用营养液培养实验方法,研究了高浓度 Zn 对 3 个杞柳品种“微山湖”、“大红头”、“一枝笔”生长、耐性及 Zn 吸收积累的影响。结果表明, Zn 对杞柳生长的影响与品种、植物部位以及介质中 Zn 浓度有关,低 Zn ($100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)、高 Zn ($1\,000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)均不同程度降低了 3 个杞柳品种的生长参数,低 Zn 显著减少了“微山湖”、“大红头”的根长及“大红头”根生物量,高 Zn 显著降低了 3 个品种株高、根长、生物量等生长参数; 3 个品种对 Zn 吸收与积累存在一定差异,地上部 Zn 含量随介质中 Zn 浓度升高而降低,根系中 Zn 含量随 Zn 浓度升高而增加, Zn 在根中含量高于地上部,低 Zn 时 3 个品种地上部 Zn 含量为 $1\,477.58 \sim 1\,583.19 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均 $1\,530.29 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; 转移系数(TF)随 Zn 浓度升高而降低,低 Zn 时“微山湖”、“一枝笔”转移系数高于“大红头”而接近 1; 迁移总量随 Zn 处理浓度增加而降低,3 个品种迁移总量为 $2\,332.58 \sim 3\,871.41 \mu\text{g}$, 平均 $3\,266.27 \mu\text{g}$, 迁移总量比大于 1; 耐性指数(TI)随营养液中 Zn 浓度增加而降低,低 Zn 时 3 个品种耐性指数均大于 0.5。以上结果表明,高 Zn 严重干扰了 3 个杞柳品种的生长,3 个品种对低 Zn 有较强的耐性及积累能力,显示出具有修复 $\leq 100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Zn 潜力。

关键词 杞柳 锌胁迫 耐锌能力 生长参数 转移系数 迁移总量 耐性指数

中图分类号: S792.13 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2009)06-1182-05

Tolerance of different varieties of *Salix integra* to high zinc stress

YANG Wei-Dong, CHEN Yi-Tai

(Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, China)

Abstract The effect of high Zn stress on Zn uptake, accumulation and the growth of three varieties of *Salix integra* were analyzed through nutrient solution culture. The results show that the influence of Zn treatment on growth parameters is related to plant variety, plant part and Zn concentration. Growth parameters of the three varieties are retarded at Zn concentration of $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (low) and $1\,000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (high). Root length of ‘Weishanhu’ and ‘Dahongtou’, and root biomass of ‘Dahongtou’ significantly drop in low Zn concentration. Stem height, root length and biomass markedly reduce in high Zn concentration. Zn uptake and accumulation vary with plant variety and shoot Zn content decreases with increasing Zn concentration. However, root Zn content increases with elevated Zn concentration. Root Zn concentration is generally higher than that of shoot. For the different plant varieties, shoot Zn concentration ranges from $1\,477.58$ to $1\,583.19 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ in low concentration Zn with an average of $1\,530.29 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$. Translocation factor (TF) decreases with Zn concentration increasing with TF for ‘Weishanhu’ and ‘Yizhibi’ higher than that for ‘Dahongtou’. Shoot total Zn content decreases with increasing Zn concentration. Shoot total Zn amount from $2\,332.58$ to $3\,871.41 \mu\text{g}$ with an average of $3\,266.27 \mu\text{g}$. Shoot/root total Zn ratio is in excess of 1 for three varieties. Tolerance index (TI) decreases with increasing Zn concentration, which is above 0.5 for the three varieties in low Zn concentration. This study suggests that high Zn concentration severely inhibits growth of *S. integra*. The three varieties have strong tolerance and high accumulation capacity in low Zn concentration. This shows that *S. integra* has a high potential for phytoextraction of Zn, whose concentration is not higher than $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Key words *Salix integra*, Zinc stress, Zinc tolerance, Growth parameter, Translocation factor, Total Zn amount in shoot, Tolerance index

(Received Nov. 16, 2008; accepted March 22, 2009)

* 浙江省科技厅重大项目(2006C12065)资助

杨卫东(1976-), 硕士, 助理研究员, 主要从事抗逆育种和植物修复研究。E-mail: ywdheze@sohu.com

收稿日期: 2008-11-16 接受日期: 2009-03-22

植物修复具有环境友好、成本低、技术简单且不会造成二次污染的优点,已引起国内外学者的普遍关注^[1]。早期人们总是希望寻找和运用重金属超积累植物修复环境污染,现已发现的超积累植物通常为野生的,植株矮小,生长缓慢,生物量低,重金属积累的绝对量较低,繁殖方法和栽培技术不甚成熟,且大多数植物本身不具有较好的经济价值,导致很难在修复工程上规模化应用。目前欧美等国开展应用速生杨树(*Populus* spp)、柳树(*Salix* spp)等树种修复环境污染。柳树是最适于植物修复的木本植物,具有易繁殖、速生、生物量大、根系深、蒸腾作用强、地上金属含量高、不与食物链相联等优点,通过短轮伐期栽培周期性收获生物量达到修复与净化土壤的目的,收获后的生物量作为可再生能源,具有显著的经济效益与社会效益^[2-4]。Zn 为植物、动物及人类生命活动所必需的微量元素,但在高浓度时对动植物及人类有较强毒性,Zn 在土壤中分布广泛,工业、农业生产活动是造成农田土壤 Zn 污染的主要原因^[2]。

欧美等国已广泛应用柳树修复 Zn、Cd 等重金属污染^[5-8],涉及到许多种及无性系,但这些树种有的在我国没有分布,有的栽培不广,因此有必要挖掘、开发与利用我国丰富的柳树种质资源用于植物修复。杞柳(*Salix integra* Thunb.)是我国栽培面积最广且具有显著经济效益的灌木柳,耐湿、速生、易繁殖,一般应用于编织,被认为是我国高效创汇经济树种之一。我国的杞柳栽培技术非常成熟,并培育有许多优良品种,它们一般超短轮伐集约化栽培(一年种植多年割条收益),收获后作为编织材料^[9]。营养液培养是筛选和评价忍耐和高积累重金属植物的有效方法,Dos Santos Utmazian 等^[10]曾用营养液培养方法以 $76.5 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Zn 筛选了 20 个柳树和杨树无性系对 Zn 等金属有抗性并评价对 Zn 富集情况;Baccio 等^[11]也用营养液培养方法评价了 2 个杨树无性系对高浓度 Zn ($100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1\ 000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)胁迫生长的响应。杞柳对重金属 Zn 耐性与富集情况报道较少,本试验选用 3 个杞柳优良品种,通过营养液培养实验方法,探讨高 Zn ($100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1\ 000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)对杞柳生长、耐性、Zn 积累的影响及品种间差异,初步评价杞柳对 Zn 的修复潜力,为杞柳应用于植物修复提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料及培养

供试 3 个杞柳品种分别为“微山湖”、“大红头”、“一枝笔”,均引自山东,为当地主栽品种。选择粗细均匀一年生枝条,剪成长 8 cm 的茎段,直接扦插

于含有营养液的 10 L 塑料盆内的泡沫板上。培养试验采用 Watson 等^[12]改进的营养液配方,连续不断充气,自然光照,温度为 $15\sim 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。预培养 60 d 后,开始 Zn 处理。

试验设 3 个 Zn 处理,ZnSO₄ 用去离子水配成母液,处理组用 ZnSO₄ 母液直接加到营养液中,添加 Zn 后处理组营养液最终 Zn 浓度为 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1\ 000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,对照组不加,由于营养液还含 $0.40 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Zn (为植物生长所必需营养),实际上 3 个处理中营养液中 Zn 最终浓度分别为 $0.40 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1\ 000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。每个处理 12 个重复,每个重复为 3 株植物。每 3 d 更换 1 次营养液,在温室处理 42 d 后收获植株,用自来水反复冲洗根部 3 次,然后用 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ EDTA 浸泡 10 min,洗去根表面上吸附的金属,再用去离子水冲洗 3 次。

1.2 生长参数测定

试验结束后收获植株,按 1.1 方法清洗根部,直接用直尺测定株高、最长根长度,然后分成地上部(茎和叶)、根系,在干燥箱中烘至恒重,测定地上与根生物量并计算冠根比。

1.3 Zn 含量测定

植株收获后分成地上部和根,在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 干燥 48 h,粉碎成粉末,65% HNO₃ 消解,用原子吸收分光光度计测定 Zn 含量。

1.4 数据计算与统计分析

位移系数(Translocation factor, TF)= $\frac{\text{Zn在地上部分浓度}}{\text{Zn在地下部分浓度}} \times 100\%$;耐性指数(Tolerance index, TI)以地上部干重或根干重表示,即 $TI_{\text{shoot}} = \frac{\text{处理地上部分干重}}{\text{对照地上部分干重}} \times 100\%$, $TI_{\text{root}} = \frac{\text{处理根干重}}{\text{对照根干重}} \times 100\%$;地上部 Zn 迁移总量=该植株地上部 Zn 含量×地上部生物量,根 Zn 积累总量=根中 Zn 含量×根生物量,迁移总量比=地上部 Zn 总量/根 Zn 积累总量。

数据用 Excel 和 DPS 8.01 统计分析,Duncan's 法多重比较($P<0.05$),对于生长参数、耐性指数等测定为 12 个重复;而地上部与根 Zn 含量的测定为 7 个重复。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 Zn 处理对杞柳生长的影响

表 1 为 Zn 对“微山湖”、“大红头”、“一枝笔” 3 个品种杞柳生长的影响。由表 1 可知,与对照组相比处理组杞柳生长参数均不同程度降低,低 Zn($100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)对株高影响不显著,高 Zn($1\ 000 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)显著降低了“微山湖”、“一枝笔”株高,而对“大红头”株高影响不显著($P<0.05$)。与对照相比低 Zn

表 1 不同 Zn 浓度处理对杞柳生长参数的影响

Tab. 1 Effects of different Zn concentrations on growth parameters of *S. integra*

生长参数 Growth parameter	Zn 浓度 Zn concentration ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	微山湖 Weishanhu	大红头 Dahongtou	一枝笔 Yizhibi
茎高 Stem height (cm)	0.4	59.2 ^a ±23.4	51.3 ^a ±20.1	42.7 ^a ±16.0
	100	44.8 ^{ab} ±17.4	42.9 ^a ±17.7	41.2 ^a ±8.1
	1 000	40.6 ^b ±13.2	39.4 ^a ±15.6	29.1 ^b ±12.9
根长 Root length (cm)	0.4	30.0 ^a ±10.6	26.0 ^a ±7.0	26.4 ^a ±8.3
	100	23.2 ^b ±5.9	22.5 ^b ±4.4	23.2 ^b ±2.7
	1 000	18.8 ^b ±4.3	15.8 ^b ±6.1	13.9 ^b ±4.2
地上生物量 Shoot biomass ($\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$)	0.4	3.25 ^a ±1.65	2.60 ^a ±1.43	1.52 ^a ±1.09
	100	2.37 ^a ±0.80	2.00 ^{ab} ±0.83	1.29 ^a ±0.42
	1 000	0.95 ^b ±0.84	1.40 ^b ±0.88	0.55 ^b ±0.48
根生物量 Root biomass ($\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$)	0.4	0.87 ^a ±0.55	0.82 ^a ±0.49	0.36 ^a ±0.37
	100	0.52 ^a ±0.27	0.44 ^b ±0.20	0.28 ^a ±0.18
	1 000	0.13 ^c ±0.10	0.12 ^c ±0.10	0.06 ^c ±0.03
冠根比 Shoot: root	0.4	4.1 ^a ±0.3	3.4 ^a ±0.7	5.8 ^a ±2.8
	100	6.4 ^{ab} ±1.9	4.6 ^b ±0.7	8.1 ^b ±5.2
	1 000	24.5 ^b ±14.3	13.7 ^b ±7.9	20.2 ^b ±3.0

不同小写字母表示差异显著($P<0.05$), 下同。Different small letters mean significant difference at 0.05 level, the same below.

可显著缩短“微山湖”、“大红头”的根系长度,但对“一枝笔”根长影响不显著;高 Zn 可显著缩短 3 个品种根长($P<0.05$)。低 Zn 时“微山湖”、“大红头”、“一枝笔”3 品种地上生物量分别较对照降低 27%、23%和 15%,但与对照相比差异不显著;高 Zn 时“微山湖”、“大红头”、“一枝笔”3 品种地上生物量均显著降低,分别较对照降低 71%、46%、64% ($P<0.05$)。由于根系直接与 Zn 接触,根系对 Zn 敏感性高于地上部分,低 Zn 时与对照组相比“微山湖”、“大红头”、“一枝笔”3 品种根生物量分别降低 40%、46%和 22%，“大红头”降低量与对照组差异显著;高 Zn 则显著减少了“微山湖”、“大红头”和“一枝笔”根生物量,分别较对照减少 85%、85%和 83% ($P<0.05$)。“微山湖”、“大红头”、“一枝笔”3 个品种冠根比随 Zn 浓度升高而增加,尤其在高 Zn 时比对照增加 2.5~5.0 倍。3 品种中“微山湖”、“大红头”长势好于“一枝笔”,这可能由品种自身差异所引起,Zn 对 3 品种的生长响应不仅与品种有关,还取决于植物不同部位与介质中 Zn 浓度。

2.2 不同浓度 Zn 处理杞柳中的 Zn 积累、位移系数、地上迁移总量及迁移总量比

由表 2 可知,杞柳地上部分 Zn 含量随介质中 Zn 浓度增加而降低,即低 Zn 处理地上部 Zn 含量显著大于高 Zn 处理;且 3 品种地上部 Zn 含量明显不同,低 Zn 时 3 品种地上部 Zn 含量平均值为 $1\,530.29\, \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,大小顺序为“一枝笔”>“大红头”>“微山湖”,而高 Zn 时 3 品种地上部 Zn 含量平均值仅为 $878.38\, \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,大小顺序为“大红头”>“微山湖”>“一枝笔”,可见,Zn 在杞柳中含量与品种及介质中 Zn 浓度有关。Zn 主要积累于根部(尤其高 Zn),根系中 Zn 含量随介质中 Zn 浓度升高而显著增

加,低 Zn 时 3 品种 Zn 含量平均值为 $1\,784.39\, \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,大小顺序为“大红头”>“一枝笔”>“微山湖”,而高 Zn 时 3 品种 Zn 含量平均值为 $4\,276.81\, \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,大小顺序为“微山湖”>“一枝笔”>“大红头”。地上部迁移总量为地上部 Zn 含量与生物量乘积,故地上部 Zn 迁移总量与地上部生物量有关。迁移总量随介质中 Zn 浓度增高而降低,低 Zn 时 3 品种地上部迁移总量大小顺序为“微山湖”>“大红头”>“一枝笔”,而高 Zn 时迁移总量大小顺序为“大红头”>“微山湖”>“一枝笔”。迁移总量比能更好地评价杞柳对 Zn 的修复潜力,低 Zn 处理的迁移总量比大于高 Zn,低 Zn 时 3 个品种迁移总量比的平均值为 5.05,高 Zn 时迁移总量比仍大于 1。3 品种位移系数均低于 1,并随着营养液中 Zn 浓度增加而降低,但低 Zn 时“微山湖”和“一枝笔”的位移系数接近于 1 ($P<0.05$)。

2.3 不同品种杞柳对 Zn 的忍耐力

以各处理组根、地上部生物量与对照的根、地上部生物量的比值表示耐性指数,耐性指数是评价植物对重金属耐性的重要参数之一,是选择耐重金属无性系的重要参考依据。由图 1 可知,无论用根生物量还是地上部生物量所表示的耐性指数均随着介质中 Zn 剂量增加而降低,由于根系直接与 Zn 接触,Zn 对根系毒性明显高于地上部,以根表示的耐性指数则明显低于地上部表示的耐性指数。低 Zn 时,以根表示的耐性指数大小顺序为“一枝笔”>“微山湖”>“大红头”,而高 Zn 时 3 个品种耐性指数大致相同;低 Zn 时以地上部分表示的耐性指数大小顺序为“一枝笔”>“大红头”>“微山湖”,而高 Zn 时则为“大红头”>“一枝笔”>“微山湖”。两种不同浓度间 Zn 对 3 品种耐性指数影响无相关性,且同一浓度下分别以根和地上部生物量所表示的耐性

表 2 不同 Zn 处理杞柳中 Zn 的积累、迁移系数、地上部迁移总量及迁移总量比
Tab. 2 Zn content, TF, total Zn in shoots and ratio of total amount of shoots to that of roots of *S. integra* exposed to different Zn concentrations

测定项目 Measure item	Zn 浓度 Zn concentration ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	微山湖 Weishanhu	大红头 Dahongtou	一枝笔 Yizhibi
地上部 Zn 累积 Shoot Zn content [$\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}(\text{DW})$]	0.4	18.50 ^c ±10.10	11.87 ^c ±4.64	31.77 ^c ±10.05
	100	1 477.58 ^a ±89.68	1 530.09 ^a ±181.60	1 583.19 ^a ±101.80
	1 000	886.76 ^b ±151.18	912.86 ^b ±79.46	835.52 ^b ±210.39
根系 Zn 累积 Root Zn content [$\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}(\text{DW})$]	0.4	133.93 ^c ±22.83	122.55 ^c ±28.16	99.38 ^c ±26.41
	100	1 622.37 ^b ±376.28	2 056.93 ^b ±461.78	1 673.87 ^b ±319.54
	1 000	4 470.17 ^a ±404.98	4 173.18 ^a ±426.20	4 187.07 ^a ±308.55
迁移系数 TF	0.4	0.13 ^b ±0.07	0.11 ^b ±0.06	0.35 ^b ±0.16
	100	0.95 ^a ±0.21	0.79 ^a ±0.21	0.97 ^a ±0.21
	1 000	0.20 ^b ±0.03	0.22 ^b ±0.02	0.21 ^b ±0.06
地上部迁移总量 Total amount of Zn in shoot (μg)	0.4	81.25 ^c ±48.62	41.50 ^c ±21.17	47.28 ^c ±17.13
	100	3 871.41 ^a ±938.32	3 594.83 ^a ±1389.17	2 332.58 ^a ±417.66
	1 000	1 082.12 ^b ±770.52	1 845.02 ^b ±535.29	534.24 ^b ±398.52
迁移总量比 Shoot/root ratio of total Zn	0.4	0.53 ^b ±0.24	0.30 ^c ±0.18	2.13 ^a ±2.15
	100	4.61 ^a ±1.98	3.75 ^a ±0.53	6.78 ^a ±5.95
	1 000	1.84 ^b ±1.09	2.90 ^b ±0.73	2.99 ^a ±1.65

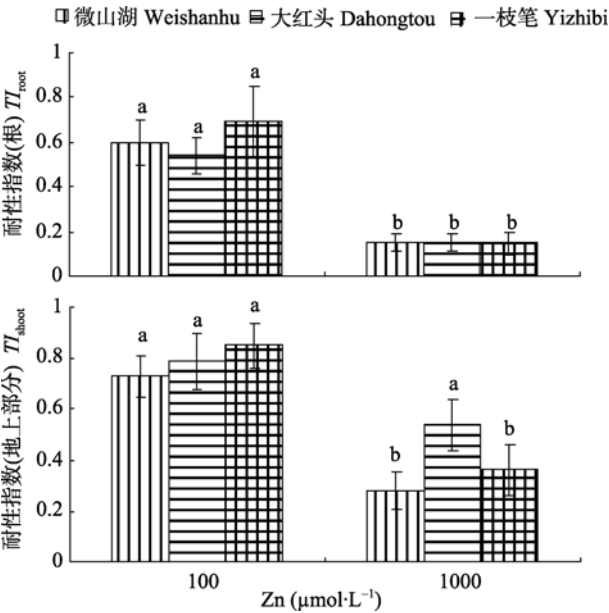


图 1 不同浓度 Zn 处理对杞柳根及地上部分耐性指数的影响

Fig. 1 Effects of different Zn concentrations on tolerance index of *S. integra* base on root and shoot biomass

指数也无相关性。低 Zn 时“一枝笔”Zn 耐性高于“微山湖”和“大红头”，并且低 Zn 时 3 品种耐性指数均大于 0.5。

3 讨论

植物对重金属的耐性是植物修复重金属污染的前提，耐性是指植物能生存于某一特定的含量较高的重金属环境中，而不会出现生长率下降或死亡等毒害症状。3 个杞柳品种对低 Zn 显示出较高耐性，虽然能在高 Zn 环境中生长，但高 Zn 对植物有明显毒性作用，严重干扰了植物生长，外观表现为顶部叶片部分失绿、黄化等症状，侧根粗而短，须根少。

Baccio 等^[11]已经发现 1 000 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Zn 对超积累植物来说剂量并不高，但对杨树等已属于高剂量。一些文献已经报道在柳树无性系之间对重金属耐性有很大变异^[13-15]。由于品种不同，3 个杞柳品种对 Zn 胁迫的耐性等方面存在一定差异，高 Zn 对 3 个品种生长影响较大，根系对 Zn 敏感性高于地上部分，高 Zn 强烈伤害植物根系，3 个品种根生物量较对照降低幅度达 80% 以上，说明杞柳对 Zn 的耐性低于超积累植物。由于品种自身差异，“微山湖”在营养液培养情况下长势较好，“一枝笔”长势稍差。Zn 显著改变杞柳地上部与地下部生物量的分配，高 Zn 时显著增加了冠根比，这也是高浓度 Zn 严重抑制根生长所致。

植物修复 Zn 污染关键在于地上部 Zn 吸收量及积累量，3 个品种对 Zn 吸收积累存在一定差异，地上部 Zn 含量随介质中浓度增加而降低，这是因为高 Zn 严重破坏了根系结构，限制根系中 Zn 向地上部转运，低 Zn 时 3 个品种对 Zn 有较高的富集能力，含量在 1 477.58~1 583.19 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间。根系中 Zn 含量随 Zn 处理浓度升高而增加，根中 Zn 含量高于地上部分；低 Zn 时“大红头”根中 Zn 含量高于“微山湖”和“一枝笔”，高 Zn 时“微山湖”根中 Zn 含量高于“大红头”和“一枝笔”，这种变化依赖于品种及营养液中 Zn 处理浓度的变化。位移系数表示重金属从根部到地上部的转运能力，低 Zn 时“微山湖”、“一枝笔”位移系数大于“大红头”而接近 1，高 Zn 时位移指数偏低，其原因是高 Zn 严重影响根系的生长，干扰 Zn 从根到地上部转运。Deng 等^[16]认为植物修复效率取决于地上部迁移金属总量，刘秀梅等^[17]也认为重金属迁移总量是评价植物修复

重金属污染的重要指标,超积累植物迁移总量相对不高,而一些生物量大的植物迁移总量较高,也具备修复潜力。低 Zn 时 3 个品种迁移总量为 2 332.58~3 871.41 μg ,且低 Zn 时迁移总量比明显高于 1。Vysloulžiová 等^[14, 15]认为柳树无论是植物提取还是植物固定都需要植物能在污染的环境中生长,地上部金属含量高、生物量大的植物可用来提取环境中的金属,而根部金属含量高、生物量大的植物适合固定环境中的金属。从杞柳各部分 Zn 含量看,“微山湖”、“一枝笔”可称之为地上部积累型植物,适合植物提取,“大红头”则可称之为根积累型植物,适合植物固定。一般用容易测定的生长参数筛选耐重金属柳树^[13]。本研究以根生物量和地上部生物量所表示的耐性指数评价对 Zn 的耐性,杞柳对 Zn 的耐性差异随品种、植物部位及 Zn 处理浓度等因素而变化,对低 Zn 显示出较高的耐性,高 Zn 时耐性指数偏低,根系对 Zn 敏感性高于地上部,以根生物量所表示的耐性指数均低于地上部所表示的耐性指数。田胜尼等^[18]认为耐性指数大于 0.5 时,表明植物对此重金属有较强的耐性。低 Zn 时 3 个品种杞柳的根和地上部表示的耐性指数均大于 0.5。

综上所述,低浓度 Zn 对 3 个品种杞柳生长影响较小,高剂量 Zn 则显著降低株高、根长及生物量等生长参数,根生物量较对照降低幅度高达 80%,表明高 Zn 严重破坏植物生长;低 Zn 时 3 个品种地上部平均含量为 1 530.29 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,位移系数接近 1,迁移总量平均值(3 个品种)为 3 266.27 μg ,迁移总量比大于 1;3 个品种耐性指数均大于 0.5。表明杞柳对 100 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Zn 有较强耐性及富集能力,从耐性指数、迁移总量比等看,“微山湖”表现较好,但 3 个品种都显示出具有修复 $\leq 100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Zn 污染的潜力。就重金属 Zn 污染的土壤而言,杞柳是土壤改良、环境修复的廉价有效植物材料。我国许多地区土壤和气候条件适合杞柳生长, Zn 作为必需微量元素,只有高 Zn 才会引起土壤污染,利用杞柳修复 Zn 污染,若枝条中 Zn 含量符合国家标准,仍可作为编织材料,叶也可以作为动物饲料 Zn 添加剂,若高于国家标准,枝条可作为生物质能源。植物在金属吸收和耐性方面存在一定变异,可通过选择吸收量高及耐性强树种或无性系来提高修复效率^[3]。现我国已建立了杞柳种质资源库,在实际应用中可根据污染土壤实际情况选择杞柳品种来提高修复效率。

参考文献

- [1] 黄长干,陈赞,邱业先.铜盐毒害对紫鸭跖草养分吸收和生长的影响[J].中国生态农业学报,2008,16(1):168-172
- [2] Castiglione S., Franchin C., Fossati T., et al. High zinc concentrations reduce rooting capacity and alter metallothionein gene expression in white poplar (*Populus alba* L. cv. Villafraça) [J]. Chemosphere, 2007, 67(6): 1117-1126
- [3] Pulford I. D., Watson C. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees—A review [J]. Environment International, 2003, 29(4): 529-540
- [4] Bittsánszky A., Kömives T., Gullner G., et al. Ability of transgenic poplars with elevated glutathione content to tolerate zinc(2+) stress [J]. Environment International, 2005, 31(2): 251-254
- [5] Landberg T., Greger M. Differences in uptake and tolerance to heavy metals in *Salix* from unpolluted and polluted areas [J]. Applied Geochemistry, 1996, 11(1): 175-180
- [6] Zalesny Jr R. S., Bauer E. O., Hall R. B., et al. Clonal variation in survival and growth of hybrid poplar and willow in an *in situ* trial on soils heavily contaminated with petroleum hydrocarbons [J]. International Journal of Phytoremediation, 2005, 7(3): 177-197
- [7] Kuzovkina Y. A., Quigley M. Willows beyond wetlands: Uses of *Salix* L. species for environmental projects [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2005, 162(1/4): 183-204
- [8] Rosselli W., Keller C., Boschi K. Phytoextraction capacity of trees growing on a metal contaminated soil [J]. Plant and Soil, 2003, 256(2): 265-257
- [9] 涂忠虞. 柳树育种与栽培[M]. 南京:江苏科学技术出版社, 1982
- [10] 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
- [11] Baccio D. D., Tognetti R., Sebastiani L., et al. Responses of *Populus deltoides*×*Populus nigra* (*Populus*×*euramericana*) clone l-214 to high zinc concentrations [J]. New Phytologist., 2003, 159(2): 443-452
- [12] Watson C., Pulford I. D., Riddell-Black 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
- [13] Vassilev A., Perez-Sanz A., Cuypers A., et al. Tolerance of two hydroponically grown *Salix* genotypes to excess zinc[J]. Journal of Plant Nutrition, 2007, 30(9): 1471-1482
- [14] Vysloulžiová M., Tlustoš P., Száková J., et al. As, Cd, Pb and Zn uptake by *Salix* spp. clones grown in soils enriched by high loads of these elements [J]. Plant Soil Environ., 2003, 49(5): 191-196
- [15] Vysloulžiová M., Tlustoš P., Száková J. 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
- [16] Deng D. M., Shu W. S., Zhang J., et al. Zinc and cadmium accumulation and tolerance in populations of *Sedum alfredii* [J]. Environmental Pollution, 2007, 147(2): 381-386
- [17] 刘秀梅, 聂俊华, 王庆仁. 6 种植物对 Pb 的吸收与耐性研究 [J]. 植物生态学报, 2002, 26(5): 533-537
- [18] 田胜尼, 刘登义, 彭少麟, 等. 香根草和鹅观草对 Cu、Pb、Zn 及其复合重金属的耐性研究[J]. 生物学杂志, 2004, 21(3): 15-19