

文章编号:1001—7380(2020)06—0028—06

灌木型柳树杂种无性系铅的积累特性及其遗传变异

黄瑞芳^{1,2},王红慧³,王红玲^{1,2},施士争^{1,2*}

(1. 江苏省林业科学研究院,江苏 南京 211153; 2. 江苏省农业种质资源保护与利用平台,江苏 南京 210014;
3. 江苏省农产品质量检验检测中心,江苏 南京 210036)

摘要:为研究灌木柳树的铅积累特性及其遗传变异差异,以8个杂交组合的51个灌木柳树无性系为试验材料,通过水培法测定了其在铅(300 μM)胁迫状况下的成活率、受害指数,分别根、茎、叶测定了其生物量、铅含量和铅总量。结果显示:不同杂交组合的成活率、受害指数和生物量平均值差异显著,P126×P585的子代受害指数为(3.70±2.27)%,显著小于其他杂交组合,P126×P63的子代的生物量为(13.85±4.95)g,显著大于其他杂交组合。杂交组合P1025×P63的成活率、受害指数的变异均最大,变异系数分别为51.65%和63.11%,生物量变异最大的为P294×P63杂交组合,变异系数达到79.97%。灌木柳树根部铅总量占整株铅总量的64.47%—91.28%,茎部铅总量占比为3.70%—16.08%,叶部铅总量占比为4.45%—20.72%,表明灌木柳树在受到铅胁迫时,铅主要积累在根部。铅含量变异最大的为P336×P63杂交组合,变异系数为50.79%,铅总量变异最大的为P61×P63杂交组合,变异系数为45.91%。差异分析表明,铅含量和铅总量在不同杂交组合间的差异均不显著,而无性系间差异显著,在今后的良种选择上可以直接从无性系中选择。

关键词:灌木柳树;无性系;铅胁迫;积累特性;遗传变异

中图分类号:Q945.78;Q948.116;S792.12;X131.2 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-7380.2020.06.006

Lead accumulation characteristics and genetic variation of shrub willow hybrid clones

Huang Ruifang^{1,2}, Wang Honghui³, Wang Hongling^{1,2}, Shi Shizheng^{1,2*}

(1. Jiangsu Academy of forestry, Nanjing 211153, China; 2. The Jiangsu Provincial Infrastructure for Conservation and Utilization of Agricultural Germplasm, Nanjing 210014, China; 3. Jiangsu Agricultural Product Quality Inspection and Testing Center, Nanjing 210036, China)

Abstract: In order to study the characteristics of lead accumulation and genetic variation of shrub willow, 51 clones of 8 hybrid combinations were used as experimental materials. The survival rate and damage index of them under lead pollution (300 μm) were measured by hydroponics method. Their biomass, lead content and total lead amount were measured in roots, stems and leaves. The results were as followed, there were some significant differences in average biomass, survival and damage index among different hybrid combinations, with (3.70±2.27)% damage index of P126×P585, significantly lower than those of the others, (13.85±4.95)g biomass of P126×P63, significantly higher. And the survival and damage index of P1025×P63 had the largest variations, with variation coefficient of 51.65% and 63.11% respectively. P294×P63 had the biggest variation of biomass with variation coefficient of 79.97%. The total amount of lead in root accounted for 64.47%—91.28%, 3.70%—16.08% in the stem and 4.45%—20.72% in the leaf, indicating that the lead mainly accumulated in roots under lead stress. There occurred the biggest variation of lead content in P336×P63 and biggest variation of total lead amount in P61×P63, with variation coefficient of 50.79% and 45.91% respectively. No significant differences

收稿日期:2020-10-10;修回日期:2020-11-01

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金项目“灌木柳树修复铅污染土壤的专用品种选育”[CX(19)3044];江苏省林业科技创新与推广项目“灌木柳新品种的引种繁育与示范”(LYKJ-邳州[2020]03);江苏省林业科技创新与推广项目“沿海地区高标准农田林网建设关键技术”(LYKJ[2018]03)

作者简介:黄瑞芳(1987-),女,安徽合肥人,助理研究员,硕士。主要研究方向植物修复技术。E-mail:aion126@126.com。

* **通信作者:**施士争(1968-),男,江苏宿迁人,研究员,学士。主要从事林木遗传育种方面的研究。E-mail:shshzn@163.com。

were found in lead content and total lead amount among different hybrid combinations, but significant differences among clones, prompting the selection of improved varieties could be directly selected at clone level.

Key words: Shrub willow; Clone; Lead stress; Accumulation characteristics; Genetic variation

铅不能被生物代谢所分解,且能通过食物链在动物和人体内富集,对肾脏、血液、神经系统等危害极大^[1-2]。柳树积累性高,植物修复能力强,适合用于修复重金属污染^[3-5]。灌木类柳树适应性强,速生,生物量大,扦插造林成本极低。根系发达,比表面积大,且主要分布在深 0—40 cm 的土层,位于重金属主要分布层^[6-8]。灌木柳条还可用作工业原料、编织工艺、生物能源和园林观赏等,具有较高的经济价值,又不直接与食物链相联系,与草本相比,优势明显^[9-10]。

植物对重金属积累特性的遗传变异规律是研究植物修复的基础和关键,目前在重金属对植物的毒性效应上研究较集中,对植物的重金属积累特性遗传变异研究较少。本文以作者前期筛选的铅耐受性强的无性系作为父母本^[11],共 8 个杂交组合的 51 个灌木柳树无性系为试验材料,以前期确定的适宜铅污染浓度^[12],通过水培方法测定了其在铅污染状况下(300 μM)的成活率、受害指数,分根、茎、叶测定了铅含量和铅总量,旨在分析灌木柳树杂交组合间的铅积累特性及其遗传变异差异,掌握灌木柳树重金属积累特性的遗传变异特征,以便为柳树的重金属耐性遗传改良提供理论依据,筛选具有更高重金属富集能力的无性系或基因型,提高修复效

率,加快修复进程。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为笔者于 2013 年根据重金属耐受性进行定向杂交所获得的子代,包括杞柳×簸箕柳的杂交组合,簸箕柳×簸箕柳的 2 个杂交组合,以及毛枝柳×簸箕柳、毛枝柳×黄花柳和二色柳×簸箕柳的各 1 个杂交组合。经过苗期初筛,选取的 8 个杂交组合共 51 个灌木柳树无性系(见表 1)。所有的灌木柳树均来自于江苏省林业科学研究院国家柳树良种基地柳树种质资源圃。

1.2 试验方法

试验采取水培法。所有灌木柳树于 2020 年 3 月从江苏省林业科学研究院柳树种质资源圃采穗,均选取长 15 cm、直径为 1 cm 的健壮插穗,清水培养 14 d 后,挑选生长势一致的柳树苗,置于定植篮中,每篮 10 株。用改良 Hoagland's 培养液培养 28 d 后进行铅处理 14 d,之后收获植株。 Pb^{2+} 以 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 的形式加入,浓度为 300 μM 。试验设置重复 3 个,每重复 10 株。试验过程中每 7 d 换培养液 1 次。为避免铅产生沉淀,开始铅胁迫后,培养液中不再加入 KH_2PO_4 。

表 1 供试无性系

组别	杂种组合	杂交组合	编号	性别	子代无性系数/个
1	杞柳×簸箕柳	P1025×P63	1月8日	♀:1,2,3,5,8 ♂:4,6,7	8
2		P336×P63	9月20日	♀:9-17,19,20 ♂:18	12
3		P646×P63	49-51	♀:49 ♂:50,51	3
4	簸箕柳×簸箕柳	P61×P63	21-28	♀:25-27 ♂:21-24,28	8
5		P1024×P63	29-33	♀:30,31,33 ♂:29,32	5
6		P126×P63	34-38	♀:34-38	5
7	毛枝柳×黄花柳	P126×P585	39-40	♂:39,40	2
8	二色柳×簸箕柳	P294×P63	41-48	♀:41,42,44,47,48 ♂:43,45,46	8

1.3 测定方法

本试验以灌木柳树无性系受铅胁迫后的受害指数^[13]、生物量以及体内铅含量为分析指标。胁迫实验结束后分根、茎、叶收获植株,先用自来水冲洗,然后用去离子水反复冲洗干净并用吸水纸擦干,根部用 EDTA 洗去表面附着的铅,105 ℃杀青 30 min 后,烘干至恒重,分别称其生物量(即干物质量, dry weight, DW)。按照《食品安全国家标准 食品中铅的测定》(GB5009. 12-2017)中的方法进行植物根、茎、叶铅含量的测定。受害指数根据参试无性系的受害等级进行计算,共分为 7 个受害等级(见表 2),受害指数(P)按照以下公式计算:

$$P(\%) = \sum_{i=1}^n (n_i \cdot k_i) / (6 \cdot \sum_{i=1}^n n_i) \times 100$$

其中, n_i 为达到第 i 等级的株数; k_i 为第 i 等级的分值, $i=0,1,\cdots 6$ 。

得到的数据利用 Excel 2010 和 IBM SPSS Statistics 19 分析。

表 2 柳树受害症状的分级标准

受害等级	形态描述	分值
0	植株未出现症状	0
1	底部叶片略发黄,卷曲皱缩,未落叶	1
2	1/4 落叶	2
3	1/2 落叶	3
4	3/4 落叶	4
5	完全落叶,未死亡	5
6	整株死亡	6

2 结果与分析

2.1 铅胁迫下不同杂交组合的成活率比较

成活率反映了灌木柳树在受到铅胁迫时的生长状况,对铅胁迫下各灌木柳树的成活率进行统计,对不同杂交组合进行差异比较(见表 3),结果显示:不同杂交组合间的成活率存在显著差异,P1025×P63 的成活率最低,只有 $(71.52 \pm 36.94)\%$,而 P646×P63,P1024×P63,P126×P63 和 P126×P585 的成活率均达到 100%。变异最大的为 P1025×P63 杂交组合,变异系数为 51.65%。

2.2 铅胁迫下不同杂交组合的受害指数比较

本文用受害指数反映铅胁迫下灌木柳树的受害等级和灌木柳树对铅的耐性能力。铅胁迫下各无性系的受害指数分布范围为 2.08—97.22%,受

害指数在 10%以下的有 6 个无性系,在 10%—50% 之间的有 26 个无性系。受害指数较低的 10 个无性系见表 4。

铅胁迫下各杂交组合的受害指数见表 5。由表 5 可知,P126×P585 的受害指数显著低于其他杂交组合,只有 $(3.70 \pm 2.27)\%$,P294×P63 的受害指数最高,为 $(58.54 \pm 25.52)\%$ 。杂交组合内变异最大的为 P1025×P63(变异系数达到 63.11%),变异最小的为 P126×P63(变异系数为 31.14%)。

表 3 灌木柳树杂交组合的成活率

组别	杂交组合	最小值	最大值	成活率/%	变异系数/%
1	P1025×P63	0	100	71.52±36.94 a	51.65
2	P336×P63	71.43	100	98.81±5.26 c	5.32
3	P646×P63	100	100	100±0 c	0
4	P61×P63	33.33	100	93.75±17.59 bc	18.76
5	P1024×P63	100	100	100±0 c	0
6	P126×P63	100	100	100±0 c	0
7	P126×P585	100	100	100±0 c	0
8	P294×P63	33.33	100	82.64±24.81 ab	30.02

注:成活率数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上存在显著性差异。

表 4 受害指数较低的灌木柳树排名

排名	系号	受害指数	杂交组合	杂种组合
1	12	2.08±2.08	P336×P63	杞柳×簸箕柳
2	3	3.70±1.60	P1025×P63	杞柳×簸箕柳
3	40	4.63±1.60	P126×P585	毛枝柳×黄花柳
4	4	5.56±2.78	P1025×P63	杞柳×簸箕柳
4	43	5.56±2.78	P294×P63	二色柳×簸箕柳
6	39	7.72±2.78	P126×P585	毛枝柳×黄花柳
7	32	19.44±3.18	P1024×P63	簸箕柳×簸箕柳
7	26	19.44±2.78	P61×P63	簸箕柳×簸箕柳
9	10	19.84±1.37	P336×P63	杞柳×簸箕柳
10	17	26.67±3.33	P336×P63	杞柳×簸箕柳

2.3 铅胁迫下不同杂交组合的生物量比较

铅胁迫下各杂交组合的生物量见表 5。生物量分布范围为 0.28—20.17 g,在铅胁迫下,不同杂交组合间的生物量平均值存在一定差异,P126×P63 的子代的生物量平均值显著大于其他杂交组合,为 (13.85 ± 4.95) g,生物量平均值最小的为 P294×P63 $[(6.05 \pm 4.84)$ g]。变异最大的为 P294×P63,变异系数达到 79.97%,变异最小的为 P126×P585,变异系数为 8.76%。

表 5 铅胁迫下灌木柳树的受害指数和生物量

组别	杂交组合	受害指数 最低值/%	受害指数 最高值/%	受害指数 平均值/%	变异系数/ %	生物量 最低值/g	生物量 最高值/g	生物量 平均值/g	变异系数/ %
1	P1025×P63	3.70±1.60	97.22±2.78	53.47±33.75 a	63.11	0.28±0.49	13.08±0.50	6.55±4.36 a	66.47
2	P336×P63	2.08±2.08	50.93±5.78	32.30±13.24 b	40.99	6.95±0.32	14.33±0.85	11.23±2.24 cd	19.98
3	P646×P63	33.33±2.78	71.11±5.09	52.54±16.68 a	31.74	4.77±0.51	10.72±1.22	6.96±2.92 a	41.94
4	P61×P63	19.44±2.78	68.65±4.03	43.61±16.16 ab	37.05	3.44±0.65	16.79±0.69	10.32±4.43 bc	42.91
5	P1024×P63	19.44±3.18	65.87±3.64	48.70±16.30 ab	33.47	5.52±0.95	11.73±0.91	7.65±2.39 ab	31.23
6	P126×P63	28.89±1.92	63.89±2.78	42.92±13.37 ab	31.14	6.53±1.08	20.17±0.88	13.85±4.95 d	35.76
7	P126×P585	2.78±2.78	4.63±1.60	3.70±2.27 c	61.24	10.44±1.32	11.10±0.38	10.77±0.94 c	8.76
8	P294×P63	5.56±2.78	83.33±2.78	58.54±25.52 a	43.59	1.04±0.47	16.74±0.75	6.05±4.84 a	79.97

注:数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上存在显著性差异。

不同杂交组合的存活率、受害指数和生物量的平均值均存在一定差异,但各杂交组合的子代无性系相应的变异系数也较大,这就说明每个杂交组合内的子代无性系间存在较大的差异。相同杂种组合杞柳×簸箕柳的 3 个不同的杂交组合的存活率、受害指数和生物量均存在显著差异。

2.4 铅胁迫下不同杂交组合的铅含量比较

为了进行无性系水平上的铅积累能力比较,本文以生物量和受害指数为指标,选择生物量和受害指数都超过平均值的共计 20 个无性系进行根、茎、叶铅含量测定的分析,这 20 个无性系隶属的杂交组合见表 6,测定结果见图 1。

方差分析结果显示各无性系的铅含量存在显著差异。从图 1 可以看出,参试无性系的不同部位的铅含量相差很大,叶部铅含量在 7.8—32.8 mg/kg,茎部铅含量在 10.5—42.3 mg/kg,而根部铅含量

在 792.3—3 498.3 mg/kg,根部的铅含量是茎、叶部铅含量的近百倍。

表 6 20 个无性系隶属的杂交组合

序号	杂种组合	杂交组合	无性系	无性系 个数
1	杞柳×簸箕柳	P1025×P63	3,4	2
2		P336×P63	10,11,12,16,17,18,20	7
3		P646×P63	51	1
4	簸箕柳×簸箕柳	P61×P63	22,23,26,28	4
5		P1024×P63	—	0
6	毛枝柳×簸箕柳	P126×P63	35,37,38	3
7	毛枝柳×黄花柳	P126×P585	39,40	2
8	二色柳×簸箕柳	P294×P63	43	1

参试无性系的叶部铅含量和茎部铅含量的高低并没有表现出一致性,其中茎部铅含量大于叶部铅含量的无性系有 12 个,而叶部铅含量大于茎部铅含量的无性系有 8 个。

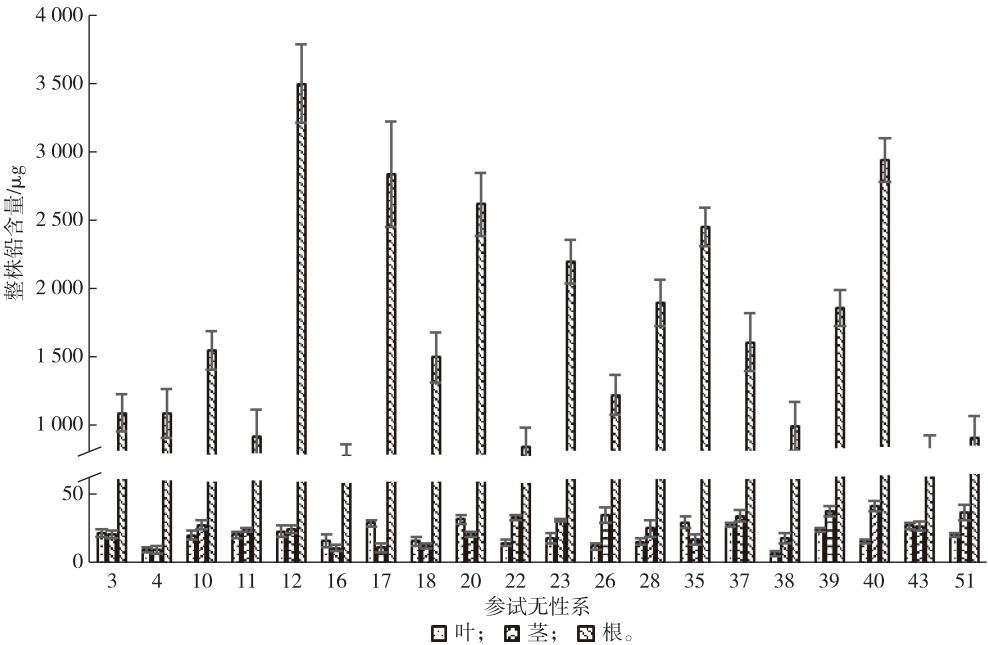


图 1 铅胁迫下灌木柳树不同部位(根、茎、叶)的铅含量

2.5 铅胁迫下灌木柳树的铅总量

为评估各无性系生物修复能力,现对各无性系的铅总量进行测定,从而得出各无性系体内固定的铅总量,结果见图 2。

方差分析结果显示各无性系的铅总量存在显著差异。从图 2 可以看出,整株铅总量在 776.53

(无性系 16)—3 549.61 μg(无性系 23)。虽然根部的生物量较小,但是铅含量极显著高于茎和叶,根部铅总量占整株铅总量的 64.47%(无性系 43)—91.28%(无性系 28),茎部铅总量占比为 3.70%(无性系 17)—16.08%(无性系 51),叶部铅总量占比为 4.45%(无性系 28)—20.72%(无性系 43)。

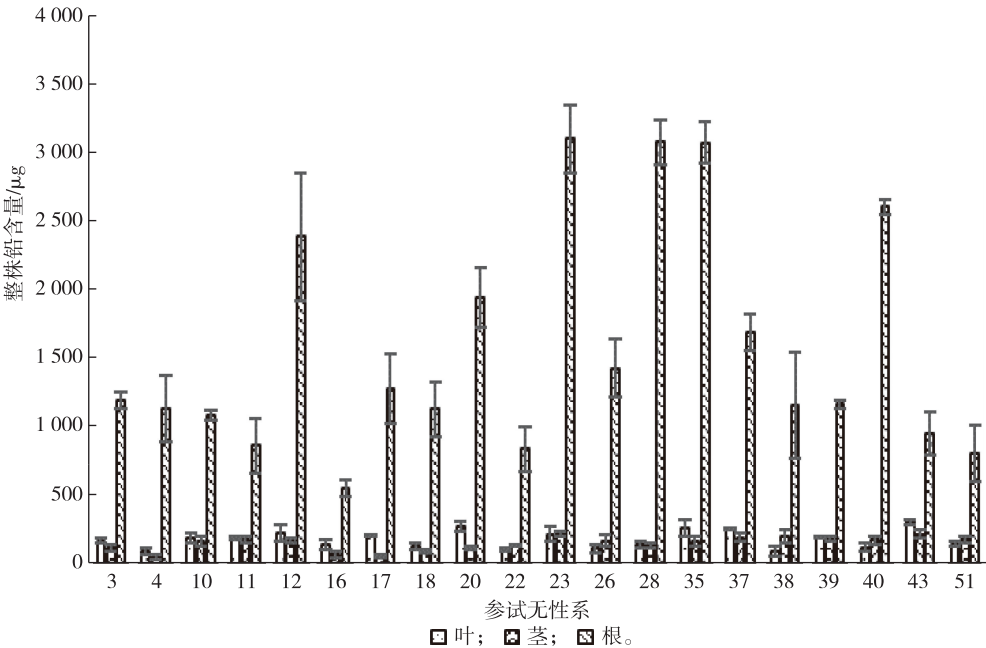


图 2 铅胁迫下灌木柳树不同部位(根、茎、叶)的铅总量

2.6 铅胁迫下不同杂交组合及无性系的铅积累特性的比较

对无性系超过 3 个的杂交组合进行差异性显著分析及多重比较(见表 7),符合条件的有 P336×P63,P61×P63 和 P126×P63 等 3 个杂交组合,各杂交组合的根铅含量为 1 548.75—1 962.95 mg/kg,铅含量无显著差异,变异最大的为 P336×P63,变异系数为 50.79%,变

异最小的为 P61×P63,变异系数为 36.81%;铅总量在 1 644.51—2 431.42 μg,铅总量也无显著差异,变异最大的为 P61×P63,变异系数为 45.91%,变异最小的为 P126×P63,变异系数为 39.72%。

虽然杂交组间的铅积累特性无显著差异,但对 20 个无性系的根、茎和叶的铅含量以及铅总量进行方差分析显示:各无性系间存在较大的差异。

表 7 杂交组合子代无性系(>3 个)的铅含量和铅总量的变异

组别	杂交组合	无性 系数/个	铅含量最低值/ (mg/kg)	铅含量最高值/ (mg/kg)	铅含量平均值/ (mg/kg)	变异系数 %	铅总量最低值/ μg	铅总量最高值/ μg	铅总量平均值/ μg	变异 系数/%
2	P336×P63	7	792.33±84.33	3 498.33±289.47	1 962.95±997.11 a	50.79	776.53±96.13	2 791.15±497.62	1 644.51±690.36 a	41.98
4	P61×P63	4	858±135.72	2 203±162.52	1 548.75±570.12 a	36.81	1 087.29±176.03	3 549.61±242.95	2 431.42±1 116.20 a	45.91
6	P126×P63	3	1 004.33±177.59	2 453.67±141.39	1 691.56±648.74 a	38.35	1 463.48±451.01	3 509.727±219.12	2 372.36±942.28 a	39.72

注:同列数据后相同小写字母表示在 P=0.05 水平上无显著性差异。

3 结论与讨论

本研究中,铅处理后柳树的存活率、受害指数、生物量在供试 8 个杂交组间均存在明显差异,总体而言,P126×P585 的存活率达到 100%,受害指数低至 3.70%,生物量为 10.77 g,表现较好;而 P1025×P63

的存活率低至 71.52%,受害指数高达 53.47%,生物量也低至 6.55 g,表现较差。

魏童等^[14]的研究显示,青杨的镉富集能力在种群间和无性系间都存在明显的变异性,表明可以通过开展种源/无性系选择,选育出富集能力更高的基因型,从而提高植物修复的效率。Yang 等^[15]研

究比较了12个柳树无性系在50 $\mu\text{mol/L}$ 铜、锌营养液中耐铜、锌能力的变化,结果显示柳树对铜和锌的耐性和积累量因无性系而异。本研究中铅处理后柳树根、茎和叶中的铅含量和铅总量在杂交组合间无显著差异,但在无性系间存在显著差异。由无性系的铅含量变异性和分布可以看出,无性系间的变异很大,其中更能衡量富集能力的根中铅含量最高的无性系为12号,达到3 498.3 mg/kg,根中铅含量最低的无性系为16号,只有792.3 mg/kg。整株体内铅总量较高的有无性系23,35,28,40,12号,较低的有无性系16,22,51,11,4号。由此可见柳树的铅富集能力在无性系间存在明显的变异性,这也显示在良种选择上可以直接在无性系水平上选择。

本研究中的无性系43号,受害指数较低,为5.56%,体内的铅含量也较低,为828.67 mg/kg。这可能是因为该无性系在铅胁迫下拒绝主动吸收对生长有害的铅^[16],通过合成胼胝质或Fe-Mn氧化膜等物质来组织重金属进入根系^[17],这些无性系被认为是较耐铅的品种。而本试验中的无性系12号和40号,其受害指数分别为2.08%和4.63%,但是其铅含量却高达3 498.33,2 943.67 mg/kg。这可能是由于该无性系主动吸收了铅之后通过体内螯合、储存在体内活性较弱的组织等手段使铅对自身生长的危害降到最低^[18]。这些无性系应是铅高积累品种,是适合大量提取环境中的铅污染进行生物修复的专用品种,这为进一步研究其耐铅和铅积累机理及进行生物修复提供了材料。

本研究中参试无性系的叶部铅含量和茎部铅含量的高低并没有表现出一致性。这与房娟^[19]的研究不同,该研究认为根>茎>叶,可能是因为其参试无性系较少,只有垂柳和苏柳172良种乔木柳,本试验的无性系较多,为20个灌木柳无性系。到底是因为乔木柳和灌木柳的不同,还是无性系数造成试验结果的差异,还有待进一步试验。

施翔等^[20]的研究显示Pb向地上部的转移相对较少,根部是铅在柳树体内存储的主要库。本研究显示,灌木柳树在受到铅胁迫时,根部铅总量占整株铅总量的64.47%—91.28%,这就表明铅主要积累在根部,而茎、叶中含量较少,这可能是由于Pb在根系主要以沉淀形式存在,如 $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$ 和 PbCO_3 等,且重金属大部分储存在结构栓化和木质化的根表皮部^[21],因此很难向地上部进行长距离运输^[22]。在土壤铅污染生物修复中,可以选择铅积累

能力强的灌木柳树无性系,通过蘸取生根剂等方法促进根系生长,在每年年底落叶前收割地上部分,从而减少枯枝落叶中的污染物回田,于第3年利用小型农机翻耕土地收获灌木柳树根部,从而修复重金属污染土壤,相应缩短修复年限,这较其他木本植物具有较强的优势。

参考文献:

- [1] 邵雅静,李建华,卢晋晶,等.生物修复剂TF3对铅污染土壤的修复效果研究[J].生态科学,2020,39(2):114-123.
- [2] 袁兴超,李博,朱仁凤,等.不同钝化剂对铅锌矿区周边农田镉铅污染钝化修复研究[J].农业环境科学学报,2019,38(4):93-103.
- [3] 赵凤亮,杨卫东.柳树(*Salix* spp.)在污染环境修复中的应用[J].浙江农业学报,2017,29(2):300-306.
- [4] 汪有良,王宝松,李荣锦,等.柳树在环境污染生物修复中的应用[J].江苏林业科技,2006,33(2):40-43.
- [5] ISHIKAWA Y. Study on phytoextraction of heavy metal contaminated soil by fast-growth willow (*Salix* spp.) [J]. Journal of Arid Land Studies, 2018,28(S): 193-196.
- [6] GREGER M, LANDBERG T. Novel field data on phytoextraction: pre-pulvitation pith salix reduces cadmium in wheat grains. [J]. International Journal of Phytoremediation, 2015, 17(10): 917-924.
- [7] SHI X, SUN H, CHEN Y, et al. Transcriptome sequencing and expression analysis of cadmium (Cd) transport and detoxification related genes in Cd-accumulating *Salix integra* [J]. Frontiers in Plant Science. 2016, 7(10):1577-1589.
- [8] YANG W, ZHAO F, ZHANG X, et al. Variations of cadmium tolerance and accumulation among 39 *Salix* clones: implications for phytoextraction[J]. Environmental Earth Sciences. 2015, 73(7): 3263-3274.
- [9] PULFORD I, RIDDELL-BLACK D, STEWART C. Heavy metal uptake by willow clones from sewage sludge-treated soil: the potential for phytoremediation[J]. International Journal of Phytoremediation, 2002, 4(1):59-72.
- [10] WANNG WW, CHENG L K, HAO J W, et al. Phytoextraction of initial cutting of *Salix matsudana* for Cd and Cu[J]. International Journal of Phytoremediation. 2019,21(2):84-91.
- [11] 黄瑞芳,王红玲,施士争.7个灌木柳无性系铅富集能力比较[J].江苏林业科技,2020,47(1):11-16.
- [12] 黄瑞芳,王红玲,施士争.铅胁迫对灌木柳树生长的影响[J].湖南林业科技,2015,42(6):45-50,56.
- [13] 王伟伟,乔志攀,何旭东,等.灌木柳种质资源的耐盐性变异[J].江苏林业科技,2016,43(6):15-19.
- [14] 魏童,胡希智,黄雄,等.不同种群青杨镉富集能力的变异特征研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2018,46(1):52-59,67.

(下转第41页)

- [16] 唐艳龙,杨忠岐,姜 静,等.栗山天牛的分布规律[C]//第二届中国林业学术大会.S6 森林昆虫与自然调控论文集.2009.
- [17] 张凤娟,金幼菊,陈华君,等.光肩星天牛对4种不同械树科寄主植物的选择机制[J].生态学报,2006,26(3):870-877.
- [18] 朱 宁,张冬勇,吴利平,等.聚集信息素和寄主植物挥发物对光肩星天牛和星天牛的引诱作用[J].昆虫学报,2017,60(4):421-430.
- [19] 孙丽艳,韩一凡,周银连,等.对云斑白条天牛具有不同抗性的杨树品种中挥发物成分的研究[J].林业科学研究,2002,15(5):570-574.
- [20] 曹川健,时新宁,刘永军.杨树品种对光肩星天牛抗性多指标综合排序的研究[J].内蒙古林业科技,2005(4):17-20.
- [21] 孙 萍.黑龙江省不同杨树品种(系)抗虫机理与青杨天牛危害的关系[D].哈尔滨:东北林业大学,2008.

(上接第33页)

- [15] YANG W D, WANG Y Y, ZHAO F L, et al. Variation in copper and zinc tolerance and accumulation in 12 willow clones: implications for phytoextraction [J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE B (Biomedicine & Biotechnology), 2014, 15(9): 788-800.
- [16] FAHR M, LAPLAZE L, BENDAOU N, et al. Effect of lead on root growth[J]. Frontiers in Plant Science, 2013, 175(4):1-7.
- [17] SAMARDAKIEWICZ S, KRZESLOWSKA M, BILSKI H, et al. Is callose a barrier for lead ions entering Lemna minor L. root cells? [J]. Protoplasma, 2012, 249(2):347-351.
- [18] LEITENMAIER B, KUPPER H. Compartmentation and complexation of metals in hyper-accumulator plants[J]. Frontiers in Plant Science, 2013, 374(4):1-13.
- [19] 房 娟.柳树对铅污染的生理、生长响应及吸收特性[D].南京:南京林业大学,2011.
- [20] 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.
- [21] LUX A, MARTINKA M, VACULIK M, et al. Root responses to cadmium in the rhizosphere: a review[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(1):21-37.
- [22] LEI M, ZHANG Y, KHAN S, et al. Pollution, fractionation, and mobility of Pb, Cd, Cu, and Zn in garden and paddy soils from a Pb/Zn mining area [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 168(1):215-222.

(上接第36页)

- [13] 张根柱,姜惠铁,杨曙方,等.蓝莓砧木与品种嫁接成活率试验初报[J].落叶果树,2017,49(3):10-13.
- [14] 彭佳龙,郑永祥,史小华.油茶高接换冠嫁接成活率影响试验[J].浙江林业科技,2012,32(2):57-59.
- [15] 吴连海,颜福花,姜根平,等.香榧实生大苗嫁接技术试验[J].浙江林业科技,2013,33(2):67-70.
- [16] 傅子照,庄卫东,林文忠,等.不同嫁接处理对油茶高接茶花接穗生长的影响[J].江西农业学报,2009,21(7):87-88.

· 征订启事 ·

欢迎订阅 2021 年度《江苏林业科技》

《江苏林业科技》为国内外公开发行的综合性林业科学技术刊物。1974 年创刊。为《中国学术期刊(网络版)》入编期刊、全国优秀期刊、江苏省优秀期刊、全国优秀农业期刊、华东地区优秀期刊。加入“万方数据——数字化期刊群”和中国期刊网等。

《江苏林业科技》主要刊登良种选育、育苗造林、园林绿化、林副特产、森林经营、森林保护、调查设计、野生动物等方面的学术论文、科研报告、经验总结,以及林业新成果、新技术,有较强的指导性、技术性、实用性,是林业科研、教学工作者、管理部门及广大林业生产者不可少的参考资料。欢迎订阅,欢迎投稿,欢迎刊登广告,宣传产品等。

《江苏林业科技》为双月刊,大16开本,国内外公开发行。国内统一刊号:CN 32-1236/S,国际标准刊号:ISSN 1001-7380,每期定价15.00元,全年订费90.00元。全年办理订阅手续,需订阅者请到当地邮局订阅或将订款汇至南京市江宁区东善桥江苏省林业科学研究院本刊编辑部,邮政编码211153。电话(025)52745438,83602820,83602060。由银行或邮局汇寄均可。开户银行:南京市农业银行金鹰支行,户名:江苏省林业科学研究院,帐号:10105101040000010。邮发代号:28-303。