

孙小艳,辛在军,刘淑娟,等.不同中国鹅掌楸种源对镉吸收分配特性研究[J].江西农业大学学报,2020,42(6): 1285-1291.



不同中国鹅掌楸种源对镉吸收分配特性研究

孙小艳¹,辛在军¹,刘淑娟²,李晓晖¹,刘建平^{2*}

(1.江西省流域生态研究所 江西省重金属污染生态修复工程技术研究中心,江西 南昌 330096;2.江西省科学院 生物资源研究所,江西 南昌 330096)

摘要:【目的】基于鹅掌楸属植物对重金属污染土壤的修复潜力,研究不同中国鹅掌楸种源根系、茎干、叶片对镉的吸收、转运特性,筛选耐镉能力强、吸收累积镉浓度最高的中国鹅掌楸品种,为镉污染土壤的植物修复提供参考。【方法】在水培条件下,比较7个中国鹅掌楸种源(分别来自云南金平YNJP、云南麻栗坡YNMLP、云南河口YNHK、贵州剑河GZJH、贵州松桃GZST、贵州道真GZDZ、浙江遂昌ZJSC)植株对重金属元素镉的受损伤表型,在镉浓度为10 mg/L条件下,取胁迫15 d后测定根、茎、叶中的镉浓度,计算Cd²⁺的吸收、转运系数。【结果】镉对中国鹅掌楸不同种源植株的伤害存在显著差异,利用镉胁迫指数评价其受伤害的程度由大到小依次为GZDZ、YNJP、YNHK、YNMLP、ZJSC、GZJH和GZST。中国鹅掌楸种源植株中的Cd²⁺主要富集在根系中,根系中镉浓度范围为87.09~387.54 mg/kg,茎干镉浓度范围为25.60~71.09 mg/kg,叶片镉浓度范围为5.12~55.94 mg/kg,其中,YNHK和YNJP种源植株对镉的吸收富集能力较强,根茎叶中的镉浓度显著高于其他种源。所有种源镉转运系数均小于1,GZST种源转运系数最高(0.58),但同样来源贵州地区的GZDZ(0.28)和GZJH(0.25)等种源转运系数相对较低。【结论】7个中国鹅掌楸种源主要将吸收的镉固定在根系中,向地上部分的转移较少;GZST种源对镉抗性较强,且地上部分转运富集Cd²⁺能力最大。

关键词:中国鹅掌楸;种源;镉累积;转运系数

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1000-2286(2020)06-1285-07

Characteristics of Cadmium Absorption and Distribution in different provenances of *Liriodendron chinense*

SUN Xiao-yan¹, XIN Zai-jun¹, LIU Shu-juan², LI Xiao-hui¹, LIU Jian-ping^{2*}

(1. Jiangxi Engineering and Technology Research Center for Ecological Remediation of Heavy Metal Pollution, Institute of Watershed Ecology of Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096, China; 2. Institute of Biology and Resources, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096, China)

Abstract: [Objective] Based on the phytoremediation potential of *Liriodendron* on heavy metal contami-

收稿日期:2020-05-27 修回日期:2020-07-21

基金项目:国家自然科学基金项目(31760166)、江西省青年基金资助项目(20172ACB21069)、江西省重点研发计划项目(20171BBG70047)和江西省科学院重点研发项目(2018-YZD1-04)

Project supported by National Natural Science Foundation of China(31760166), Jiangxi Province Natural Science Foundation of China(20172ACB21069), the Key Research and Development Program of Jiangxi Province(20171BBG70047) and the Science and Technology Program of Jiangxi Academy of Sciences(2018-YZD1-04)

作者简介:孙小艳, orcid.org/0000-0001-5144-7126, xiaoyan_sun05@163.com, *通信作者:刘建平,副研究员,博士,主要从事植物化学及污染土壤生态修复研究, orcid.org/0000-0003-3282-8104, 82678452@qq.com。

nated soil, to select the provenances with strong Cd tolerance and highest Cd^{2+} concentration in seedlings, the characteristics of Cd^{2+} absorption and distribution in roots, stems, and leaves in 7 provenances of *Liriodendron chinese* were investigated, which could provide a basis for phytoremediation of Cd polluted soil. [Method] The damaged phenotypes were assessed, the Cd concentrations in roots, stems, and leaves in 7 provenances of *Liriodendron Chinese* were detected after 15 d of exposure to 10 mg/L CdCl_2 under hydroponic condition, and the contribution rates of cadmium transportation in different tissues were calculated. [Result] The seedlings from different provenances exhibited significant difference in the injured phenotypic characteristics, and the order of the degrees of Cd injured indexes was: GZDZ > YNJP > YNHN > YNMLP > ZJSC > GZJH > GZST. Cd was mainly accumulated in the roots of the seedlings with a range from 87.09 mg/kg to 387.54 mg/kg. The Cd concentration in the stems was detected at a range from 25.60 mg/kg to 71.09 mg/kg, and the range of Cd concentration in the leaves was from 5.12 mg/kg to 55.94 mg/kg. The seedlings from YNHN and YNJP showed higher cadmium accumulation than those from other provenances. The transport coefficients of Cd^{2+} of all the provenances were less than 1, which indicated that less Cd was transferred from the root to the aboveground parts (stem and leaf). [Conclusion] Cadmium was mainly enriched in the roots in the 7 provenances of *Liriodendron chinese*, and less in leaves. Furthermore, the seedlings from GZST provenance had the highest transport coefficient and the lightest phenotypic damaged characteristics, which could be used to reduce the cadmium content and restore Cd polluted soil.

Keywords: *Liriodendron chinese*; provenance; cadmium accumulation; translocation coefficient

【研究意义】重金属污染是目前世界关注的严重环境问题之一,其中,镉(Cd)因其在土壤中较强的化学活性极易通过食物链的生物放大对人类健康带来潜在危害,被认为是生物毒性最强也最危险的重金属之一^[1]。因此,开展重金属污染土壤防控与修复,通过植物修复技术缓解、抑制镉的毒性通过植物进入食物链成为环境和生物领域的研究热点,引起人们广泛关注。其中,木本植物对重金属具有较强的耐性和一定的固定、吸收、累积能力,且发达的深根系可使土壤中重金属移动性降低,降低其迁移和生物毒性,改善土壤质量等特征,引起研究人员的广泛关注^[2-3]。所以,筛选富集重金属镉、生长迅速、生物量大的林木品种,开展树木修复^[4],在重金属污染土壤生态修复中表现出巨大的潜力。【前人研究进展】目前,国内外研究人员对不同林木种类或品种耐镉性能及相关机制,镉吸收累积特征等进行了深入研究,选育出大量重金属抗性强、生物量高、对镉具有富集能力的林木树种^[5-8]。Robinson等^[9]研究发现杨树不仅可以降解有机污染物,对重金属也具有较高的耐性和累积性,结合螯合剂(如EDTA、NTA、DTPA等)的施用,可以大大提高 Cd^{2+} 在土壤中的去除率。Laureysens等^[10]研究表明,速生杨对镉、铅、镍等多种重金属也表现出较好的耐性,地上叶片对镉具有较强的富集能力。而且,大量研究发现植物的镉耐性及其在不同组织器官的累积和分布,存在种、品种、无性系间的差异^[11-12]。【本研究切入点】中国鹅掌楸(*Liriodendron chinese*)是我国重要的园林绿化和用材树种,具有生长迅速、生物量大、观赏性好等优点。而且,鹅掌楸树种材质细软,不易干裂变形,广泛用于家具制造,所以,利用鹅掌楸属植物强大根系对土壤中重金属进行修复,可以兼具美化环境、提高经济效益等多重功效。课题组自2014年开始对我国自然分布区的中国马褂木资源进行种质收集,采集了来自云南、贵州、福建、浙江、四川、广西等7个省份35个种源的中国鹅掌楸材料。利用中国鹅掌楸丰富的遗传变异,挖掘中国鹅掌楸种源对重金属镉的修复潜力,对重金属污染土壤生态修复的可持续发展具有重要意义。【拟解决的关键问题】本项目选出7个种源材料开展水培镉胁迫实验,根据预实验结果,选择镉胁迫浓度为10 mg/kg,评估不同种源植株对镉胁迫的表型伤害响应指数,研究根茎叶等器官对 Cd^{2+} 吸收分配特征差异,以期对 Cd^{2+} 污染土壤的林木修复提供参考,并为深入研究鹅掌楸属植物对 Cd^{2+} 的抗逆解毒机制提供基础数据。

1 材料与方

1.1 实验材料

供试的7个中国鹅掌楸材料分别来自云南金平(YNJP)、云南麻栗坡(YNMLP)、云南河口(YNHK)、贵州剑河(GZJH)、贵州松桃(GZST)、贵州道真(GZDZ)、浙江遂昌(ZJSC)等地种源,所有材料取自江西省科学院黄马种质基地,每个种源选择生长较好、高度较一致的中国鹅掌楸2年生实生苗,除去原土,将中国鹅掌楸幼苗转移至30 cm×19 cm×13 cm的水培箱,每盆4株,每个种源8株,随机区组分布,根茎部用海绵固定,每个水培箱设置气泵补充氧气。实验在江西省科学院培养室中进行,预培养和处理时温室温度保持25~27℃,光照强度200 μmol/(m²·s),14 h光照/10 h黑暗,相对湿度70%~90%,预培养7 d后进行镉处理。

1.2 实验处理

以CdCl₂配制镉胁迫母液,镉浓度为10 mg/L,为避免其他矿质营养元素影响,配置Cd处理母液和水培箱中使用去离子水。处理15 d后,将每株植株根系、茎干、叶片分别取样,用去离子水配置的20 mmol/L EDTA·Na₂溶液浸泡植株根系20 min,以去除吸附在根系表面的镉离子,再用去离子水冲洗干净,吸干水分后装入牛皮信封,105℃杀青30 min,75℃烘干至恒质量,测定不同器官的质量。

1.3 胁迫指数评价

参考Xie等^[13]对镉胁迫植物采用的9分制表型质量评估方法,对镉胁迫下中国鹅掌楸种源受损害程度进行目测评估,植株胁迫程度评估内容主要包括:叶片黄化程度、叶片脱落、顶端萎蔫程度等。0分为植物叶片全部黄化、脱落、顶端萎蔫、无生机的植株,6分为植株部分黄化、50%叶片未脱落、顶端部分萎蔫的植株,9分为叶片保持绿色、叶片90%未脱落、基本无枯黄,顶端有生机的植株。

1.4 植株镉含量检测

取烘干后的植物组织研磨成均匀粉末,准确称取叶片0.200 g灰化40 min,茎干和根系分别取0.200 g灰化60 min,将灰化好的材料转移至消煮管中,加入10 mL HNO₃-HClO₄(V:V=4:1),控温消煮至澄清,继续在150℃加热消煮,直至溶液无色透明。定容后用原子吸收分光光谱法测定植株中的镉浓度。

1.5 统计分析

利用SPSS 20.0进行数据统计分析,用Duncan's多重比较进行差异性检验($P<0.05$)。中国鹅掌楸重金属转移系数的计算方法参照张晓丽等^[14],如下:

$$C_A = (C_1 \times m_1 + C_2 \times m_2) / (m_1 + m_2) \quad (1)$$

$$C_B = C_3 \quad (2)$$

$$T = C_A / C_B \quad (3)$$

式中:1,2,3分别代表叶片、茎干、根系, C_A 为植物地上部镉的浓度(mg/kg), C_B 为地下部分的镉浓度(mg/kg), C_1, C_2, C_3 为叶片、茎干、根系镉的浓度(mg/kg), m_1, m_2 为叶片和茎干的干物质质量, T 为地上部分转运系数。

2 结果与分析

2.1 镉胁迫下的形态特征变化

在镉胁迫下,中国鹅掌楸不同种源呈现不同程度的受损伤症状(图1)。镉胁迫初期,中国鹅掌楸形态未发生明显的受损伤症状,在5~7 d后,部分种源的茎下部老叶开始黄化并掉落,随后嫩叶开始黄化、萎蔫、脱落,15 d后,GZST和GZJH种源老叶脱离,但大部分叶片保持绿色,维持生长,表现出对镉胁迫较高的耐性;ZJSC种源耐镉能力次之;YNJP、GZDZ种源对镉胁迫非常敏感,根系发黑,根系伸长生长停止,地上部的叶片已基本全部脱离。利用镉胁迫指数评价中国鹅掌楸镉胁迫受伤害的程度由大到小依次为:GZDZ、YNJP、YNHK、YNMLP、ZJSC、GZJH和GZST。

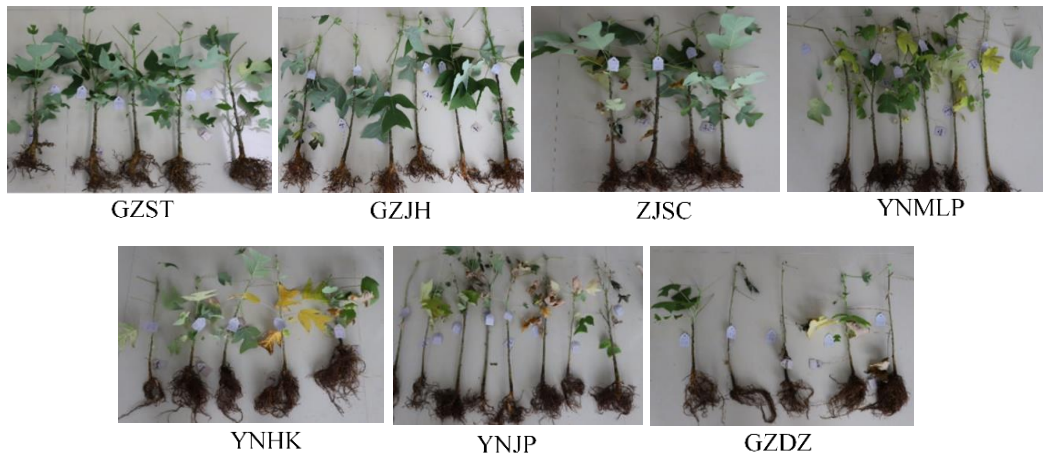


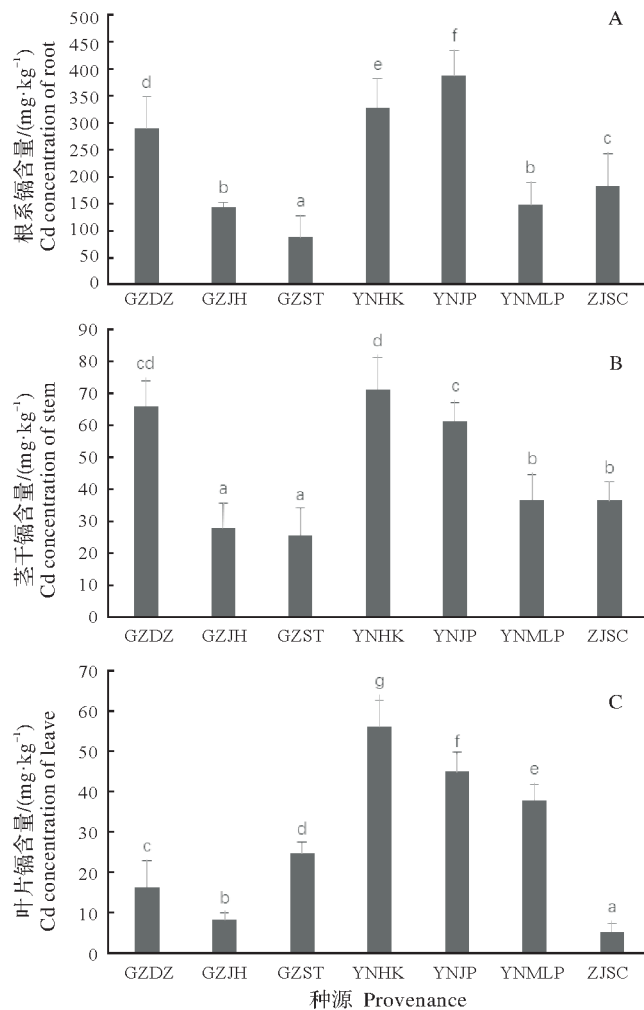
图 1 镉胁迫对中国鹅掌楸植株形态特征的影响

Fig.1 Effect on morphological traits of *Liriodendron chinese* seedlings under Cd^{2+} stress

2.2 处理 15 d 后不同器官中镉含量差异

处理 15 d 后,检测各中国鹅掌楸种源植株不同部位的镉浓度,发现 Cd^{2+} 主要富集在根系中,地下部分的镉向地上部分的转运相对少,中国鹅掌楸植株中镉累积量的大小排序为根、茎、叶。处理 15 d 后,不同种源植株不同组织器官对镉的吸收累积存在较大差异,单株根系检测的镉浓度范围为 87.09~387.54 mg/kg (图 2-A),茎干检测的镉浓度范围为 25.60~71.09 mg/kg (图 2-B),叶片检测的镉浓度范围为 5.12~55.94 mg/kg (图 2-C)。

由图 2 可知,YNJP 种源根系中镉浓度最大,显著高于其他种源($P<0.05$);GZST 种源根系和茎干的镉浓度最低,分别为 87.09 mg/kg 和 25.60 mg/kg ,显著低于其他中国马褂木种源($P<0.05$),叶片中的镉浓度 24.62 mg/kg 。YNHK 种源植株根系镉浓度显著低于 YNJP 种源,但显著高于其他种源,而且 YNHK 种源植株茎干和叶片中镉浓度也显著高于其他种源,说明 YNHK 种源对镉的吸收富集能力较高。ZJSC 种源根系和茎干镉浓度较高,分别为 183.04 mg/kg ,36.42 mg/kg ,但叶片中的镉浓度最低(5.12 mg/kg)。从结果发现,来源云南地区的 3 个种源对镉的吸收均相对较高,根系中吸收镉浓度较高的种源,其植株叶片中的镉浓度也相对较高;但来源贵州地区的 3 个中国鹅掌楸种源呈现较复杂的镉吸收、转运特征,根系中镉含量与叶片的镉含量呈一定的负相关效应,说明来源贵州的鹅掌楸种源与云南的鹅掌楸通过不同的途径或通道吸收、转运 Cd^{2+} 。



图中数值为平均值±标准误。各柱形上不同小写字母表示同一种源在镉胁迫不同时间点之间差异显著($P<0.05$)

Values in the figures are means±SE. Values with the different letters mean significantly different at $P<0.05$ among different provenance

图 2 不同中国鹅掌楸种源根茎叶中镉含量

Fig.2 Cd concentration in root, stem, and leaf of different provenance

2.3 中国鹅掌楸不同器官对镉转运特征

转运系数是地上部元素质量分数与地下部元素质量分数之比,表示镉从根部转运、分配到地上部位的能力,转运系数越高,表明镉从根部转运到地上部位的能力越强。各中国鹅掌楸种源对镉的转运系数结果表示(表 1),供试的中国鹅掌楸对镉的转运系数均小于 1,表明中国鹅掌楸不是镉富集植物。其中,转运系数最大的是 GZST(0.58),其次是 YNMLP(0.51);最小的是 ZJSC 和 GZJH,转运系数分别为 0.23 和 0.25。

7 个中国鹅掌楸种源对镉的转运存在差异,地上部分的叶片和茎干对 Cd²⁺的转运贡献率也存在较大差异。叶片贡献率最大的为 YNMLP,达到 50.88 %;最小的是 ZJSC,只有 12.34 %,所以 ZJSC 茎干贡献率最大。

表 1 7 个中国鹅掌楸种源对镉的转运系数
Table 1 Transfer coefficient of 7 provenances of *Liriodendron chinese*

种源编号 Code	转运系数 Transfer coefficient	地上各部分贡献率/% Rate of contribution	
		叶片 Leaf	茎干 Stem
GZDZ	0.28	19.78	80.22
GZJH	0.25	22.62	77.38
GZST	0.58	49.03	50.97
YNHK	0.39	44.04	55.96
YNJP	0.27	42.26	57.74
YNMLP	0.51	50.88	49.12
ZJSC	0.23	12.34	87.66

3 结论与讨论

鹅掌楸属植物是重要的园林绿化树种,观赏性强,生长迅速,根系发达,在矿区废弃地表现出较好的生态适应性^[4,15]。不同植物种源、家系、无性系、品种等具有的独特的形态结构和生理代谢特征,都直接导致其对重金属耐性和吸收转运富集特征的差异^[16-17]。在本研究中,镉胁迫 7 d 时,中国鹅掌楸对 10 mg/kg Cd 胁迫的响应损伤不显著;但在胁迫后期,中国鹅掌楸不同种源的耐受表现出现显著的差异,GZDZ、YNJP、YNHK 等种源叶片黄化、脱落、顶端萎蔫,而 GZJH、GZST 等种源生长未收到显著损害,说明 GZJH、GZST 等种源的中国鹅掌楸可用于重度镉污染土壤修复。

植物对重金属的富集和转运能力是评级植物提取效果的重要指标,与根系吸收及根系重金属向地上部分转运能力密切相关^[18]。在本研究中,7 个中国鹅掌楸种源吸收的镉主要富集于根系,其次是茎干,叶片中累积的镉浓度最少,根系镉浓度远高于地上部分,转运系数均小于 1,没有达到超富集植物要求,说明中国鹅掌楸根系吸收 Cd²⁺后进行固定和区隔化,导致只有少部分的 Cd²⁺能够通过木质部导管运输至地上部分^[19]。张志权等^[20]发现豆科植物银合欢(*Leucaena leucocephala*)能够在银锌尾矿定居,吸收的银大多积累于根系、树皮、树干等部位,只有少部分积累于叶片。但在 5.0 mg/kg 镉胁迫 40 d 后,乔木型柳树杂种无性系大多数大部分叶片镉含量高于枝条的镉含量,且叶片和枝条的镉浓度存在显著相关性^[21]。Utmazian 和 Wenzel 等^[22]在镉重度污染土壤筛选获得 6 种叶片镉累积浓度高于根系的柳树品种。这些研究表明,不同植物、同一植物不同种源、不同品种、不同基因型对重金属镉具有不同的吸收、转运模式。这种结果可能与镉在不同植株体内的存在形态与存在部位存在一定相关性。杨卫东等^[11]研究表明,旱柳根系中的镉主要存在于细胞壁和可溶性部分,质体等含量较少,而叶片中主要存在于细胞壁和叶绿体中,可溶性部分含量较少。张晓丽等^[14]发现柳树无性系叶片、枝条和树皮对镉向地上部转运的贡献率不同,27 个柳树无性系中蒿柳根富集 Cd 浓度最大,Cd²⁺主要被固定在根中,以减少其对自身其他器官的伤害。

在本研究,中国马褂木种源的转运系数和叶片对转运系数的贡献率与受镉胁迫后的叶片损伤程度存在一定对应关系,如GZJH、ZJSC等种源的镉转运系数和叶片对转运系数的贡献率均相对相低,叶片对镉吸收富集较少,叶片受损伤程度较低;YNJP地上部分转运系数相对较低,但叶片镉贡献率较高,叶片受镉胁迫的表型损害较明显。此外,GZDZ地上部分转运系数相对较低,叶片镉浓度也相对较低,但其受损伤较高;GZST转运系数较高,且叶片镉浓度贡献率也较高,但叶片伤害的表现不显著,这些结果表明中国鹅掌楸不同种源对镉的吸收、转运机制存在差异,对镉的耐性响应机理可能也存在较大差异。来源GZST种源的中国鹅掌楸植株转运系数高于其他种源,其地上部叶片对镉的吸收累积能力较强,对镉胁迫的耐性最强,不仅可用于重金属镉污染土壤的绿化修复,还可通过收集冬季叶片逐渐减少土壤中的镉含量。

总之,本研究结果表明,7个中国鹅掌楸种源应答镉胁迫的表型伤害反应差异较大,且不同种源根茎叶中镉的吸收转运特征也存在较大差异,研究为进一步研究中国鹅掌楸种源对镉的耐性和解毒机制提供了实验基础和理论参考。

参考文献:

- [1] 骆永明,滕应,过园.土壤修复-新兴的土壤科学分支学科[J].土壤,2005,37(3):230-235.
Luo Y M, Teng Y, Guo Y. Soil remediation-a new branch discipline of soil science[J]. Soil, 2005, 37(3): 230-235.
- [2] 杨园,王艮梅.杨树对镉胁迫的响应及抗性机制研究进展[J].世界林业研究,2017,30(4):29-34.
Yang Y, Wang G M. Poplar response to Cd stress and its resistance mechanism[J]. World Forestry Research, 2017, 30(4): 29-34.
- [3] 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(1-4): 23-34.
- [4] Sherameti I, Varma A. [Soil Biology] Detoxification of heavy metals volume 30 || functional significance of metal ligands in hyperaccumulating plants: what do we know? [M]. Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [5] Berndes G, Fredrikson F, Borjesson P. Cadmium accumulation and Salix-based phytoextraction on arable land in Sweden[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2004, 103(1): 207-223.
- [6] Ismail S, Khan F, Iqbal A M Z. Phytoremediation: assessing tolerance of tree species against heavy metal (Pb and Cd) toxicity[J]. Pakistan Journal of Botany, 2013, 45(6): 2181-2186.
- [7] Watson C, Pulford I D, Riddell-Black 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.
- [8] Trakal L, Kodesová R, Komárek M. Modelling of Cd, Cu, Pb and Zn transport in metal contaminated soil and their uptake by willow (*Salix × smithiana*) using HYDRUS-2D program[J]. Plant and Soil, 2013, 366(1/2): 433-451.
- [9] Robinson B H, Mills T M, Petit D, et al. Natural and induced cadmium-accumulation in poplar and willow: implications for phytoremediation[J]. Plant & Soil, 2000, 227(1/2): 301-306.
- [10] Laureysens I, Blust R, Temmerman L D, et al. Clonal variation in heavy metal accumulation and biomass production in a poplar coppice culture: I. Seasonal variation in leaf, wood and bark concentrations[J]. Environmental Pollution, 2004, 131(3): 490-494.
- [11] 杨卫东,陈益泰.不同杞柳品种对镉(Cd)吸收与忍耐的差异[J].林业科学研究,2008,21(6):857-861.
Yang W D, Chen Y T. Differences in uptake and tolerance to Cadmium in varieties of *Salix integra* [J]. Forest Research, 2008, 21(6): 857-861.
- [12] Iori V, Pietrini F, Massacci A, et al. Morphophysiological responses, heavy metal accumulation and phytoremoval ability in four willow clones exposed to cadmium under hydroponics[J]. Phytoremediation, 2014(1): 87-98.
- [13] Xie Y, Luo H, Hu L, et al. Classification of genetic variation for cadmium tolerance in Bermudagrass [*Cynodon dactylon* (L.) Pers.] using physiological traits and molecular markers[J]. Ecotoxicology, 2014, 23(6): 1030-1045.
- [14] 张晓丽,翟飞飞,李伟,等.27个柳树无性系对镉的吸收分配特性[J].林业科学,2017,53(4):9-17.

- Zhang X L, Zhai F F, Li W, et al. Characteristics of cadmium absorption and distribution in 27 willow clones[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2017, 53(4): 9-17.
- [15] Kelly J M, Parker G R, Mc Fee W W. Heavy metal accumulation and growth of seedlings of five forest species as influenced by soil cadmium level[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1979, 8(3): 361.
- [16] He J, Ma C, Ma Y, et al. Cadmium tolerance in six poplar species[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(1): 163-174.
- [17] Pietrini F, Zacchini M, Iori V, et al. Screening of poplar clones for cadmium phytoremediation using photosynthesis, biomass and cadmium content analyses[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2009, 12(1): 105-120.
- [18] 吴照祥, 孙小艳, 刘腾云, 等. 中、轻度污染农田杂交水稻对 Cd 的吸收和累积分布[J]. *江西农业大学学报*, 2019, 41(3): 423-430.
- Wu Z X, Sun X Y, Liu T Y, et al. Cd accumulation, distribution and transport in varieties of hybrid rice grown in medium to low Cd-polluted farmland[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2019, 41(3): 423-430.
- [19] 李欣忱, 李桃, 徐卫红, 等. 不同辣椒品种镉吸收与转运的差异[J]. *中国蔬菜*, 2017, 9: 32-36.
- Li X Z, Li T, Xu W H, et al. Differences between cadmium uptake and translocation among different pepper varieties[J]. *China Vegetables*, 2017, 9: 32-36.
- [20] 张志权, 蓝崇钰, 束文圣, 等. 土壤种子库与矿业废弃地植被恢复研究: 定居植物对重金属的吸收和再分配[J]. *植物生态学报*, 2001, 25(3): 306-311.
- Zhang Z Q, Lan C Y, Shu W S, et al. Uptake and translocation of heavy metals in dominant plants of soil seed banks introduced to a lead/zinc mine tailings pond[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2001, 25(3): 306-311.
- [21] 汪有良, 王保松, 施士争. 乔木型柳树杂种无性系对镉的吸收和积累特性[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2011, 35(2): 135-138.
- Wang Y L, Wang B S, Shi S Z. Research on cadmium absorption characters of arbor willows[J]. *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Science Edition)*, 2011, 35(2): 135-138.
- [22] Utmazian M N D S, Wenzel W W. Cadmium and zinc accumulation in willow and poplar species grown on polluted soils[J]. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 2007, 170(2): 265-272.