

文章编号:1001—7380(2023)01—0001—06

# 镉超富集柳树对镉吸收、积累及分配特性的田间试验研究

周洁,陈庆生\*,王保松,王红玲,施士争

(江苏省林业科学研究院,江苏 南京 211153)

**摘要:**镉(Cd)是当前我国耕地土壤重金属污染最主要的元素,其污染和防治已成为国际上研究的难点和热点。该研究利用生物量高、生长旺盛的柳树优良无性系,在重金属污染严重超标的耕地上进行田间试验。经测定,地上部分叶片或茎中镉富集含量超过超富集临界质量分数(100 mg/kg)的柳树无性系有12个,蒿柳×宫布氏柳的镉富集能力最强,叶片中能达到250.6 mg/kg,茎中为64.55 mg/kg;其次为宫布氏柳。单株吸附镉总量最高的为蒿柳×宫布氏柳和耳柳×银柳,分别为73.02,73.66 mg,每公顷可提取的镉总量分别为3.68,3.65 kg。该田间试验说明,柳树类作为超富集镉的树种,具有较高的吸附能力和转移镉的能力,该试验结果为镉污染土壤修复、镉提取等提供了实践基础。

**关键词:**超富集;镉;柳树;重金属;土壤;污染

**中图分类号:**Q614.24<sup>+</sup>2;S792.12;X131.3 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-7380.2023.01.001

## Characteristics of cadmium absorption, accumulation and distribution in cadmium-tolerant willows of field test

Zhou Jie, Chen Qingsheng\*, Wang Baosong, Wang Hongling, Shi Shizheng

(Jiangsu Academy of Forestry, Nanjing 211153, China)

**Abstract:** Cadmium (Cd) is the main element of heavy metal pollution in cultivated land soil in China, and its pollution and control have become a difficult and hot topic in international research. In this study, a field experiment was carried out on the farmland with heavy metal pollution seriously exceeding the standard by using superior willow clones with high biomass and vigorous growth. According to the detection, there are 12 willow clones whose cadmium enrichment content in the leaves or stems of the aboveground parts exceeds the supercritical concentration of 100 mg/kg. *Salix viminalis* × *S. miyabeana* has the strongest cadmium enrichment ability, reaching 250.6 mg/kg in leaves and 64.55 mg/kg in stems. The single plant absorbing the highest total amount of cadmium is the clone of *S. viminalis* × *S. miyabeana* and *S. aurita* × *S. argyrea*, reaching to 73.02 and 73.66 mg, thus the total extractable cadmium per hectare is 3.68 and 3.65 kg. It shows that willows are featured with high cadmium concentration, i.e. high adsorption capacity and cadmium transfer capacity. This field experiment provides a practical basis for cadmium pollution remediation and cadmium extraction.

**Key words:** Hyper-accumulation; Cadmium; Willow; Heavy metal; Soil; Pollution

耕地是农业发展之要,粮食安全之基,农民立命之本。2015年发布的《中国耕地地球化学报告》显示,我国耕地污染总的点位超标率为19.4%<sup>[1]</sup>,

镉(Cd)元素是当前我国耕地土壤重金属污染最主要的元素,我国镉污染的土地涉及11省市的25个地区,污灌区污染面积达3.85万hm<sup>2</sup>,污染发生概

收稿日期:2022-10-11;修回日期:2022-10-29

基金项目:江苏省林业科技创新与推广项目“生物修复型柳树优良种质创新与高效栽培技术集成示范”(LYKJ[2020]03);国家林业和草原局重点研发计划项目“柳树专用品种选育”(GLM[2020]83);江苏省林业科学研究院自主创新项目“柳树镉超富集机理研究及种质创新”(ZZKY202101)

作者简介:周洁(1986-),女,江苏宜兴人,博士研究生。主要从事柳树遗传育种。E-mail:zjwin718@126.com

\*通信作者:陈庆生(1963-),男,江苏溧阳人,研究员。主要从事园艺和林木良种推广方面的工作。

率为 25.20%<sup>[2]</sup>。土壤中的镉对植物生长具有较强的毒性,不仅能抑制植物的生长,降低根系活力,从而影响植物吸收营养和水分,还能抑制光合作用,损坏细胞膜结构,最终导致植物减产<sup>[3]</sup>。采用植物修复土壤污染的方法成本低、环境友好、不破坏土壤,通过多次收割超富集植物可以带走大量重金属<sup>[4]</sup>,因此筛选适应性好、抗性强、吸附能力高的超富集植物是生物修复土壤重金属污染的关键。

我国 20 世纪 90 年代开始使用生物修复 21 世纪以来,植物修复已成为应用重点,如选用耐受性和富集能力较强的植物进行修复。目前已经发现蜈蚣草(*Pteris vittata* L.)<sup>[5]</sup>、香根草(*Chrysopogon zizanioides*)<sup>[6]</sup>、鳞苔草(*Carex tarumensis*)<sup>[7]</sup>、印度芥菜(*Brassica juncea*)<sup>[8]</sup>等是较典型的超富集植物,但大多为草本植物,生物量小,回收困难,存在一定的局限性。柳树为木本植物,可以种植 1 次,多年收割,生物量大、遗传资源多样、种间差异较大。目前对柳树重金属镉、铅等的胁迫研究开展了乔木柳旱柳、苏柳 172、杂交柳、杞柳‘一支笔’‘徽山湖’等液体培养和土壤培养试验,主要表现为富集在根部大于茎部和叶片中。根部富集可以降低镉等重金属在土壤中的移动性,减小污染面,但是不能有效去除土壤中的重金属,不利恢复土壤特性。欧美等国家利用高生物量灌木柳进行重金属污染土壤修复,开展了大量研究,发现利用蒿柳 6 a 可以将镉含量降到污染临界值 0.4  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[9]</sup>,而利用遏蓝菜需 12 a<sup>[10]</sup>。同时欧美国家利用柳树进行生物修复的同时进行生物质能源的利用,在灰分中回收重金属,实现了生态效益、经济效益的双赢。

目前关于重金属修复的试验大多还处于水培和土培的实验室阶段,灌木型柳树水培实验发现二色柳×银柳叶片吸附含量最高,蒿柳和旱柳、垂柳、白柳等在 Cd 40 mg/L 水溶液胁迫处理,旱柳 SH31 叶片吸附 Cd 质量分数最大达到 177.17 mg/kg,蒿柳根部吸附含量最高可达 4 261.46 mg/kg。控制性试验由于处理起始质量分数的不均一、试验周期不一致,无性系的田间适应性不确定等因素,试验结果还需要进一步在田间试验中进行证实。所以本研究利用江苏省林业科学研究院丰富的柳树种质资源,在镉污染严重的土地上进行田间试验,通过生物量、适应性、镉含量吸收分配特性的研究,以期对镉污染的植物修复提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 地点与材料

镉污染试验基地位于常熟市尚湖镇。该地块经测定,土壤中镉含量平均值为 5.28 mg/kg,有机质含量为 29.812 g/kg,全氮为 0.172%,pH 为 5.5 (见表 1)。供试材料取自江苏省林业科学研究院柳树种质资源圃,共测定柳树亲本和优良无性系 38 个,参试无性系采用随机区组设计,将柳树插穗剪成长 15 cm,于 3 月插于土壤中,株行距为 0.4 m×0.5 m,每个无性系 15 株,重复 5 个,随机插于田间,1 a 后进行无性系生物量、不同部位根、茎、叶的镉含量的测定。

表 1 土壤理化性质

pH	全氮 / %	有机质 / (g/kg)	Cd / (mg/kg)	Fe / (mg/kg)	K / (mg/kg)	P / (mg/kg)
5.5	0.172	29.81	5.277	29 677.5	14 861.66	571.667

### 1.2 镉含量测定方法

样本镉含量采用 X 射线荧光光谱仪(X-ray fluorescence spectrometer,简称 XRF 光谱仪)测定,光谱仪型号为 PHECDA-ECO(北京安科慧生科技有限公司)。所有的样品为整株的叶片、枝条和根,在田间用枝剪剪取整个地上部分,再挖出整个地下部分的根系,地上部分称取总的鲜质量,再分别摘下叶片,称取整株植物的叶片、枝条的鲜质量,带回实验室后烘干至恒重,称取干质量。将所有的叶片、枝条、根用枝剪等剪成小块,用粉碎机粉碎至粉末样品,混匀后称取适量样品过筛(60 目),样品采用硼酸边缘按压片剂方法,压力设定为 20 MPa,压力保持时间为 60 s,样品直径为 30 mm,取适量(4—5 g)样品于样品杯中并进行压片,随后放入样品盘进行测定。测定镉元素采用高能量模式,电压为 70 keV,电流为 12 W。

### 1.3 数据分析

所得数据采用 SPSS 13.0 进行处理。富集系数 = 植物地上部分 Cd 含量(mg/kg)/土壤 Cd 含量(mg/kg);转运系数 = 植物器官 Cd 含量(mg/kg)/植物根 Cd 含量(mg/kg)。

## 2 结果与分析

### 2.1 柳树地上部分对重金属镉积累特性

在田间试验条件下,不同无性系不同组织吸收镉

的能力不同。测试的 38 个无性系中,1 号蒿柳×宫布氏柳叶片的镉含量达 250.60 mg/kg,其次为 2,3 号宫布氏柳,镉含量分别为 189.27,173.60 mg/kg,最低的为 37 号耳柳×黄花柳,镉含量为 21.71 mg/kg,叶片中镉的含量超过镉超富集植物地上部镉质量分数临界标准 100 mg/kg 的无性系有 12 个。乔木型柳树有 7 个无性系参试,为 9 号旱柳×白柳、13 号白柳、21 号旱柳×白柳、27 号旱柳×白柳、33 号旱柳×白柳、34 号旱

柳、36 号垂柳×白柳,其中 2 个无性系达到超富集镉水平,分别为 111.79,106.12 mg/kg(见表 2)。

茎中镉含量最高的无性系也是 1 号,为 64.55 mg/kg,最低的无性系为 37 号,含量达 11.27 mg/kg(见表 2),乔木柳中茎富集含量低于大部分灌木柳,说明乔木柳的茎储存镉的能力没有灌木柳强。除了宫布氏柳外,耳柳×银柳、钻石柳的茎部富集含量也较其他无性系高。

表 2 柳树无性系叶片和茎吸附镉含量

无性系编号	杂交组合	拉丁名	叶片镉含量/(mg/kg)	茎镉含量/(mg/kg)
1	蒿柳×宫布氏柳	<i>Salix. viminalis</i> × <i>S.miyabeana</i>	250.60±35.11 a	64.55±32.31 a
2	宫布氏柳	<i>S.Miyabeana</i>	189.27±43.25 b	61.25±27.30 ab
3	宫布氏柳	<i>S.miyabeana</i>	173.60±1.50 bc	44.02±0.93 abc
4	耳柳×银柳	<i>S.aurita</i> × <i>S.argyracea</i>	148.10±3.10 cd	45.64±6.05 abc
5	蒿柳	<i>S.viminalis</i>	139.37±10.99 de	42.79±7.78 abc
6	尖叶紫柳×欧洲红皮柳	<i>S.koriyanagi</i> × <i>S.Purpurea</i>	109.89±26.41 efghi	41.94±18.23 abc
7	银柳	<i>S.argyracea</i>	119.10±6.30 defg	30.60±0.30 abc
8	钻石柳	<i>S.eriocephala</i>	96.23±13.40 fghijk	48.76±6.79 abc
9	旱柳×白柳	<i>S.matsudana</i> × <i>S.alba</i>	111.79±38.27 defgh	29.19±3.54 abc
10	簸箕柳×簸箕柳	<i>S.suchowensis</i> × <i>S.suchowensis</i>	98.65±14.07 fghijk	36.96±12.82 abc
11	宫布氏柳	<i>S.miyabeana</i>	94.71±45.22 fghijk	40.19±9.03 abc
12	毛枝柳	<i>S.dasyclados</i>	82.715±14.71 fghijkl	40.88±12.53 abc
13	白柳	<i>S.alba</i>	106.12±12.67 efghij	22.29±13.74 bc
14	钻石柳	<i>S.eriocephala</i>	86.345±12.23 fghijkl	34.36±24.52 abc
15	簸箕柳×银柳	<i>S.suchowensis</i> × <i>S.argyracea</i>	112.96±27.24 defgh	36.56±0.06 abc
16	钻石柳	<i>S.eriocephala</i>	66.35±4.45 klmn	47.48±0.71 bc
17	簸箕柳×毛枝柳	<i>S.suchowensis</i> × <i>S.dasyclados</i>	112.10±8.40defgh	38.95±2.62 abc
18	簸箕柳×白杞柳	<i>S.suchowensis</i> × <i>S.integra</i>	87.15±47.56 fghijkl	24.75±8.92 abc
19	钻石柳	<i>S.eriocephala</i>	83.14±2.45 ghijklm	27.91±6.80 abc
20	花叶柳	<i>S.integra</i> ‘ <i>Hakuro Nishiki</i> ’	66.67±1.69 jklmn	42.96±8.67 abc
21	旱柳×白柳	<i>S.matsudana</i> × <i>S.alba</i>	92.26±20.39 fghijk	13.00±1.68 c
22	钻石柳	<i>S.eriocephala</i>	66.81±13.50 jklmn	39.76±13.33 abc
23	杞柳	<i>S.integra</i>	72.39±10.07 ijklmn	29.143±12.67 abc
24	钻石柳	<i>S.eriocephala</i>	62.89±15.95 klmn	37.99±14.24 abc
25	J <sub>150</sub> F <sub>2</sub>	<i>Salix matsdana</i>	74.89±18.83 hijklmn	23.91±1.59 bc
26	耳柳	<i>S.alberti</i>	68.62±17.93 jklmn	26.38±9.36 abc
27	旱柳×白柳	<i>S.matsudana</i> × <i>S.alba</i>	71.61±13.35 ijklmn	22.96±7.08 bc
28	耳柳×银柳	<i>S.aurita</i> × <i>S.argyracea</i>	70.53±1.87 jklmn	45.65±6.05 abc
29	欧洲红皮柳	<i>S.purpurea</i>	65.43±16.42 klmn	27.20±6.18 abc
30	钻石柳	<i>S.eriocephala</i>	52.04±1.29 lmno	37.05±10.04 abc
31	钻石柳	<i>S.eriocephala</i>	48.8±2.60 lmno	37.90±17.74 abc
32	蒿柳	<i>Salix viminalis</i>	63.95±5.26 klmn	16.40±2.80 c
33	旱柳×白柳	<i>S.matsudana</i> × <i>S.alba</i>	61.75±7.14 klmn	13.62±5.75 c
34	旱柳	<i>Salix matsdana</i>	46.47±9.98 mno	15.07±8.60 c
35	杞柳×蒿柳×银柳	<i>S.integra</i> × <i>S.viminalis</i> × <i>S.argyracea</i>	43.99±1.50 mno	12.55±3.09 c
36	垂柳×白柳	<i>S.bablonica</i> × <i>S.alba</i>	43.26±1.99 no	11.58±4.36 c
37	耳柳×黄花柳	<i>S.alberti</i> × <i>S.caprea</i>	21.71±5.19 o	11.27±1.90 c
38	耳柳×银柳	<i>S.alberti</i> × <i>S.argyracea</i>	123.56±36.75 def	35.02±9.81 abc

注:表中同列数据后不同小写字母表示无性系间存在显著差异( $P < 0.05$ )。

## 2.2 柳树地下部分对重金属镉积累特性

在测定的无性系中,大部分无性系根部镉含量

均少于地上部分叶片或者茎部。1 号无性系蒿柳×宫布氏柳根富集含量最高,达 50.93 mg/kg,其次为

28号耳柳×银柳,含量为50.85 mg/kg,17号簸箕柳×毛枝柳、钻石柳、蒿柳等含量大于40 mg/kg,最低的为耳柳×黄花柳。11个无性系根部镉含量超过茎

部含量(见表3)。乔木柳无性系9,13,21,33,34,36号根部含量为10.08—25.81 mg/kg。

表3 柳树无性系根部镉含量

无性系编号	杂交组合	根镉含量/(mg/kg)	无性系编号	杂交组合	根镉含量/(mg/kg)
1	蒿柳×官布氏柳	50.93±18.13 a	20	花叶柳	36.52±0.02 abcde
2	官布氏柳	35.68±7.25 abcde	21	旱柳×白柳	10.08±2.43 e
3	官布氏柳	30.95±0.68 abcde	22	钻石柳	22.28±3.86 bcde
4	耳柳×银柳	21.59±0.94 bcde	23	杞柳	17.93±5.78 cde
5	蒿柳	42.75±14.86 abcd	24	钻石柳	19.33±3.21 cde
6	尖叶紫柳×欧洲红皮柳	22.66±0.50 bcde	25	J <sub>150</sub> F <sub>2</sub>	19.22±8.55 cde
7	银柳	19.12±3.58 cde	26	耳柳	15.73±9.85 de
8	钻石柳	31.11±2.79 abcde	27	旱柳×白柳	12.91±1.27 e
9	旱柳×白柳	25.81±1.81 abcde	28	耳柳×银柳	50.85±0.49 a
10	簸箕柳×簸箕柳	27.01±3.36 abcde	29	欧洲红皮柳	16.95±5.77 cde
11	官布氏柳	25.78±3.89 abcde	30	钻石柳	21.38±1.76 cde
12	毛枝柳	32.02±3.17 abcde	31	钻石柳	18.83±5.67 cde
13	白柳	24.43±4.89 abcde	32	蒿柳	10.47±3.55 e
14	钻石柳	25.15±9.54 abcde	33	旱柳×白柳	11.98±2.20 e
15	簸箕柳×银柳	32.86±3.15 abcde	34	旱柳	9.96±3.16 e
16	钻石柳	42.69±1.86 abc	35	杞柳×蒿柳×银柳	9.10±1.38 e
17	簸箕柳×毛枝柳	49.52±0.06 ab	36	旱柳×白柳	15.87±0.64 de
18	簸箕柳×白杞柳	19.27±1.34 cde	37	耳柳×黄花柳	9.69±2.65 e
19	钻石柳	18.56±0.47 cde	38	耳柳×银柳	24.89±3.21 abcde

注:表中同列数据后不同小写字母表示无性系间存在显著差异( $P<0.05$ )。

### 2.3 柳树对 Cd 的转移系数和富集系数特性

转移系数是衡量植物转移重金属的重要指标之一。富集系数(bioaccumulation factor, BF)是指植物中某重金属元素含量与土壤中该元素含量之比。从表4可以看出,叶片的转移系数(1.83—9.15)明显高于茎部,有4个无性系茎部转移系数小于1。21号的叶片转移系数最高,为9.15,其次为4号(6.86)、7号(6.23)。茎段转移系数范围为0.73—2.11,差异较小,最高的为2.11。整个地上部分的转移系数范围为1.84—10.45。无性系间差异较大,由表4可以看出,柳树的富集系数BF呈现出不同无性系的差异显著,范围在5.69—54.34之间。说明不同无性系对镉富集能力的差异较大。超富集系数特征是指地上部富集系数大于1,测定的无性系均能满足这个要求。

### 2.4 不同无性系单株吸附镉的总量

通过对不同无性系不同组织的干质量和吸附含量的测定,可以测算出不同组织的吸附镉的总量,由表5可见,单株叶片吸附镉的含量最高,为

43.42 mg,其次为39.68 mg,最低为0.87 mg。茎段中含量最高为31.66 mg,其次为25.72 mg,最低为3.58 mg。根部吸收的总量较叶片和茎部都低,最高为4.97 mg,最低为0.46 mg。如果按40 cm×50 cm的株行距进行种植,每年收割1次,每公顷最多的可收获镉的总量为3.68 kg。

## 3 结论与讨论

植物吸附重金属修复技术是重金属污染土壤修复的研究热点和重点,具有成本低、效率高、环境友好,不存在2次污染等优点。目前在植物修复重金属镉方面已开展了大量的研究,从微生物联合植物修复<sup>[11-12]</sup>、钝化剂修复<sup>[13]</sup>、低积累镉农作物的筛选<sup>[14]</sup>方面取得了一定的进展。目前已发现700多种重金属富集植物,其中有9种分布在禾本科,其余散布在菊科、十字花科、豆科等科类,大多为草本植物。灌木柳早于30 a前在欧洲就用于土壤修复,生物量大,易于栽培,管理粗放,成本低,易于机械化收割,是生物修复的理想树种。

表 4 柳树地上和地下部分转运系数和富集系数

无性系 编号	叶转运 系数	茎转运 系数	地上部分 转运系数	富集 系数	无性系 编号	叶转运 系数	茎转运 系数	地上部分 转运系数	富集 系数
1	4.92	1.27	6.19	54.34	20	1.83	1.18	3.00	18.90
2	5.30	1.72	7.02	43.19	21	9.15	1.29	10.45	18.15
3	5.61	1.40	7.01	37.41	22	3.00	1.62	4.62	17.75
4	6.86	2.11	8.97	33.41	23	4.04	1.63	5.66	17.50
5	3.26	1.00	4.26	31.41	24	3.25	1.96	5.22	17.39
6	4.85	1.85	6.70	26.18	25	3.90	1.24	5.14	17.03
7	6.23	1.60	7.83	25.81	26	4.36	1.68	6.04	16.38
8	3.00	1.57	4.57	24.52	27	5.54	1.78	7.32	16.31
9	4.33	1.06	5.40	24.01	28	1.40	0.44	1.84	16.02
10	3.65	1.37	5.02	23.38	29	3.86	1.60	5.46	15.97
11	3.67	1.56	5.23	23.26	30	2.43	1.73	4.17	15.36
12	2.75	1.28	4.03	22.25	31	2.59	2.01	4.60	14.95
13	4.34	0.91	5.26	22.14	32	6.11	1.57	7.68	13.85
14	3.43	1.37	4.80	20.81	33	5.15	1.14	6.29	13.00
15	3.33	1.56	4.90	19.77	34	4.66	1.51	6.18	10.61
16	1.55	1.12	2.68	19.71	35	4.83	1.38	6.21	9.75
17	2.27	0.00	2.27	19.33	36	2.73	0.73	3.46	9.45
18	4.52	1.28	5.81	19.29	37	2.24	1.16	3.40	5.69
19	4.48	1.50	5.98	19.15	38	4.96	1.41	6.37	27.34

表 5 单株无性系不同组织及单位面积镉吸附量

序号	叶/mg	茎/mg	根/mg	每公顷 提取镉的 总量/kg	序号	叶/mg	茎/mg	根/mg	每公顷 提取镉的 总量/kg
1	43.42±0.179	25.07±4.671	4.97±1.85	3.65	20	0.87±0.01	3.84±0.068	0.51±0.051	0.22
2	23.16±0.122	25.72±2.082	2.44±0.39	2.57	21	11.08±3.83	6.218±1.546	0.89±0.243	0.91
3	30.35±0.355	23.46±0.124	3.76±0.326	2.85	22	11.09±3.23	12.54±0.046	1.57±0.26	1.19
4	22.17±0.15	14.31±0.443	1.81±0.43	1.91	23	8.55±0.43	9.746±4.597	1.32±0.16	0.98
5	28.92±0.21	18.64±4.659	3.12±1.91	2.53	24	11.14±4.01	14.61±6.494	1.70±0.36	1.37
6	9.56±0.084	19.86±4.918	1.12±0.5	1.53	25	3.98±0.53	5.04±1.542	1.21±0.014	0.51
7	26.27±9.52	9.78±1.504	1.041±0.449	1.03	26	10.68±2.44	17.70±7.96	1.40±0.365	1.49
8	16.10±0.1776	25.13±2.969	4.66±0.4	2.29	27	21.39±0.78	7.90±1.804	1.119±0.195	1.52
9	20.70±14.34	11.17±6.218	2.02±0.831	1.69	28	8.89±0.6	10.73±0.205	3.48±0.14	1.14
10	7.56±2.418	8.18±1.842	1.62±0.486	0.87	29	11.91±1.69	12.03±3.122	1.12±0.04	1.25
11	7.02±0.19	4.41±2.233	0.84±0.579	0.61	30	3.31±2.49	6.68±1.34	0.81±0.2	0.54
12	16.75±5.24	22.46±0.346	2.16±0.09	2.07	31	7.82±0.149	6.54±0.47	0.88±0.468	0.76
13	39.68±7.48	15.83±3.761	2.83±1.436	2.92	32	3.17±1.16	4.09±0.679	0.46±0.089	0.39
14	10.61±0.12	10.55±9.937	2.13±0.62	1.16	33	16.24±0.32	3.58±1.765	1.34±0.468	1.06
15	4.68±0.03	7.318±0.123	1.43±0.101	2.18	34	2.08±0.82	5.27±1.503	0.5±0.035	0.39
16	8.003±0.036	8.54±0.276	2.23±0.436	0.92	35	10.07±0.298	5.96±2.759	0.74±0.385	0.84
17	29.88±2.217	20.028±0.579	3.44±0.109	2.67	36	3.08±2.04	5.56±1.331	1.25±0.633	0.49
18	15.94±11.41	14.52±2.251	2.13±0.42	1.63	37	7.63±3.4	6.17±0.115	0.93±0.233	0.66
19	24.78±0.02	18.35±0.04	2.85±0.205	2.27	38	37.27±0.21	31.66±2.747	3.62±2.81	3.68

植物对重金属的耐受性决定了是否可以用于污染修复,对重金属的吸收、转移和分配的能力决定了修复效率的高低<sup>[15]</sup>。选取生长旺盛、适应性强的柳树无性系38个,发现这些无性系中,吸附镉的含量在叶片中为21.71—250.6 mg/kg,具有明显差异,茎中为11.27—64.54 mg/kg,说明对镉的富集和转移能力的差异较大。超富集镉的柳树无性系有12个,说明柳树的修复能力较强,且比目前发现的超富集植物的吸附能力都高。

目前报道的筛选具有修复功能的柳树品种大多采用水培和土培的方法,由于重金属的起始质量分数和试验周期不同,柳树体内重金属积累量差异很大。Wieshammer等通过室外盆栽试验,比较了黄花柳(*Salix caprea*)、爆竹柳(*S. fragilis*)以及2种杂交柳(*S. ×smithiana*, *S. ×dasyclados*)对土壤中Cd和Zn的提取效率,发现杂交柳*S. ×smithiana*叶片中Cd、Zn含量分别高达250,3300 mg/kg,通过3次采收即能去除供试污染土壤中20%的Cd和5%的Zn<sup>[16]</sup>。水培条件下,Cd<sup>2+</sup>质量分数为5.0 mg/kg的状况下灌木型柳树枝条镉含量在39.68—162.40 mg/kg,叶片镉含量在53.55—298.43 mg/kg<sup>[17-18]</sup>。谢探春等研究发现苏柳55、金丝垂柳1011和苏柳172叶片中Cd质量分数分别为75,54.5,50 mg/kg<sup>[19]</sup>。柳树能积累大量的Cd,与柳树根系形态功能和细胞壁组分有密切关系<sup>[20-21]</sup>。柳树作为一种镉高积累的高生物量经济林木,是镉污染土壤修复的理想木本树种。由于气候环境和土壤条件的影响,不同种柳树的适应性和吸附效率在不同的地区差异较大,所以本项目首次在田间进行镉吸附的试验,筛选出生长适应性好,生物量高,吸附含量高的柳树种质资源,具有重要的意义,为镉污染土壤修复的推广提供了理论基础。

#### 参考文献:

- [1] 吴正卓,刘桂华,柴冠群,等.伴矿景天修复镉污染土壤研究进展[J].山地农业生物学报,2018,37(6):70-75.
- [2] 环境保护部.全国土壤污染状况调查公报.(2014-04-18)[2018-06-28.] <http://www.Mlr.gov.cn/xwdt/jrxw/201404/P020140417573876167417.pdf>.
- [3] 杨红霞,陈俊良,刘 崑.镉对植物的毒害及植物解毒机制研究进展[J].江苏农业科学,2019,47(2):1-8.
- [4] 柳赛花,陈豪宇,纪雄辉,等.高镉累积水稻对镉污染农田的修复潜力[J].农业工程学报,2021,37(10):175-181.
- [5] 丛 超,杨宁柯,王海娟,等.吡啉乙酸和激动素配合施用提高蜈蚣草和龙葵对砷、镉富集的田间试验[J].生态环境学报,2021,30(6):1299-1309.
- [6] 董名扬,孙 瑶,冯晓晖.两种生态型香根草对镉的耐受和积累特性比较[J].西北植物学报,2022,42(8):1330-1338.
- [7] 胡宗达,杨远祥,朱雪梅,等. Pb, Zn 对超富集植物(小鳞苔草)抗氧化酶活性的影响[J].水土保持学报,2007,12(6):86-91.
- [8] 邱孝煊,方守玲,陈孔长,等.不同植物与芥菜间作对芥菜-土壤镉含量的影响[J].福建农业科技,2022,53(3):63-69.
- [9] VOLLENWEIDER P, COSIO C, GUNTARDT-BOERG M S, et al. Localization and effects of cadmium in leaves of a cadmium-tolerant willow (*Salix viminalis* L.) Part II Microlocalization and cellular effects of cadmium[J]. Environmental and Experimental Botany, 2006, 58(1-3):25-40.
- [10] 刘戈宇,柴团耀,孙 涛.超富集植物遏蓝菜对重金属吸收、运输和积累的机制[J].生物工程学报,2010,26(5):561-568.
- [11] XIE Y, BU H, FENG Q, et al. Identification of Cd-resistant microorganisms from heavy metal-contaminated soil and its potential in promoting the growth and Cd accumulation of bermudagrass [J]. Environmental Research, 2021, 200: 111730.
- [12] 池耀威,王晓雅,初少华,等.耐镉促生根瘤菌的鉴定及其对镉的吸附特性[J].农业环境科学学报,2021,40(4):791-800.
- [13] 肖 豪,黄柏豪,孙 凯,等.应用灰色关联法分析石灰配施有机肥对镉污染土壤-植物系统的影响[J].农业环境科学学报,2022,41(9):1966-1974.
- [14] 孙乐妮,吴兵兵,徐志豪,等.两种镉积累型小麦根际微生物群落结构及功能多样性[J/OL].生态学报,2022,42(8):3366-3376.
- [15] 汪庆兵,陈光才,房 娟,等.速生柳树苗对土壤铅的耐性、积累与分配特性研究[J].植物研究,2014,34(5):626-633.
- [16] WIESHAMMER G, UNTERBRUNNER R, GARCIA T B, et al. Phytoextraction of Cd and Zn from agricultural soils by *Salix* ssp. and intercropping of *Salix caprea*, and *Arabidopsis halleri* [J]. Plant and Soil, 2007, 298(1):255-264.
- [17] 汪有良,王宝松,施士争.2011.灌木型柳树镉吸收积累性状的研究[J].西北林学院学报,2011,26(2):105-110.
- [18] 周疆丽,田胜尼,张玉琼,等.根生长法测定柳树对重金属的耐性研究[J].安徽农业科学,2010,38(16):8378-8380.
- [19] 谢探春,王国兵,尹 颖,等.柳树对镉-砷复合污染土壤的修复潜力与耐受性研究[J].南京大学学报(自然科学版),2019,55(2):282-290.
- [20] 陈丽丽,鲁伟丹,李俊华,等.三种植物生长与富集特性对镉污染土壤修复的响应[J].石河子大学学报(自然科学版),2022,40(2):172-179.
- [21] 贾中民,程 华,魏 虹,等.三峡库区岸生植物秋华柳对镉胁迫的光合响应[J].林业科学,2012,48(6):152-158.