

杨树和柳树富集 Cd、Zn、Pb 的品种差异性

张春燕^{1,2}, 王瑞刚^{2*}, 范稚莲¹, 施士争³, 丁永祯², 郭军康², 赵玉杰²

(1.广西大学农学院, 南宁 530004; 2.农业部环境保护科研监测所生态毒理与环境修复研究中心, 天津 300191; 3.江苏省林业科学研究院, 南京 211153)

摘要:利用土培试验,以 14 个杨树和柳树(*Populus*, *Salix babylonica*)品种为材料,研究了 Cd、Zn、Pb 复合污染对不同杨树、柳树品种生物量、重金属含量和总吸收量、富集系数(BCF)和转运系数(TF)的影响。结果显示,杨树、柳树在叶、茎、根生物量、株高、重金属含量和总吸收量、BCF 和 TF 上均存在显著的品种差异,随着土壤重金属含量的增加,杨树、柳树重金属含量和总吸收量显著增加,BCF 显著降低,TF 变化不明显。南林 895(*Populus × euramericana*(Dode)cv. ‘Nanlin-895’)、61-1(*Salix jiangsuensis* CL. ‘61-1’)和 795(*Salix jiangsuensis* CL. ‘795’)重金属含量较高,重金属含量最高的 61-1 叶片 Cd 和 Zn 的含量分别达到 29.23、1410 mg·kg⁻¹,但这些品种耐性较低,生物量较小。综合考虑生物量和重金属含量,61-1 和南林 95(*Populus × euramericana*(Dode)cv. ‘Nanlin-95’)重金属总吸收量较高,富集能力较强,富集能力最强的南林 95 叶片 Cd 和 Zn 的总吸收量分别达到 205.62、5 897.94 μg·株⁻¹。61-1 和南林 95 是有潜力的修复材料。

关键词:杨树;柳树;Cd;Zn;Pb;富集;品种差异

中图分类号:X503.235 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)03-0530-09 doi:10.11654/jaes.2013.03.019

Difference in Cadmium, Zinc and Lead Accumulation of Poplar and Willow Species

ZHANG Chun-yan^{1,2}, WANG Rui-gang^{2*}, FAN Zhi-lian¹, SHI Shi-zheng³, DING Yong-zhen², GUO Jun-kang², ZHAO Yu-jie²

(1.Agricultural College, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2.Centre for Research in Ecotoxicology and Environmental Remediation, Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; 3.Jiangsu Academy of Forestry, Nanjing 211153, China)

Abstract: A soil culture experiment was carried out to investigate the effect of Cd, Zn and Pb combined pollution on biomass, heavy metal concentration and total uptake, bioaccumulation coefficient (BCF), transportation factor (TF) in 14 poplar and willow species. The results showed there were significant differences among the poplar and willow species in biomass of leaf, stem and root, stem height, heavy metal concentration and total uptake, BCF and TF. With an increase in heavy metal concentration in soil culture, heavy metal concentration and total uptake in poplar and willow species increased significantly, and BCF decreased obviously, whereas TF had almost no change. Heavy metal concentration in *Populus × euramericana*(Dode)cv. ‘Nanlin-895’ (Nanlin 895), *Salix jiangsuensis* CL. ‘61-1’ (61-1) and *Salix jiangsuensis* CL. ‘795’ (795) were very high, the largest Cd and Zn concentration in leaves were detected in 61-1 (29.23 mg Cd·kg⁻¹ and 1410 mg Zn·kg⁻¹), but these species showed low metal tolerance and biomass. When biomass and heavy metal concentration were considered together, the heavy metal total uptake of 61-1 and *Populus × euramericana*(Dode)cv. ‘Nanlin-95’ (Nanlin 95) was larger in tested species, enrichment ability of heavy metal in them was stronger, and the largest Cd and Zn total uptake in leaves were detected in Nanlin 95 (205.62 μg Cd·plant⁻¹ and 5 897.94 μg Zn·plant⁻¹). 61-1 and Nanlin 95 hold promise for phytoextraction.

Keywords: poplar; willow; Cd; Zn; Pb; accumulation; species difference

收稿日期:2012-09-20

基金项目:国家自然科学基金项目(40803039);天津市自然科学基金项目(12JCYBJC14900);林业公益性行业科研专项(201204812)

作者简介:张春燕(1987—),女,山东胶南人,硕士,主要从事土壤污染生态方面的研究。E-mail:yanzihao3326@163.com

* 通信作者:王瑞刚,男,河北涉县人,副研究员,主要从事重金属污染修复方面的研究。E-mail:3761520835@sina.com

据统计,目前我国受重金属污染的农田面积达 $2.0 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 大约占总耕地面积的 1/5, 每年因重金属污染带来的粮食减产有 1000 多万 t, 被重金属污染的粮食达 1200 万 t, 合计年经济损失 200 多亿元^[1-2]。由于重金属污染的高危害性和普遍性, 世界各国对土壤重金属污染治理进行了大量的研究。目前多采用物理、化学及工程措施, 这些措施成本高, 占用空间大, 易造成二次污染, 对于大面积、低中度重金属污染土壤的治理来说, 实际可操作性差^[3]。相比而言, 植物修复技术具有经济、环保等优点, 引起科学家们的广泛关注^[4]。植物修复研究大多集中在超积累植物上, 由于超积累植物通常具有个体较小、生长较慢、根系所能延伸的土层较浅、没有经济价值及相关的善后处置困难等特点, 严重制约了其在修复实践中的应用^[5]。而杨树、柳树具有富集重金属、速生、高生产力和蒸腾活性、再生能力和适应性强等优点, 且不与食物链相连, 避免对人体产生伤害, 又能为人类带来可观的经济和环境效益, 在重金属修复实践中越来越受到重视^[6]。

杨树、柳树对重金属具有很强的富集能力和修复潜能, 特别是对 Cd 和 Zn^[7-11]。在法国北部地区重金属 Cd、Zn 和 Pb 污染土壤上种植的 25 种木本植物中, 杨树、柳树是富集 Zn、Cd 最高的品种^[12]。Dos Santos Utmazian 等(2006)发现柳树品种无性系 *S. dasyclados* BOKU 03 CZ-002 叶片中 Cd 含量可达 $315 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, *S. smithiana*-1 BOKU 03 DE-005 叶片中 Zn 含量高达 $3180 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[13]。杨树品种 *P. trichocarpa* $\times$ *P. deltoides* 叶片中 Cd 含量可达到 $209 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[14], *P. alba* AL 35 叶片中 Zn 含量超过 $2500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[15]。杨树、柳树对 Pb 修复主要体现在根部固定, 且杨树强于柳树^[16]。不同的杨树、柳树品种在富集重金属方面也存在显著差异^[13, 17-18]。Dos Santos Utmazian 等(2006)采用水培试验研究得知, 重金属 Cd、Zn、Cu、Pb 复合污染下 20 个杨树、柳树品种在生物量、重金属耐性和富集量等方面存在显著差异, 并指出叶中富集重金属最高的品种其重金属耐性较低^[13]。王新等(2007)研究发现, 与落叶松相比, 杨树修复重金属污染土壤所需的时间更短, 效果更佳^[19]。汪有良等研究表明柳树对水体 Cd 污染有较强的耐性和一定的 Cd 吸收能力, 乔木柳无性系对 Cd 的修复能力整体比灌木柳无性系强^[20-21]。因此, 筛选重金属富集能力强的杨树、柳树品种具有重要意义。但目前国内的相关研究较少, 主要体现在所研究的杨树、柳树品种较少, 且多集中于单一污染和水培试验, 严重制约了我国利用杨树、柳树修复重金属复

合污染土壤的进程。本文以我国栽培面积广、速生且适应性强的 14 个杨树、柳树品种为材料, 通过土培试验, 研究重金属 Cd、Zn、Pb 复合污染对杨树、柳树生长及重金属富集能力的影响, 旨在筛选出生物量大、耐重金属、高富集重金属的杨树、柳树品种, 为我国重金属污染土壤植物修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤采自天津蓟县一个 Pb/Zn 冶炼厂周围农田 0~20 cm 的表层土, 共采集两个污染浓度。土壤样品风干、磨碎, 过 5 mm 筛, 分别加入 56 、 32 、 $6.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 N、 P_2O_5 和 K_2O , 混合均匀后, 装入塑料盆, 每盆 9 kg 干土, 备用。土壤基本理化性质测定方法如下: 土壤经自然风干, 过 20 目筛后, 采用常规方法测定其 pH、有机质、碱解氮、速效磷、速效钾、阳离子交换量^[22]; 过 100 目筛后, 土壤重金属全量测定采用 $\text{HNO}_3/\text{HClO}_4$ 消解法^[23], 土壤重金属有效态测定采用 5 mM DTPA 提取^[24], 原子吸收分光光度计测定。两个污染水平土壤的主要理化性质见表 1。

1.2 植物材料和培养

供试的 14 个杨树和柳树品种为: 2205 (*Salix jiangsuensis* CL. '2205'), 287 (*Salix jiangsuensis* CL. '287'), 61-1 (*Salix jiangsuensis* CL. '61-1'), 795 (*Salix jiangsuensis* CL. '795'), 928 (*Salix jiangsuensis* CL. '928'), 中富 1 号 (*Salix matsudana* CL. 'zhongfu-1'), 群众杨 (*Populus popularis* '35-44'), P107 (*Populus euramericana* cv. '74/76'), 丹红杨 (*Populus deltoides* Bartr. CL. 'Danhong'), 辽胡杨 (*Populus simonii* $\times$ *Peuphratica* cv. 'Liaohu1'), 辽育 3 号 (*Populus deltoides* 'Liaoyu3'), 南林 895 (*Populus euramericana* (Dode) cv. 'Nanlin-895'), 南林 95 (*Populus euramericana* (Dode) cv. 'Nanlin-95'), 三北 1 号 (*Populus heixiao* cv. 'Zhonglin Sanbei-1')。

挑选粗细一致的茎段, 截成长 20 cm 的插条, 扦插至培养基质(珍珠岩:蛭石=1:1)中, 保持水分, 培养 30 d 后已生根, 挑选长势健壮和一致的苗木, 移入装有污染土壤的塑料盆中, 每盆一株, 每个处理 3 个重复, 缓苗 7 d 后移至温室大棚中。日常管理主要是保持土壤含水量为田间持水量的 60% 左右, 并注意防止病虫害, 90 d 后收获。

1.3 植物样品采集和重金属含量的测定

收获时先用米尺测量苗木的茎高, 然后将叶、茎、

表 1 供试土壤的理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of used soil

土壤理化性质(Soil property)	土壤 I(Soil I)	土壤 II(Soil II)
总镉/mg·kg ⁻¹	4.51	15.73
总锌/mg·kg ⁻¹	464	1442
总铅/mg·kg ⁻¹	359	1061
总铬/mg·kg ⁻¹	65.19	59.27
总镍/mg·kg ⁻¹	13.73	23.13
总铜/mg·kg ⁻¹	33.11	40.19
总砷/mg·kg ⁻¹	20.03	19.61
总汞/mg·kg ⁻¹	0.02	0.17
有效态镉/mg·kg ⁻¹	0.82	1.99
有效态锌/mg·kg ⁻¹	34.38	97.07
有效态铅/mg·kg ⁻¹	60.63	117.05
碱解氮/mg·kg ⁻¹	65.3	80.3
速效磷/mg·kg ⁻¹	20.3	25.8
速效钾/mg·kg ⁻¹	150.6	168.3
pH(H ₂ O)	7.77	7.73
有机质/g·kg ⁻¹	21.6	30.3
阳离子交换量/cmol·kg ⁻¹	21.9	23.2
粒径分级/wt%		
粘粒	8.3	9.0
粉粒	44.2	44.6
砂粒	47.5	46.4
土壤质地	壤土	壤土

注:砂粒 0.02~2 mm,粉粒 0.002~0.02 mm,粘粒 <0.002 mm。
Note: Sand 0.02~2 mm, silt 0.002~0.02 mm, clay<0.002 mm.

根分别用自来水和去离子水冲洗干净,于烘箱中 75℃烘 72 h 至恒重,冷却后用万分之一的天平进行称重,并做好记录,称重后的样品用不锈钢粉碎机(T250D,Ika,Germany)粉碎用于重金属含量的测定。

称取 0.3 g 植物干样,用长纸槽送入微波消解罐的底部,加入 7 mL 浓 HNO₃ 和 1 mL 30% H₂O₂,放入微波消解仪(Mars6,CEM,USA)中进行微波消解,消解完全后,取出冷却,进行转移、过滤、定容,用原子吸收分光光度计(AAS ZEE nit700,Germany)测定 Pb、Cd、Zn 含量。

生物富集系数(BCF)=地上部重金属含量/土壤重金属总含量

转运系数(TF)=地上部重金属含量/根部重金属含量

1.4 数据分析

试验各组数据均使用 SPSS16.0 软件首先进行双因素(品种和处理)方差分析,不同品种之间如有显著

差异,再利用 LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 杨树和柳树的生长情况

由表 2 可知,在 Cd、Zn、Pb 重金属复合污染下,不同杨树、柳树品种叶、茎、根生物量和株高存在极显著差异。柳树品种中 61-1 的生物量较小,叶和茎生物量分别为 3.75、3.20 g·株⁻¹,2205 和中富 1 号生物量较大;杨树品种南林 895 叶、茎和根生物量最小,分别为 4.96、2.52、0.36 g·株⁻¹,而南林 95、P107 和丹红杨生物量较大。总体上看,土壤重金属浓度水平对供试的 14 个杨树、柳树叶、茎、根生物量和株高的影响不显著,但品种间存在极显著差异。61-1 和 795 茎、叶生物量随土壤重金属含量的增加而显著降低,2205、928 和三北 1 号没有降低,反有增加。

2.2 杨树和柳树叶、茎、根 Cd、Zn、Pb 含量

由表 3 可知,在 Cd、Zn、Pb 重金属复合污染下,不同杨树和柳树品种叶、茎、根 Cd、Zn、Pb 含量之间存在显著差异,柳树器官中 Cd 和 Zn 的含量普遍高于杨树,而 Pb 含量无显著差异。柳树品种 61-1 和 795 叶、茎、根中 Cd、Zn、Pb 的含量均较高,其中 61-1 叶片 Cd 和 Zn 含量最高,分别为 29.23、1410 mg·kg⁻¹,而 2205 和中富 1 号 3 种重金属含量均较低;杨树品种南林 895 除根 Pb 含量较低外,其他各器官中 Cd、Zn、Pb 的含量在供试杨树品种均最高,叶片 Cd 和 Zn 的含量分别达到 12.61、475.86 mg·kg⁻¹,P107、丹红杨和南林 95 各器官中 3 种重金属含量均较低。杨树、柳树各器官中 Cd 和 Zn 的含量为叶>根>茎,而 Pb 的含量为根>叶>茎。随着污染浓度的增加,杨树和柳树叶、茎、根的重金属含量呈极显著增加。

2.3 杨树和柳树叶、茎、根 Cd、Zn、Pb 总吸收量

由表 4 可知,Cd、Zn、Pb 重金属复合污染条件下,不同杨树和柳树品种叶、茎、根 Cd、Zn、Pb 的总吸收量之间存在极显著差异,其中柳树品种 61-1 各器官中 3 种重金属总吸收量均较高,叶片 Cd 和 Zn 的总吸收量分别达到了 110.51、5 328.58 μg·株⁻¹,而 928 均较低;杨树品种南林 95 各器官中 3 种重金属总吸收量均较高,叶片 Cd 和 Zn 的总吸收量分别达到了 205.62、5 897.94 μg·株⁻¹,而南林 895 均较低。杨树、柳树各器官对 Cd 和 Zn 的总吸收量为叶>茎>根,对 Pb 的总吸收量为根>叶>茎。不同处理之间,除了茎和根 Cd 的总吸收量在两种污染土壤上没有显著差异外,其他均随土壤污染浓度的增加而显著增加。

表 2 Cd、Zn、Pb 复合污染对杨树、柳树叶、茎、根生物量和株高的影响

Table 2 Effects of Cd, Zn and Pb combined pollution on leaf, stem and root biomass and plant height of poplar and willow species

品种 Species	处理 Treatments	叶生物量/g·株 ⁻¹ Leaf biomass/g·plant ⁻¹	茎生物量/g·株 ⁻¹ Stem biomass/g·plant ⁻¹	根生物量/g·株 ⁻¹ Root biomass/g·plant ⁻¹	株高/cm Stem height/g·plant ⁻¹
2205	土壤 I	5.63±3.14	6.44±1.47	1.63±0.35	129.33±20.11
	土壤 II	6.71±1.33	8.72±2.26	2.20±0.41	143.00±14.42
287	土壤 I	5.95±1.03	11.04±0.88	2.09±0.25	142.33±6.43
	土壤 II	4.70±1.35	8.84±2.51	1.47±0.29	130.00±0.00
61-1	土壤 I	5.08±0.30A	5.96±1.04A	1.29±0.53	122.00±5.57
	土壤 II	3.75±0.21	3.20±0.07	2.03±0.57	92.00±16.46
795	土壤 I	5.70±1.49A	11.26±1.75A	0.93±0.14	152.83±11.45
	土壤 II	3.93±0.45	8.32±1.11	2.04±0.03	128.67±30.99
928	土壤 I	4.53±0.82	6.58±2.41	0.83±0.40	125.33±2.08
	土壤 II	5.78±1.73	6.94±3.98	1.24±0.32	113.67±36.12
中富 1 号	土壤 I	6.91±0.75	8.81±3.30	2.02±0.52A	107.50±12.50
	土壤 II	5.81±1.14	6.71±2.05	0.75±0.48	118.50±0.50
群众杨	土壤 I	11.79±4.95	15.34±2.38A	1.56±0.91	128.00±27.06
	土壤 II	9.67±2.15	9.61±2.04	0.66±0.28	134.33±29.37
P107	土壤 I	17.78±8.38	10.71±5.03	1.36±0.21	99.50±12.50
	土壤 II	15.58±1.37	14.22±2.43	2.29±0.76	100.00±3.00
丹红杨	土壤 I	20.27±5.99	10.71±5.03	1.36±0.21	99.50±12.50
	土壤 II	14.39±2.39	9.19±3.47	1.94±0.84	81.00±15.00
辽胡杨	土壤 I	7.16±2.93	6.13±2.36	0.31±0.21	100.00±16.00
	土壤 II	6.96±0.09	6.64±0.17	0.54±0.18	93.00±9.00
辽育 3 号	土壤 I	13.39±2.30	10.92±3.23	3.18±0.49	123.67±4.73
	土壤 II	13.85±4.13	13.49±2.86	2.40±0.35	135.33±21.03
南林 895	土壤 I	5.51±0.13	2.70±0.28	0.56±0.28	80.67±19.66
	土壤 II	4.96±0.58	2.52±0.38	0.36±0.07	54.25±27.75
南林 95	土壤 I	20.04±3.19	14.36±2.83	2.64±1.54	113.50±1.50
	土壤 II	19.08±3.72	14.01±3.27	1.95±1.53	122.50±12.50
三北 1 号	土壤 I	7.75±1.31D	9.75±2.32B	2.41±0.31	106.33±7.02
	土壤 II	11.36±2.46	11.51±1.96	1.61±0.10	99.33±13.20
品种 Species		**	**	**	**
处理 Treatments		n.s	n.s	n.s	n.s
品种/处理 Species/treatments		n.s	n.s	*	n.s

注:A 表示同一品种不同土壤间的差异显著($P<0.05$);** 表示差异极显著($P<0.01$);* 表示差异显著($P<0.05$);n.s 表示差异不显著。

Note:A indicates significant difference between the soil I and soil II in same species($P<0.05$); ** indicates highly significant difference($P<0.01$); * indicates significant difference($P<0.05$); n.s indicates no significant difference.

2.4 杨树和柳树 Cd、Zn、Pb 富集系数和转运系数

由表 5 得知,在 Cd、Zn、Pb 重金属复合污染下,供试杨树、柳树品种 Cd 和 Zn 的 TF 大都接近或大于 1, Pb 小于 1。不同杨树、柳树品种 Cd、Zn、Pb 的 TF 和 BCF 的差异呈极显著,柳树品种 61-1Cd 和 Zn 的 TF 和 BCF 最高,其 Cd 和 Zn 的 TF 分别为 1.96 和 4.08,而 Pb 的 TF 和 BCF 却较低;南林 895Pb 的 TF 和 BCF 在所有供试品种中最高,Cd 和 Zn 的 TF 和 BCF 在所有供试的杨树品种中最高;柳树品种 2205、928 和杨树品种 P107、南林 95 的 Cd、Zn、Pb 的 TF 和 BCF 较

低。不同污染土壤之间的 TF 无显著差异,而 BCF 则有显著差异,且随浓度的增加而显著降低。

3 讨论

3.1 Cd、Zn、Pb 复合污染对杨树和柳树生长的影响

大量研究显示,杨树和柳树对重金属污染具有一定的耐性,但不同品种之间存在差异。Dos Santos Ut-mazian 等(2006)发现在相同的重金属 Cd、Zn、Cu、Pb 污染下,20 个杨树、柳树品种在生物量上存在显著差异,并指出叶中富集重金属最高的品种其重金属耐性

表 3 Cd、Zn、Pb 复合污染对杨树、柳树叶、茎、根 Cd、Zn、Pb 含量的影响

Table 3 Effects of Cd, Zn and Pb combined pollution on Cd and Zn and Pb concentration in leaf, stem and root of poplars and willows

品种 Species	处理 Treatments	Cd 含量 Cd concentration/mg·kg ⁻¹			Zn 含量 Zn concentration/mg·kg ⁻¹			Pb 含量 Pb concentration/mg·kg ⁻¹		
		叶 Leaf	茎 Stem	根 Root	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root
2205	土壤 I	9.92±1.28CDE	6.29±2.78CD	7.66±2.51CD	278.55±95.43DEF	79.51±16.10AB	167.91±48.48B	1.22±0.14E	0.71±0.04BC	17.74±12.19BC
	土壤 II	15.45±1.70	6.53±1.41	7.91±1.22	468.67±64.87	95.31±5.25	205.60±25.17	1.39±0.17	1.06±0.15	20.99±2.05
287	土壤 I	15.56±1.42B	7.43±1.65CDE	9.27±2.18A	458.49±107.48BC	59.55±2.50DE	174.15±31.17AB	1.41±0.33BCDE	0.82±0.09BC	23.83±7.47A
	土壤 II	16.89±1.28	4.63±2.08	13.27±2.27	737.22±84.09	73.04±14.07	278.08±94.96	1.86±0.41	1.28±0.67	38.97±2.36
61-1	土壤 I	17.31±1.54A	5.09±2.45BC	7.63±0.94BC	764.11±115.77A	80.49±11.21A	133.35±17.22B	1.63±0.34AB	0.68±0.02BC	24.23±11.04A
	土壤 II	29.23±8.56	10.15±1.66	10.44±2.59	1 410.08±394.68	116.69±26.35	223.71±94.99	2.47±0.56	1.57±0.55	35.95±5.61
795	土壤 I	12.50±4.02BC	6.90±0.90B	8.72±2.01AB	509.23±101.43B	69.92±4.77BC	148.53±35.65B	1.39±0.22ABC	0.78±0.18BC	18.92±10.86AB
	土壤 II	16.37±3.67	10.33±1.22	13.19±3.60	813.50±209.18	94.36±6.27	210.66±79.00	2.60±0.62	1.85±0.75	32.28±2.33
928	土壤 I	9.46±1.19CD	6.66±0.80CDE	10.03±2.46A	321.84±79.32DE	69.45±8.04BCD	161.59±71.20A	1.47±0.21DE	0.82±0.21BC	13.67±2.02BC
	土壤 II	16.57±0.34	5.08±2.79	13.83±0.18	451.56±26.84	80.37±15.81	328.04±21.26	1.42±0.27	1.42±0.80	27.76±4.11
中富 1 号	土壤 I	9.59±0.62CD	6.59±0.96BC	6.23±0.55CD	254.76±38.52CD	65.28±0.68BCD	81.21±18.49C	1.16±0.01DE	0.62±0.06BC	7.76±4.97C
	土壤 II	16.78±1.67	8.71±0.05	7.96±1.11	677.08±228.85	94.05±25.76	157.87±21.49	1.76±0.08	0.94±0.22	21.23±3.53
群众杨	土壤 I	7.40±1.09GH	6.72±0.48BCD	5.51±0.29D	135.21±17.28H	39.77±9.13G	51.75±0.90D	1.42±0.14DE	1.12±0.46BC	11.25±5.40BC
	土壤 II	7.55±2.53	6.72±0.14	7.68±1.73	162.58±14.80	38.32±4.72	64.0±10.81	1.43±0.20	0.84±0.16	22.82±6.01
P107	土壤 I	5.76±0.17H	5.34±0.60CDE	6.72±0.69CD	121.46±23.83H	44.89±7.65FG	57.62±13.28D	1.20±0.16E	0.59±0.08C	10.27±2.00C
	土壤 II	5.32±0.44	6.21±2.07	7.26±0.73	179.57±24.13	49.41±6.13	72.11±15.99	1.27±0.22	0.84±0.08	15.30±6.40
丹红杨	土壤 I	8.60±0.79FG	2.06±0.42E	6.72±0.56CD	134.59±22.43H	41.85±1.29FG	41.45±6.79D	1.29±0.21CDE	0.78±0.20BC	7.35±0.73C
	土壤 II	9.62±1.11	5.95±1.99	9.05±2.20	226.70±61.18	56.95±11.47	83.30±46.60	1.82±0.27	1.84±0.52	20.53±2.91
辽胡杨	土壤 I	7.43±0.21FG	5.62±0.53CDE	7.63±0.34CD	146.11±11.65FGH	42.75±8.08FG	61.05±17.50CD	1.46±0.06BCD	0.90±0.13B	16.84±5.51BC
	土壤 II	9.53±0.42	5.89±1.08	8.89±0.95	311.68±0.22	57.31±0.96	80.41±2.87	2.31±0.06	2.18±0.44	22.48±1.61
辽育 3 号	土壤 I	9.62±1.19EFG	4.73±2.19CD	6.21±1.62D	169.37±66.52H	41.80±15.13FG	54.90±2.38D	1.44±0.55DE	0.92±0.41BC	9.99±0.94C
	土壤 II	10.21±0.78	7.69±1.65	6.46±1.01	171.17±18.32	49.27±5.05	77.00±15.84	1.54±0.68	1.63±0.17	19.86±4.78
南林 895	土壤 I	9.74D±0.86EF	7.58±1.48A	7.22±0.67CD	195.73±51.26DEFG	49.67±10.13CD	72.20±17.56CD	1.33±0.06A	1.08±0.10A	10.50±0.48C
	土壤 II	12.61±0.40	16.12±1.71	8.52±0.52	475.86±104.64	93.59±15.18	121.12±9.00	3.47±1.27	4.70±2.48	16.50±0.50
南林 95	土壤 I	7.20±1.90FG	5.29±2.19CDE	8.01±1.80CD	124.11±15.33GH	34.39±4.20G	57.41±6.41CD	1.07±0.03E	0.43±0.01BC	19.77±7.67AB
	土壤 II	10.65±0.96	3.02±4.27	8.99±2.78	290.46±143.55	46.03±1.00	89.53±2.45	1.29±0.21	1.50±0.09	30.72±6.52
三北 1 号	土壤 I	7.73±1.42DEF	4.85±2.44DE	6.59±1.20CD	143.35±21.07EFGH	54.91±15.75EF	71.56±19.73CD	1.73±0.09BCD	1.34±0.51BC	21.08±13.76AB
	土壤 II	14.03±1.05	5.56±0.64	8.44±2.21	392.15±124.64	57.92±12.71	111.46±31.64	2.01±0.05	1.08±0.36	30.53±15.00
品种 Species		**	**	**	**	**	**	**	**	**
处理 Treatment		**	**	**	**	**	**	**	**	**
品种/处理 Species/Treatment		**	**	n.s	**	n.s	n.s	**	**	n.s

注:不同字母表示不同品种之间的差异性显著($P<0.05$);**表示差异极显著($P<0.01$);*表示差异显著($P<0.05$);n.s表示差异不显著。下同。

Note: Different letters mean significant difference among the species ($P<0.05$); ** indicates highly significant difference ($P<0.01$); * indicates significant difference ($P<0.05$); n.s indicates no significant difference. The same below.

较低^[13]。张东为等(2008)研究得出, Cd 胁迫下, 不同杨树品种生物量上存在显著差异, 其中 938-18、盖杨、小胡杨总生物量无显著差异, 辽育系列苗木的生物量受 Cd 污染的影响较明显^[25]。唐凌凌(2010)研究发现, 5 mg·kg⁻¹ Cd 处理对 29 个柳树无性系水培苗生长有明显的抑制, 且无性系间的差异达到极显著水平^[26]。本研究显示, 在 Cd、Zn、Pb 重金属复合污染下, 不同杨

树、柳树品种叶、茎、根生物量和株高存在极显著差异, 其中南林 895 的叶、茎、根生物量显著低于南林 95, 而这两种杨树在正常条件下其 1 年生扦插苗的生物量相当^[27], 这说明重金属胁迫对南林 895 的抑制程度高于南林 95, 与南林 895 体内重金属含量较高有关(见表 3)。61-1 和 795 茎、叶生物量随着土壤重金属含量的增加而显著降低, 2205、928 和三北 1 号没有

表 4 Cd、Zn、Pb 复合污染对杨树、柳树叶、茎、根 Cd、Zn、Pb 总吸收量的影响

Table 4 Effects of Cd, Zn and Pb combined pollution on Cd and Zn and Pb total uptake in leaf, stem and root of poplars and willows

品种 Species	处理 Treatments	Cd 总吸收量/ $\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ Cd Total uptake/ $\mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$			Zn 总吸收量/ $\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ Zn Total uptake/ $\mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$			Pb 总吸收/ $\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ Pb Total uptake/ $\mu\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$		
		叶 Leaf	茎 Stem	根 Root	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root
2205	土壤 I	57.25±34.55DEF	42.67±23.53DEF	12.17±3.73ABC	1 561.05±1 072.93CD	516.38±168.90AB	276.62±101.54ABC	6.77±3.75F	4.56±1.20DE	28.86±20.19ABCD
	土壤 II	102.31±11.40	57.67±24.13	17.63±5.62	3 147.60±780.98	823.25±173.45	459.89±141.97	9.30±2.13	9.13±1.97	46.45±10.72
287	土壤 I	91.77±10.28DEF	82.90±24.79ABCD	19.39±5.37A	2 777.21±1 079.28BC	656.85±48.61AB	364.24±83.07AB	8.19±0.69F	9.04±1.47BCD	49.85±17.36AB
	土壤 II	80.58±29.64	38.32±10.05	19.86±6.35	3 527.84±1 350.72	634.70±159.47	411.81±176.84	8.88±3.60	11.62±6.64	57.00±8.57
61-1	土壤 I	87.85±8.58CDE	31.58±17.97EF	9.83±4.55AB	3 880.43±632.03A	473.12±50.60CD	168.85±68.01ABC	8.24±1.32EF	4.04±0.82E	27.40±0.36AB
	土壤 II	110.51±38.27	32.55±6.03	21.43±7.92	5 328.58±1 775.92	374.60±91.98	485.38±305.08	9.24±2.03	5.02±1.70	75.20±32.82
795	土壤 I	68.63±16.50EF	77.03±9.53AB	8.25±3.04AB	2 888.72±800.10BCD	791.02±167.95A	140.79±55.20ABCD	7.74±0.90EF	9.01±3.24AB	18.49±13.20ABC
	土壤 II	64.79±19.72	86.30±17.27	26.75±6.84	3 234.10±1133.70	783.48±101.74	427.12±153.06	10.28±3.25	15.65±6.89	65.66±4.33
928	土壤 I	42.34±4.01EF	42.76±11.84DEF	8.81±6.17ABC	1 414.49±132.35CD	445.27±117.17BCD	149.01±130.18ABCD	6.57±0.68F	5.07±0.89CDE	11.01±5.11BCDE
	土壤 II	96.07±30.11	30.87±13.53	17.10±4.50	2 628.62±901.76	525.40±227.22	407.36±122.32	8.00±1.60	9.18±4.82	33.85±7.95
中富 1 号	土壤 I	66.54±11.47DEF	55.89±13.38BCDE	25.89±23.63A	1 741.13±76.91CD	576.32±221.12BC	374.45±356.75A	7.98±0.78EF	5.35±1.55DE	40.43±40.88AB
	土壤 II	96.16±9.44	58.28±17.44	20.65±26.57	3 757.28±579.72	577.96±19.63	409.80±527.08	10.29±2.49	5.83±0.42	54.48±70.26
群众杨	土壤 I	89.96±49.91DEF	103.46±19.99A	8.43±4.55BC	1 573.80±653.80D	595.61±56.97BCD	80.20±45.64E	16.73±6.93CDE	17.16±7.18AB	14.59±3.12CDE
	土壤 II	69.76±13.89	64.49±12.93	5.00±2.34	1 555.09±262.31	363.46±56.42	44.14±25.38	13.63±2.23	7.87±0.38	16.24±10.58
P107	土壤 I	103.06±50.98DEF	62.01±16.19ABC	23.88±10.82A	2 077.88±764.67CD	526.70±183.83AB	212.74±126.05ABCDE	20.57±6.68ABC	6.82±2.01BCD	37.52±21.55ABCD
	土壤 II	83.00±10.81	91.34±41.03	16.92±7.33	2 777.96±193.79	712.48±199.01	169.33±84.80	19.89±4.06	11.99±2.52	36.49±23.47
丹红杨	土壤 I	169.56±35.38AB	20.00±5.90DEF	9.26±2.18ABC	2 593.26±351.02BCD	454.71±224.29BCD	54.95±0.53DE	24.82±3.44A	7.39±1.81ABC	10.15±2.53ABCD
	土壤 II	138.33±28.61	51.72±19.50	16.97±6.29	3 164.48±264.39	496.69±109.82	141.19±40.84	25.90±3.88	16.00±4.63	40.65±22.02
辽胡杨	土壤 I	59.32±23.37EF	33.16±9.98DEF	2.40±1.67C	1 011.34±344.00D	243.02±51.37DE	22.21±17.85E	10.63±4.72DEF	5.80±2.89BCD	6.27±5.13DE
	土壤 II	66.40±3.77	38.95±6.18	4.63±1.09	2 169.25±26.54	380.37±3.37	42.90±12.93	16.09±0.23	14.56±3.29	11.85±3.18
辽育 3 号	土壤 I	127.24±12.68BC	50.28±23.91ABC	20.06±7.79AB	2 167.62±421.33CD	482.87±312.25BC	175.24±31.38BCDE	18.45±3.56ABC	9.17±1.42A	31.76±5.64ABCD
	土壤 II	139.70±32.58	101.99±23.44	15.39±2.33	2 381.25±754.54	659.12±121.48	185.26±47.95	23.22±16.17	22.10±5.91	47.73±13.26
南林 895	土壤 I	53.65±4.73F	20.33±3.59F	4.12±2.39C	1 081.18±302.56CD	134.85±36.72E	39.22±17.24E	7.35±0.38DEF	2.95±0.57DE	5.76±2.64E
	土壤 II	62.32±5.39	39.91±1.75	2.99±0.37	2 398.70±797.65	229.69±3.08	44.90±9.70	17.70±8.33	10.90±4.48	5.89±1.25
南林 95	土壤 I	148.35±61.18A	82.16±46.37A	23.92±17.09AB	2 519.77±703.67AB	505.58±157.46BC	161.42±105.32CDE	21.42±3.92AB	6.17±1.32AB	64.01±50.70A
	土壤 II	205.62±58.06	32.45±45.89	13.28±8.34	5 897.94±3 831.89	648.21±164.51	170.84±132.21	25.20±8.82	20.66±3.63	48.73±36.88
三北 1 号	土壤 I	59.10±9.22CD	47.78±28.08CDEF	15.67±1.53ABC	1 124.20±322.22BCD	514.90±63.93BC	168.54±24.56CDE	13.49±2.89BCD	13.09±5.77AB	48.12±25.45AB
	土壤 II	160.17±43.12	63.54±9.40	13.59±3.63	4 554.86±2247.49	655.89±105.93	179.86±53.22	22.76±4.61	12.20±3.40	48.77±23.69
品种 Species		**	**	**	**	**	**	**	**	**
处理 Treatments		**	n.s	n.s	**	*	*	**	**	**
品种/处理 Species/Treatments		*	**	n.s	n.s	n.s	n.s	n.s	**	n.s

降低,反有增加,这说明重金属污染对 61-1 和 795 的生长抑制较强,而对 2205、928 和三北 1 号的生长稍有促进,61-1 和 795 体内重金属含量较高是其生长受抑制的主要原因(见表 5)。综上,重金属污染对供试杨树、柳树品种的生长抑制存在显著差异,重金属耐性较弱的南林 895、61-1、795 器官中重金属含量最高。

3.2 Cd、Zn、Pb 复合污染对杨树和柳树重金属富集能力的影响

杨树、柳树对重金属具有很强的富集能力和修复潜能,主要体现在三个方面:(1)地上和地下部富集重

金属的能力较强,其中 Cd 含量超过对照植物的 10 倍以上;(2)地上部富集能力大于地下部;(3)生物量大^[9,18-19,25]。不同的杨树、柳树品种在富集重金属方面存在显著差异^[17]。本研究显示,Cd、Zn、Pb 复合污染下,不同杨树、柳树品种叶、茎、根 Cd、Zn、Pb 含量和总吸收量,及 TF 和 BCF 之间均存在显著差异。柳树品种 61-1 和 795 叶、茎、根 Cd、Zn、Pb 的含量均较高,而 2205 和中富 1 号 3 种重金属含量均较低;杨树品种南林 895 除根 Pb 含量较低外,其他各器官中 Cd、Zn、Pb 的含量在供选杨树品种均最高,P107、丹红杨和南林 95 各器官中 3 种重金属含量均较低。与器

表 5 Cd、Zn、Pb 复合污染对杨树、柳树转运系数(TF)和生物富集系数(BCF)的影响
Table 5 Effects of Cd,Zn and Pb combined pollution on transportation factor(TF) and bioaccumulation coefficient(BCF) of poplars and willows

品种 Species	处理 Treatment	TF			BCF		
		Cd	Zn	Pb	Cd	Zn	Pb
2205	土壤 I	1.1338±0.6579BCD	1.1032±0.5252DE	0.0695±0.0365CDE	1.7259±0.5035BCDE	0.3641±0.1173B	0.0026±0.0002EFG
	土壤 II	1.3317±0.1317	1.2809±0.2738	0.0577±0.0077	0.6649±0.0753	0.1798±0.0242	0.0011±0.0000
287	土壤 I	1.1488±0.3054DE	1.1626±0.2531DE	0.0470±0.0204E	2.2681±0.2317B	0.4301±0.0932B	0.0028±0.0002DEFG
	土壤 II	0.6680±0.0273	1.1900±0.4411	0.0379±0.0126	0.5637±0.0969	0.2106±0.0140	0.0014±0.0005
61-1	土壤 I	1.4447±0.4255A	3.0206±0.7671A	0.0516±0.0209DE	2.3862±0.3685A	0.8491±0.1030A	0.0031±0.0004BCD
	土壤 II	1.9622±0.1809	4.0805±1.6549	0.0598±0.0240	1.3010±0.3497	0.5656±0.1618	0.0019±0.0005
795	土壤 I	1.0188±0.1406CDE	1.5222±0.4616CDE	0.0646±0.0335CDE	1.9283±0.2224BC	0.4639±0.0570B	0.0027±0.0003BCDE
	土壤 II	0.9871±0.3280	1.7320±0.7841	0.0655±0.0155	0.7798±0.0538	0.2254±0.0470	0.0020±0.0004
928	土壤 I	0.8180±0.2420E	1.2868±0.6745E	0.0806±0.0184CDE	1.7313±0.1737BCDE	0.3802±0.1019B	0.0030±0.0006DEFG
	土壤 II	0.7541±0.1463	0.7814±0.1227	0.0508±0.0094	0.6622±0.1246	0.1766±0.0163	0.0013±0.0003
中富 1 号	土壤 I	1.2647±0.0399AB	2.0099±0.8682BC	0.1693±0.1460BC	1.7445±0.0995BCD	0.3291±0.0663B	0.0024±0.0002FG
	土壤 II	1.5807±0.0906	2.2925±0.5645	0.0621±0.0058	0.7961±0.0668	0.2566±0.0962	0.0012±0.0001
群众杨	土壤 I	1.2978±0.1226BCDE	1.5402±0.3591CDE	0.1362±0.0726BCDE	1.5807±0.1065DEF	0.1713±0.0373C	0.0035±0.0007CDEF
	土壤 II	0.9373±0.0543	1.6059±0.3353	0.0531±0.0203	0.4537±0.0818	0.0697±0.0055	0.0011±0.0001
P107	土壤 I	0.8391±0.1345E	1.6251±0.4426CDE	0.0935±0.0114BCDE	1.2369±0.0648F	0.1935±0.0202C	0.0026±0.0002FG
	土壤 II	0.8030±0.1045	1.6701±0.2820	0.0823±0.0467	0.3694±0.0489	0.0815±0.0067	0.0010±0.0001
丹红杨	土壤 I	0.9575±0.2297CDE	2.4770±0.0976BC	0.1520±0.0476B	1.4076±0.2186EF	0.2217±0.0414C	0.0030±0.0007BCD
	土壤 II	0.9585±0.3447	2.1518±0.5907	0.0900±0.0183	0.5198±0.0905	0.1138±0.0373	0.0017±0.0002
辽胡杨	土壤 I	0.9241±0.1052DE	1.6511±0.3484BCD	0.0790±0.0328BCDE	1.5641±0.1934DEF	0.2088±0.0205C	0.0034±0.0003BC
	土壤 II	0.8720±0.0055	2.3329±0.0483	0.1011±0.0182	0.4926±0.0494	0.1300±0.0019	0.0021±0.0002
辽育 3 号	土壤 I	1.2327±0.3255BC	2.0132±0.3748BCDE	0.1193±0.0412BCD	1.6249±0.2252CDE	0.2390±0.0526C	0.0033±0.0009BCD
	土壤 II	1.3911±0.2830	1.4725±0.2444	0.0811±0.0026	0.5631±0.0731	0.0774±0.0127	0.0015±0.0004
南林 895	土壤 I	1.2552±0.1047AB	2.1274±0.7876B	0.1196±0.0107A	2.0009±0.0896B	0.3178±0.0772B	0.0035±0.0002A
	土壤 II	1.6216±0.1963	2.8833±0.6141	0.2321±0.0090	0.8744±0.0520	0.2403±0.0428	0.0036±0.0001
南林 95	土壤 I	0.8751±0.4548CDE	1.5379±0.3451BCDE	0.0455±0.0197DE	1.4342±0.4447DEF	0.1871±0.0212C	0.0022±0.0000G
	土壤 II	1.0542±0.4056	2.0996±0.9633	0.0464±0.0118	0.5553±0.0348	0.1293±0.0562	0.0013±0.0001
三北 1 号	土壤 I	0.9668±0.3810BCDE	1.3696±0.3275BCDE	0.0919±0.0533BCDE	1.3646±0.4179DEF	0.2023±0.0089C	0.0042±0.0007B
	土壤 II	1.2064±0.2929	2.2125±1.1228	0.0620±0.0370	0.6203±0.0168	0.1552±0.0460	0.0015±0.0002
品种 Species		**	**	**	**	**	**
处理 Treatments		n.s	n.s	n.s	**	**	**
品种/处理 Species/Treatments		n.s	n.s	**	n.s	*	**

官中重金属含量相比,其重金属总吸收量的变化有所不同,各器官中重金属含量较高的柳树品种 61-1,其重金属的总吸收量在供试柳树品种中也最高;而各器官中重金属含量较高的南林 895,其总吸收量却较低,重金属含量较低的南林 95,其总吸收量却较高。这表明供试的 14 个杨树、柳树品种在富集重金属方面确实存在差异,其中柳树品种 61-1 在器官重金属含量和总吸收量上均达到供试柳树品种最大值,是比较理想的柳树修复材料;而杨树品种南林 95 虽然器官重金属含量较低,但其生物量较高,导致其总吸收

量较高,是比较理想的杨树修复材料。

供试杨树、柳树品种 Cd 和 Zn 的 TF 大都接近或大于 1,器官中重金属含量较高的杨树、柳树品种 61-1 和南林 895,其 TF 和 BCF 也较高;相反,器官中重金属含量较低的杨树、柳树品种南林 95、P107、2205 和中富 1 号,其 TF 和 BCF 也较低(表 5)。这表明,供试的杨树、柳树品种具有较高的 TF 和 BCF,适合重金属 Cd 和 Zn 的植物萃取,特别是重金属吸收和转运能力强的杨树、柳树品种 61-1 和南林 895。

除了茎和根 Cd 的总吸收量在两种污染土壤上没

有显著差异外,供试杨树、柳树品种各器官的重金属含量及总吸收量均随着土壤中重金属浓度的增加而显著增加,相反,其BCF却随着污染浓度的增加而显著降低。这说明供试的杨树、柳树品种器官中重金属含量及总吸收量与土壤重金属含量呈正相关;随着重金属污染浓度的增加,杨树、柳树从土壤中吸收重金属的比例下降,但把重金属转运到地上部的能力没有明显变化,Dos Santos Utmazian等(2007)也得出相同的结论^[18]。

4 结论

(1)重金属污染对供试杨树、柳树品种的生长抑制存在显著差异,重金属耐性较弱的南林895、61-1、795器官中重金属含量较高。

(2)杨树、柳树品种在重金属富集方面存在显著差异,其中61-1和南林95器官中重金属总吸收量较高,是重金属污染土壤理想的修复材料。

(3)杨树、柳树品种具有较高的TF和BCF,适合重金属Cd和Zn的植物萃取,特别是萃取能力强的61-1和南林895;BCF随着土壤重金属浓度增加显著下降,而TF变化不明显。

参考文献:

- [1] 魏树和,周启星. 重金属污染土壤植物修复基本原理及强化措施探讨[J]. 生态学杂志, 2004, 23(1): 65-72.
WEI S H, ZHOU Q X. Discussion on basic principles and strengthening measures for phytoremediation of soils contaminated by heavy metals[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(1): 65-72.
- [2] 王晓蓉,郭红岩,林仁漳,等. 污染土壤修复中应关注的几个问题[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(2): 277-280.
WANG X R, GUO H Y, LIN R Z, et al. Issues in need of consideration for remediation of contaminated soils[J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2006, 25(2): 277-280.
- [3] 屈冉,孟伟,李俊生,等. 土壤重金属污染的植物修复[J]. 生态学杂志, 2008, 27(4): 626-631.
QU R, MENG W, LI J S, et al. Research progress on phytoremediation of heavy metal contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(4): 626-631.
- [4] 刘小梅,吴启堂,李秉滔. 超富集植物治理重金属污染土壤研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5): 636-640.
LIU X M, WU Q T, LI B T. Phytoremediation of heavy metal contaminated soil by hyper-accumulators: A review of researches in China and abroad[J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2003, 22(5): 636-640.
- [5] 韦朝阳,陈同斌. 重金属污染植物修复技术的研究与应用现状[J]. 地球科学进展, 2002, 17(6): 833-839.
WEI C Y, CHEN T B. A preview on the status of research and application of heavy metal phytoremediation[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(6): 833-839.
- [6] Sebastiani L, Scebbba F, Tognetti R. Heavy metal accumulation and growth responses in poplar clones Eridano (*Populus deltoides* × *maximowiczii*) and I-214 (*P. xeuramericana*) exposed to industrial waste [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2004, 52: 79-88.
- [7] 韦秀文,姚斌,刘慧文,等. 重金属及有机物污染土壤的树木修复研究进展[J]. 林业科学, 2011, 47(5): 124-128.
WEI X W, YAO B, LIU H W, et al. Application of dendroremediation to the soil contaminated soil by heavy metals and organic pollutants [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(5): 124-128.
- [8] Wieshammer G, Unterbrunner R, García 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(1-2): 255-264.
- [9] Wang R G, Dai S X, Tang S R, et al. Growth, gas exchange, root morphology and cadmium uptake responses of poplars and willows grown on cadmium contaminated soil to elevated CO₂ [J]. *Environmental Earth Science*, 2012, 67: 1-13.
- [10] Christel B, Kruse J, Zimmer D, et al. Spatial distribution of arsenic and heavy metals in willow roots from a contaminated floodplain soil measured by X-ray fluorescence spectroscopy [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409: 4094-4100.
- [11] Wahsha M, Bini C, Argege E, et al. Heavy metals accumulation in willows growing on spolic technosols from the abandoned imperina valley mine in Italy [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2012, doi: 10.1016/j.gexplo. 2012. 07. 004.
- [12] Migeon A, Richaud P, Guinet F, et al. Metal accumulation by woody species on contaminated sites in the North of France [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2009, 204(1-4): 89-101.
- [13] 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*, 2006, 148: 155-165.
- [14] Robinson B, Fernandez J E, Madejon P, et al. Phytoextraction: An assessment of biogeochemical and economic viability [J]. *Plant and Soil*, 2003, 249: 117-125.
- [15] Castiglione S, Todeschini V, Franchin C, et al. Clonal differences in survival capacity, copper and zinc accumulation, and correlation with leaf polyamine levels in poplar: A large-scale field trial on heavily polluted soil [J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157: 2108-2117.
- [16] Fischerová Z, Tlustoš P, Száková J, et al. A comparison of phytoremediation capability of selected plant species for given trace elements [J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144: 93-100.
- [17] Zacchini M, Pietrini F, Mugnozza G S, et al. Metal tolerance, accumulation and translocation in poplar and willow clones treated with cadmium in hydroponics [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2009, 197: 23-34.
- [18] Dos Santos Utmazian M N, Wenzel W W. Cadmium and zinc accumulation in willow and poplar species grown on polluted soils [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2007, 170, 265-272.

- [19] 王 新, 贾永锋. 杨树、落叶松对土壤重金属的吸收及修复研究[J]. 生态环境, 2007, 16(2):432-436.
- WANG X, JIA Y F. Study on absorption and remediation by poplar and larch in soil contaminated with heavy metals[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(2):432-436.
- [20] 汪有良, 王保松, 韩杰峰, 等. 水培柳树插条对重金属镉的反应研究[J]. 江苏林业科技, 2005, 32(6):1-7.
- WANG Y L, WANG B S, HAN J F, et al. Effect of cadmium(Cd^{2+}) on the development of cuttings of 4 arbor willow clones under water culture[J]. *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology*, 2005, 32(6):1-7.
- [21] 汪有良, 王保松, 施士争, 等. 乔木型柳树无性系镉积累特性研究[J]. 江苏林业科技, 2008, 35(2):1-4.
- WANG Y L, WANG B S, SHI S Z, et al. Cadmium absorption characters of arbor willow (*Salix* sp.) in solution culture [J]. *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology*, 2008, 35(2):1-4.
- [22] 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.
- LU R K. Analytical methods of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: Agriculture Science and technology Press of China, 2000.
- [23] Wei S H, Zhou Q X, Saha U K, et al. Identification of a Cd accumulator *Conyza canadensis*[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 163:32-35.
- [24] Lindsay WL, Norvell WA. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1978, 42:421-428.
- [25] 张东为, 崔建国, 戈素芬, 等. 土壤镉污染对不同品种杨树生长状况的影响[J]. 水土保持通报, 2008, 28(3):59-64.
- ZHANG D W, CUI J G, GE S F, et al. Effect of Cd contamination in soil on growth of poplar of different varieties[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(3):59-64.
- [26] 唐凌凌. 重金属胁迫对柳树无性系生长和生理的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2010.
- TANG L L. Effect of heavy metal stress on growth and physiology of clones of *salix*×*Jiangsuensis*[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2010.
- [27] 张跃虎, 刘 刚. 杨树新品种南林 95 杨、895 杨繁育技术[J]. 中国林副特产, 2003, 4:38-39.
- ZHANG Y H, LIU G. The micropropagation and breeding of new *Poplar cultivars* Nanlin 95 and 895[J]. *Quarterly of Forest By-Product and Speciality in China*, 2003, 4:38-39.