

潘雨齐, 黄仁志, 雷 鸣, 等. 镉在桑树体内的迁移与分布特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8):1480-1487.

PAN Yu-qi, HUANG Ren-zhi, LEI-Ming, et al. Transportation and distribution of Cd in different varieties of mulberry (*Moms alba* L.)[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8):1480-1487.

镉在桑树体内的迁移与分布特征研究

潘雨齐¹, 黄仁志², 雷 鸣^{1*}, 颜新培², 龚 昕², 蒋诗梦², 贾超华²

(1.湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 2.湖南省蚕桑科学研究所, 长沙 410127)

摘要:为研究品种和种植密度对桑树吸收土壤镉及在其体内运转规律的影响,选择湖南邵阳洞口和岳阳临湘两地的重金属污染区为研究区,按照不同种植密度(15 000、30 000、45 000 株·hm⁻²)种植三个品种桑树(粤桑 11 号、农桑 14 号和强桑 1 号),并对桑树植株中镉的含量与分布进行分析。结果表明:两个污染区的土壤受到镉的重度污染,其中岳阳临湘污染区土壤中重金属的潜在风险高于邵阳洞口污染区;在试验设置的种植密度范围内,桑树地上部(茎、枝、叶)镉含量随着种植密度的增加而升高,高密度的种植方式有利于提高桑树对镉污染土壤的修复效率;在整个桑树植株中,根部镉的平均含量约占总量的 40%,茎部和枝部镉的平均含量约占 44%,叶片镉的平均含量约占 16%;土壤 Cd 污染程度的增加提升了桑树根向上运输 Cd 的能力,桑树在洞口试验区根-茎、根-枝、根-叶的转运系数分别为 0.37~0.46、0.38~0.51、0.37~0.49,临湘试验区分别为 0.50~0.83、0.42~0.61、0.54~0.64。研究进一步表明,桑树可种植于重金属污染的土壤。

关键词:土壤污染;镉;桑树;品种;种植密度

中图分类号:X503.235 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)08-1480-08 doi:10.11654/jaes.2015-1725

Transportation and distribution of Cd in different varieties of mulberry(*Moms alba* L.)

PAN Yu-qi¹, HUANG Ren-zhi², LEI Ming^{1*}, YAN Xin-pei², GONG Xin², JIANG Shi-meng², JIA Chao-hua²

(1.College of Resources and Environment, Changsha 410128, China; 2.The Sericultural Research Institute of Hunan Province, Changsha 410127, China)

Abstract: Mulberry (*Moms alba* L.) has potential to be used as phytoremediating plant. In this study, three varieties of mulberry (called Yuesang 11, Nongsang 14, and Qiangsang 1) were planted at three planting densities in two heavy metal-contaminated fields named Dongkou in Shaoyang City and Linxiang in Yueyang City in Hunan Province, respectively. The transport, accumulation and distribution of cadmium in the plants were studied. Results showed that both soils were contaminated by heavy metals, especially by Cd. The potential risks of heavy metals in Linxiang soil were higher than those in Dongkou soil. The content of Cd in the aboveground (stem, branch and leaf) of mulberry increased with increasing planting density, implying that high density planting method improved the remediation efficiency of Cd contaminated soil. In the whole mulberry plant, the average Cd content in mulberry roots accounted for about 40% of the total, Cd in stems and branches contributed to about 44%, and Cd in leaves only about 16%. Increased soil Cd pollution promoted mulberry roots to transport Cd. The translocation factors of root-stem, root-branch, and root-leaf of mulberry in Dongkou soil were 0.37~0.46, 0.38~0.51 and 0.37~0.49, while 0.50~0.83, 0.42~0.61, 0.54~0.64 in Linxiang, respectively. Therefore, mulberry can be planted for remediating heavy metals contaminated soils.

Keywords: soil contamination; cadmium; mulberry; variety; planting density

收稿日期:2015-12-29

基金项目:湖南省教育厅重点项目(14A068);湖南省科技计划项目(2013SK5036);湖南省环境保护厅科技计划项目(湘财建指[2013]229号)

作者简介:潘雨齐(1990—),女,湖南长沙人,硕士研究生,从事重金属污染修复与治理研究。E-mail:59157432@qq.com

* 通信作者:雷 鸣 E-mail:leiming8297@163.com

目前我国正面临着相当严峻的土壤重金属污染问题。调查表明,湖南省被重金属污染的耕地面积高达 71.52 万 hm^2 , 占全省耕地总面积的 23.7%^[1]。土壤中过量的重金属抑制植物的生长, 造成作物减产甚至绝收, 而重金属还能通过食物链严重危害人体健康^[2-4], 因此土壤重金属污染修复是环境科学研究的热点。在不同的修复技术中, 植物修复技术以其特有的优势而被人们青睐。但是, 由于普通植物生物量小且不具备经济价值而难以推广, 人们开始关注用经济作物修复土壤污染^[5-9](经济作物是指具有某种特定经济用途的农作物), 尤其是用不被人摄入体内的、宜于集中进行专门化生产经济作物治理环境污染可以达到修复和获利两全其美的效果。

桑树(*Morus alba* L.), 属桑科桑属。桑树的适应能力非常强, 抗盐碱、耐瘠薄, 对土壤酸碱度适应性强, 在 pH 4.5~9.0、土壤含盐量 0.2% 的条件下都能生长。桑树能保水固土防沙, 成片桑树林的保水保土能力优于其他树种和植被^[10]。桑树对于重金属有较强的耐性, 唐翠明等^[11]研究表明, 种植在大宝山矿区周边重金属污染农田的桑树, 重金属污染程度不影响桑树的生长, 且桑叶产量达到正常水平。谭勇壁^[12]调查表明, 桑树在 Pb、Zn、As 含量分别高达 734、1194、53 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的污染土壤上仍然可以正常生长发育, 并且在外观上没有表现出明显的受胁迫现象。此外, 蚕桑产业是公认的生态循环产业, 湖南蚕桑发展具有较强的区域特色, 历史悠久, 2004 年省政府已将蚕桑产业列入湖南省八大特色农产品发展规划。因此, 以种植桑树发展蚕桑产业来对重金属污染、尤其对中度以上重金属污染的耕地进行治理和产业结构调整, 一方面可以较大地降低政府对重金属污染土壤治理投入, 引导农民参与修复治理; 另一方面, 在修复过程中, 可增加农民收入, 具有良好的经济效益。目前, 重金属对桑树生理特性、蚕桑产量及品质的影响有较多研究^[13-17], 但关于品种、种植密度对桑树体内重金属的迁移影响

及其对污染农田修复效果报道较少。本研究分别在湖南邵阳洞口和岳阳临湘两个重金属污染区土壤种植 3 个桑树品种, 同时结合不同种植密度, 研究桑树对土壤 Cd 的吸收与分布, 以期利用桑树修复重金属污染土壤开拓新思路, 为构建“边修复边创效”的经济生态模式提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 土壤样品

试验田分别位于湖南邵阳洞口某污染区(简称洞口)和岳阳临湘某污染区(简称临湘)。洞口位于 $26^{\circ}51'38''\sim 27^{\circ}22'23''\text{N}$ 、 $110^{\circ}8'40''\sim 110^{\circ}57'10''\text{E}$ 之间, 属亚热带季风气候, 年均气温 16.6°C , 年日照百分率为 32%, 全年无霜期 290 d 左右, 年平均降水量 1491 mm, 洞口污染区位于洞口县宝湾村铁锰成矿区, 该区域是洞口县重要的铁、锰、钨矿开采区。临湘位于 $29^{\circ}10'\sim 29^{\circ}52'\text{N}$ 、 $113^{\circ}15'\sim 113^{\circ}45'\text{E}$ 之间, 年平均气温 16.4°C , 无霜期 259 d, 日照率 41%, 降水量 1469.1 mm, 临湘污染区位于临湘县忠防镇渔潭村桃林铅锌矿采矿场。现场调查表明, 两个污染区农田土壤由于受到重金属严重污染, 已经无法利用而废弃, 杂草丛生。在种植桑树之前, 按照梅花型采样法分别在两个污染区采集 5 个表层土壤(0~20 cm)样品并设置位置标记, 土壤经自然风干后, 磨细过 100 目尼龙筛, 存储于密封袋内备用。两污染区土壤均为红壤, 土壤基本理化性质和重金属含量见表 1。

1.1.2 桑树品种

(1) 粤桑 11 号(简称粤桑-11), 选育单位为广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 为多倍体杂交品种, 树形稍开展, 群体整齐, 枝条直, 发条数多, 再生能力强, 耐剪伐。产量高, 叶质好, 发芽早, 群体整齐, 叶大而厚^[18]。

(2) 农桑 14 号(简称农桑-14), 选育单位为浙江

表 1 污染区土壤基本理化性质和重金属含量

Table 1 Basic physicochemical properties and content of heavy metals of soil

污染区	pH	有机质含量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	总氮含量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	碱解氮/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Cd 含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Pb 含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Cu 含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Zn 含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
洞口	7.31±0.26	17.80±1.10	0.98±0.09	67.22±3.41	5.87±0.62	77.28±2.08	4.78±0.35	72.29±9.81	20.0±5.10	124.1±33.92
临湘	6.88±0.19	20.97±2.37	0.85±0.12	58.04±2.99	13.26±1.22	106.17±4.64	8.88±1.88	181.23±51.94	32.5±7.30	286.4±21.14
土壤环境二 级标准(GB 15618— 1995)							0.30	300.00	100.00	250.00

省农业科学院蚕桑研究所,早生中熟丰产品种,属鲁桑系。其形直立稍开展,发条数多,枝条粗长而直,无侧枝,开雄花,花穗均较多,产叶量 $2700 \text{ kg} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$,属于农桑系列的高产、高抗品种^[19]。

(3)强桑1号(简称强桑-1),选育单位为浙江省农业科学院蚕桑研究所,产叶量高、抗逆性较强的优良桑树品种。其树形直立,树冠紧凑,枝条粗长,侧枝少,产量超高,抗旱,耐寒,秋叶硬化晚,生长期长^[20]。

1.2 试验设计

在湖南邵阳洞口和岳阳临湘选择重金属污染农田作为试验区,洞口试验区面积为 $24.8 \text{ m} \times 25.6 \text{ m}$,临湘试验区面积为 $23.5 \text{ m} \times 31.6 \text{ m}$ 。于2013年2月15日前翻耕土地,旋耕2次。四周挖好排水沟,排水沟深不低于 40 cm ,对排水不畅的田块中间增加排水沟,确保田块内无积水。按 1 m 的行距挖栽植沟,沟宽深 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$,覆土 10 cm ,留 $5 \sim 10 \text{ cm}$ 沟深栽植桑树。3个桑树品种均按照3种密度即 $15\ 000$ 、 $30\ 000$ 、 $45\ 000 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 种植,每个品种10次平行。全年施肥2次,分别是春季施尿素 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,夏季施复合肥 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。在桑树生长过程中,为避免交通及其他因素的影响,在试验田四周设置保护行。

1.3 样品采集

2013年10月,在每个试验区按照不同桑树品种随机选取三株桑树平行样(共54株),桑树样品采集后,用自来水洗净泥土,并分为根、茎、枝、叶等4部分置于 $103 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱内杀青1h,调至 $65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘至恒重后,称取并记录其各部位干重(表2),然后用植物粉碎机粉碎植物样品后,装入密封袋保存待用。同时分别在两个试验田使用不锈钢铲采集桑树相应生长土壤表层 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 处的土壤,自然风干,碾磨,过 100 目筛后贮存。

1.4 分析测定

采用pH计(水土比为 $2.5:1$)^[21]测定土壤pH值。土壤重金属采用王水($\text{HNO}_3:\text{HCl}=3:1$)+高氯酸消化法消煮,同时用土壤国家标准参比物质(GSS-5)和空白样进行分析质量控制。土壤重金属元素含量采用电感耦合等

离子体发射光谱仪(ICP-OES iptima 8300 Perkinelmer)测定。桑树样品(根、茎、枝、叶)采用 HNO_3 消煮,用原子吸收分光光度计-石墨炉法(GTA120,美国 Varian)测定植株中Cd含量。

1.5 数据处理方法

本研究数据处理与差异分析采用 Excel 2003 和 SPSS 12.0。

1.6 土壤重金属潜在生态风险评价

按照 Hakanson^[22]潜在生态危害指数法定量划分出潜在生态危害的程度,该指数不仅反映了某一特定环境中每种污染物的影响,而且也反映了多种污染物的综合影响。污染土壤中污染物的潜在风险参数和潜在生态危害指数法按下式可表示为:

$$F_i = \frac{C_i}{C_e} \quad (1)$$

$$E_i = T_i \times F_i \quad (2)$$

$$RI = \sum_{i=1}^4 E_i \quad (3)$$

式中: F_i 为污染因子; C_i 为其污染物实测平均含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_e 为某污染物参比值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,本研究以国家土壤环境质量标准(GB15618—1995,二级)为参比值,如表1所示; E_i 为潜在风险参数($E_i < 40$ 为低潜在生态风险, $40 \leq E_i < 80$ 为中潜在生态风险, $80 \leq E_i < 160$ 为较高潜在生态风险, $160 \leq E_i < 320$ 为高潜在生态风险, $E_i \geq 320$ 为很高潜在生态风险^[22]); T_i 为单个污染物毒性响应参数,Cd、Cu、Zn和Pb的毒性响应参数分别为 30 、 5 、 1 和 5 ^[22]。

RI 为潜在生态风险指数: $RI < 150$,表示低潜在生态风险; $150 \leq RI < 300$,表示中潜在生态风险; $300 \leq RI < 600$,表示较高生态风险; $RI \geq 600$,表示很高潜在生态风险^[22]。

1.7 桑树对Cd的转运系数

重金属对植物的毒害是因为它被植物吸收并向植株地上部运输^[23],研究Cd在桑树体内的转运特征有助于探究Cd在桑树体内的分布规律,为降低桑树体内Cd的毒害提供科学依据。在本研究中以转运系

表2 试验区单株桑树各部位平均干重

Table 2 Average dry weights of mulberry

试验区	根/ $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$	茎/ $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$	枝/ $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$	叶/ $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$
洞口	802.44±31.36a	1 097.03±51.47a	1 035.36±36.95a	1 334.20±83.53a
临湘	834.39±42.32b	1 049.43±31.85b	1 072.47±20.10b	1 282.64±71.59a

注:同列具有相同小写字母的数据间无显著性差异($P > 0.05$)。

Note: The same lowercase letters within a column indicate no significant differences ($P > 0.05$).

数代表植物根向地上部运输重金属元素的能力^[24],本试验中转运系数 T1、T2、T3 分别表示茎与根、枝与根、叶与根中 Cd 含量之比。公式如下:

转运系数(T1、T2、T3)=桑树地上部分(茎、枝和叶)中 Cd 的平均含量(mg·kg⁻¹)/桑树根中 Cd 的平均含量(mg·kg⁻¹)

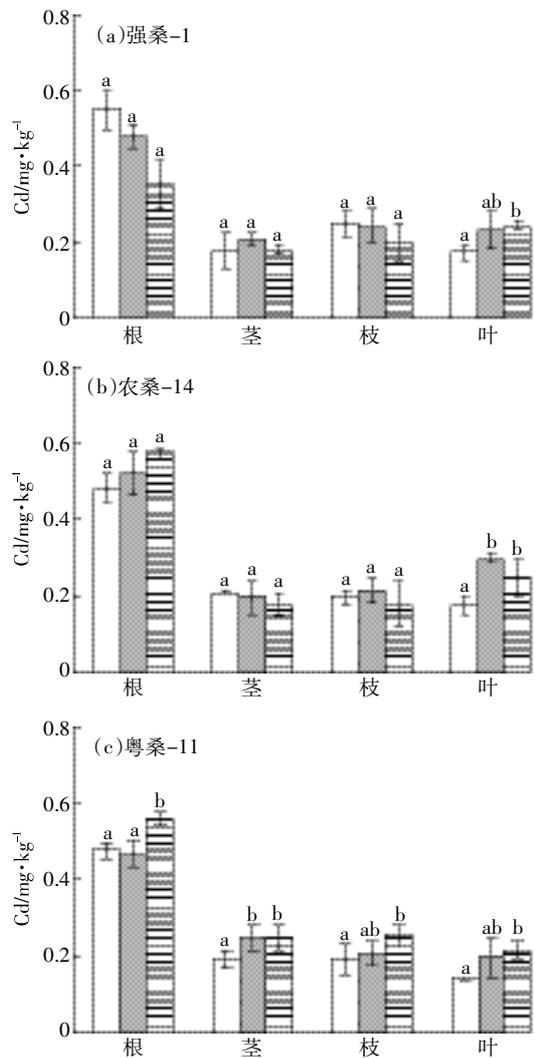
2 结果与讨论

2.1 土壤重金属潜在生态风险评价

邵阳洞口与岳阳临湘两个试验区重金属 Cd、Cu、Zn、Pb 含量如表 1 所示。两个污染区土壤中重金属 Cu、Zn、Pb 的含量都低于国家土壤环境质量标准(GB15618—1995),但是Cd的含量明显高于土壤标准限量值(0.3 mg·kg⁻¹);就两个试验区相比,岳阳临湘试验区土壤中重金属 Cd、Cu、Zn、Pb 含量明显高于邵阳洞口试验区。根据公式(1)、(2)和(3),两个试验区土壤中 Cd、Cu、Zn、Pb 潜在风险参数和潜在生态风险指数计算结果见表 3。可以看出,两个试验区土壤中 Cd 潜在风险参数最高,属于很高潜在生态风险。这不仅与其土壤中含量高有关,也与其毒性响应参数较高有关,而其他元素均属于低潜在生态风险。岳阳临湘试验区土壤中 Cd 的潜在生态风险参数明显高于邵阳洞口试验区,也明显高于雷鸣等^[25](Cd 的潜在生态风险参数为 99)的报道。

2.2 洞口试验区桑树体内 Cd 含量与分布

洞口试验区桑树体内 Cd 含量与分布如图 1 所示。图 1(a)中,当种植密度从 15 000 株·hm⁻² 增加至 45 000 株·hm⁻², 强桑-1 根部 Cd 含量减少, 叶部 Cd 含量增加, 茎部与枝部 Cd 含量无显著性差异($P>0.05$)。从图 1(b)中发现, 种植密度的变化对农桑-14 根部、茎部和枝部 Cd 含量影响不大, 三个部位 Cd 含量差异不显著, 而叶部 Cd 含量随着种植密度的增加而升高。图 1(c)中, 随着种植密度的增加, 粤桑-11 根部、茎部、枝部和叶部 Cd 含量均有升高趋势。研究表明, 种植密度也会影响植物对重金属污染土壤的修复效果, 如刘玲等^[26]在研究种植密度对 Cd、Zn 污染土壤



同一部位具有相同字母的数据间无显著性差异($P>0.05$)。下同
The same lowercase letters within a part of mulberry indicate no significant differences($P>0.05$). The same below

□15 000 株·hm⁻² ■30 000 株·hm⁻² ▨45 000 株·hm⁻²
图 1 洞口试验区不同种植密度下桑树体内 Cd 含量分布
Figure 1 Cadmium content in Qiangsang 1, Nongsang 14 and Yuesang 11 under different planting pattern condition in Dongkou area

伴矿景天植物修复效率的影响时发现, 适宜的密度种植伴矿景天有利于增大植株地上部 Cd、Zn 吸收量, 从而缩短修复时限, 但鲁雁伟等^[27]认为对于不同品种的苕麻, 高密度的种植方式减少了苕麻单株地上部 Pb、As 的含量。对于桑树而言, 不同的种植密度会影响桑树对重金属的吸收能力与迁移能力, 同时还会影响其桑叶产量以及蚕茧质量^[28]。在洞口试验区, 高密度的种植方式增加了桑树地上部(茎、枝、叶)Cd 的含量, 表明在重金属污染区按照高密度种植模式种植桑树有利于其吸收重金属。

表 3 试验区土壤重金属的潜在生态风险评价

Table 3 Assessment of potential ecological risks of heavy metals in both contaminated soils

采样地点	潜在生态风险参数 E_i				潜在生态风险指数 RI	潜在生态风险程度
	Cd	Pb	Cu	Zn		
洞口	478.00	1.20	1.00	0.50	480.7	较高
临湘	888.00	3.02	1.63	1.15	893.8	很高

2.3 临湘试验区桑树体内 Cd 含量与分布

临湘试验区桑树体内 Cd 含量与分布如图 2 所示。从图 2(a)可知,当种植密度从 15 000 株·hm⁻² 增加至 45 000 株·hm⁻², 强桑-1 茎部与叶部 Cd 含量升高,根部与枝部 Cd 含量无显著性差异($P>0.05$)。由图 2(b)中发现,农桑-14 根部、茎部和枝部 Cd 含量在种植密度增加后无明显变化,叶部 Cd 含量在种植密度为 30 000 株·hm⁻² 时最高。而图 2(c)表明,随着种植密度增加,粤桑-11 根部和叶部 Cd 含量升高,茎部和枝部 Cd 含量无显著性差异。

比较图 1 和图 2 可发现,在整个桑树植株中,根部 Cd 的平均含量约占总量的 40%, 茎部和枝部 Cd

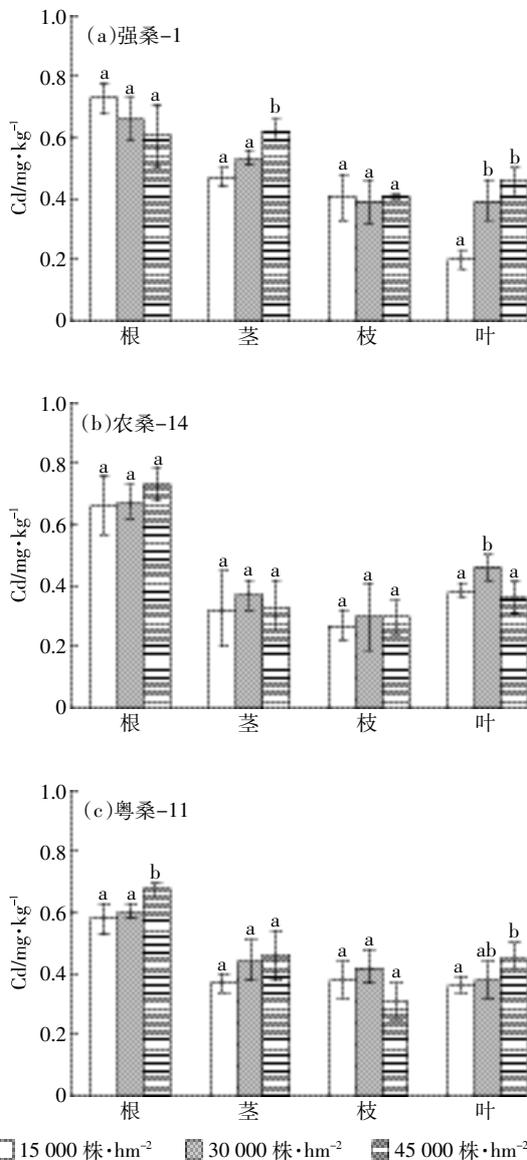


图 2 临湘试验区不同种植密度下桑树体内 Cd 含量分布
Figure 2 Cd content in Qiangsang 1, Nongsang 14 and Yuesang 11 under different planting pattern condition in Linxiang area

的平均含量约占总量的 44%, 叶片 Cd 的平均含量相对较少, 约占总量的 16%。不同品种桑树体内 Cd 的分布呈现不同规律, 其原因可能是桑树品种的差异以及温度、湿度、土壤污染程度等环境因素的影响, 如张兴等^[14]研究表明, 重金属复合污染下桑树体内 Cd 含量的分布趋势为根>叶>皮>骨, 而陈朝明等^[29]认为 Cd 单一污染下桑树 Cd 分布为须根>主根>主茎>叶片>分枝。桑树在临湘试验区(土壤 Cd 含量为 8.88 mg·kg⁻¹)能够正常生长, 说明桑树对 Cd 有较强的耐性。陈朝明等^[15]还发现, 当土壤中 Cd 含量 ≤ 40.6 mg·kg⁻¹ 时, 桑树生长正常或基本正常, 桑叶品质受 Cd 影响不大, 且用桑叶喂养的家蚕生长发育及产出蚕茧的质量均正常。

2.4 Cd 在桑树体内的转运特征

试验区桑树对 Cd 转运系数见图 3。桑树在洞口试验区 T1、T2、T3 分别为 0.37~0.46、0.38~0.51、0.37~0.49, 临湘试验区 T1、T2、T3 分别为 0.50~0.83、0.42~0.61、0.54~0.64。从图 3 可以看出: 临湘试验区桑树对 Cd 的转移系数均大于洞口试验区, 说明土壤 Cd 污染程度的增加提升了桑树根向上运输 Cd 的能力; 强桑-1 的 T2、T3 高于农桑-14 和粤桑-11, 即在洞口试验区强桑-1 中 Cd 从根部转移到枝、叶部能力最强;

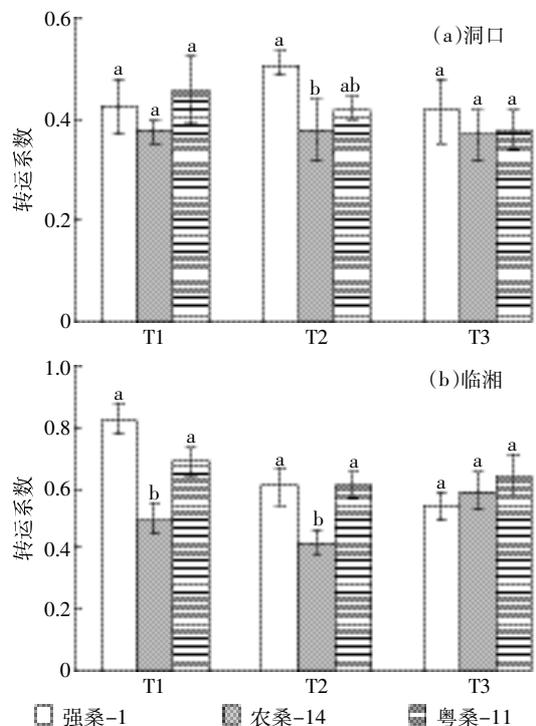


图 3 洞口试验区和临湘试验区桑树对 Cd 的转运系数
Figure 3 Translocation factor of Cd in mulberry in Dongkou area and Linxiang area

临湘试验区三个品种的T1、T2差异显著($P<0.05$),而T3差异不显著,说明在该区品种差异对桑树从根部到叶部运输Cd的能力影响不大;同一品种的T1、T2、T3存在一定差异,但有的差异不明显(如洞口试验区的农桑-14)。不同地区不同品种对Cd的转运系数有所不同,一方面是因为本研究在大田试验条件下进行,不可控因素较多,以往也有研究表明植物的生长情况以及对重金属元素的吸收、积累和转运在大田试验条件和室内模拟试验(盆栽或水培试验)条件下具有一定的差异^[30-32];另一方面供试土壤属于矿区重金属复合污染土壤,成分复杂,各重金属间存在较为复杂的交互作用,有研究表明复合污染土壤中重金属在土壤-植物系统中的迁移积累比单一污染要复杂得多,重金属种类多少以及浓度高低对其在植物体内的积累均有一定影响^[33]。

2.5 桑树对土壤Cd的吸收效果

为进一步了解桑树品种及种植密度对桑树吸收Cd总质量的影响,分别计算两个试验区在不同种植密度下单株桑树体内Cd的积累总量($\text{mg}\cdot\text{株}^{-1}$),其值为单株桑树不同部位Cd平均质量的总和。由图4可以看出,强桑-1体内Cd积累总量存在非显著性差异,其原因可能是种植密度的增加促进了强桑-1叶

部对Cd的吸收但抑制了其根部对Cd的吸收,两者均衡导致桑树体内Cd的总质量变化不明显;农桑-14和粤桑-11体内Cd积累总量随着种植密度的增加而升高。对比图4(a)和图4(b)发现,临湘试验区单株桑树体内Cd积累总量明显高于洞口试验区,说明土壤Cd污染程度增加促进了桑树对Cd的积累。陈朝明等^[29]研究发现,土壤Cd浓度增加后桑树吸收的Cd在根部积累的比例明显升高。这也是桑树体内Cd积累总量升高的重要原因。张兴等^[14]研究表明,桑树对Cd污染土壤的修复年限为1.26年,故在Cd污染区种植桑树可较好较快地修复矿区受污染土壤,在获得生态效应的同时可获得一定的经济效益,提高人们改善生态环境的积极性。

3 结论

(1)通过对邵阳洞口和岳阳临湘两个污染区土壤重金属含量分析与评价,发现土壤中Cd的含量明显高于土壤环境质量标准值($0.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),且两个污染区土壤中Cd的潜在风险程度很高。

(2)在重金属污染区按照高密度种植模式种植桑树有利于桑树吸收重金属。在整个桑树植株中,根部Cd的平均含量约占总量的40%,茎部和枝部约占总量的44%,叶片相对较少,约占总量的16%。

(3)土壤Cd污染程度的增加提升了桑树根向上运输Cd的能力,桑树在洞口试验区根-茎、根-枝、根-叶的转运系数分别为0.37~0.46、0.38~0.51、0.37~0.49,临湘试验区分别为0.50~0.83、0.42~0.61、0.54~0.64。

(4)经济植物桑树能够种植在重金属污染土壤上,但是桑树叶子中Cd的含量是否影响养蚕,还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 何长顺,黄道友,刘国胜. 湖南省土壤重金属污染现状及治理对策探讨[C]. 全国土壤污染控制修复与盐土改良技术交流会, 2006. HE Chang-shun, HUANG Dao-you, LIU Guo-sheng. The status and protection strategy of Hunan soils polluted by heavy metals[C]. Remediation of soil pollution control and soil improvement technology meeting in China, 2006.
- [2] 刘爱中,邹冬生,刘飞. 龙须草对Cd的耐受性和富集特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(2):473-480. LIU Ai-zhong, ZOU Dong-sheng, LIU Fei. Cadmium tolerance and enrichment characteristics of *Eulaliopsis binata*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(2):473-480.
- [3] 廖柏寒,刘俊,周航,等. Cd胁迫对大豆各发育阶段生长及生理指标的影响[J]. 中国环境科学, 2010, 30(11):1516-1521.

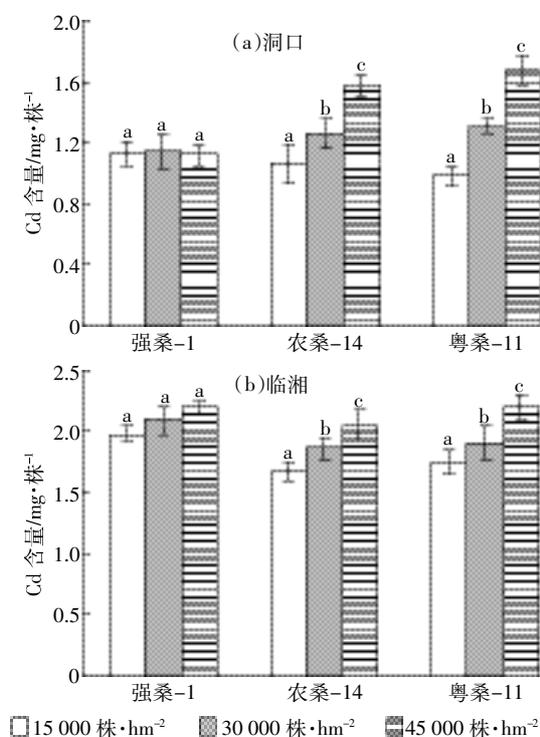


图4 洞口试验区与临湘试验区单株桑树Cd总量

Figure 4 Cadmium content in mulberry in Dongkou area and Linxiang area

- LIAO Bo-han, LIU Jun, ZHOU Hang, et al. Effects of Cd stress on physiological and ecological indicators and their differences of soybean plants and different growth stages[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(11):1516-1521.
- [4] 高家合, 王树会. 镉胁迫对烤烟生长及生理特性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(5):1167-1170.
GAO Jia-he, WANG Shu-hui. Effects of cadmium stress on the growth and physiological characteristics of flue-cured tobacco[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5):1167-1170.
- [5] 徐宁, 俞燕芳, 毛平生, 等. 桑树修复土壤重金属污染的研究进展[J]. *农学学报*, 2015, 5(1):37-40.
XU Ning, YU Yan-fang, MAO Ping-sheng, et al. Research progress of remedying the heavy metal contaminated soils with mulberry[J]. *Journal of Agriculture*, 2015, 5(1):37-40.
- [6] Pehlivan M, Karlidag H, Turan M. Heavy metal levels of mulberry (*Morus alba* L.) grown at different distances from the roadsides[J]. *The Journal of Animal & Plant Sciences*, 2012, 22(3):665-667.
- [7] Nada E, Ferjani B A, Ali R, et al. Cadmium-induced growth inhibition and alteration of biochemical parameters in almond seedlings grown in solution culture[J]. *Acta Physiol Plant*, 2007, 29(1):57-62.
- [8] Kim H, Jeun Y C. Resistance induction and enhanced tuber production by pre-inoculation with bacterial strains in potato plants against *Phytophthora infestans*[J]. *Mycobiology*, 2006, 34(2):67-72.
- [9] 揭雨成, 罗中钦, 余玮. 苧麻抗重金属污染研究现状与应用前景[J]. *作物研究*, 2009, 23(4):283-286.
JIE Yu-cheng, LUO Zhong-qin, SHE Wei. Research status of resistance to heavy metal pollution of ramie and its application prospect[J]. *Crop Research*, 2009, 23(4):283-286.
- [10] 颜新培, 龚昕, 唐汇清, 等. 镉超标土壤桑树修复研究进展[J]. *广东蚕业*, 2014, 48(6):20-24.
YAN Xin-pei, GONG Xin, TANG Hui-qing, et al. Research status of mulberry restore the excessive cadmium content of soil[J]. *Guangdong Sericulture*, 2014, 48(6):20-24.
- [11] 唐翠明, 王振江, 戴凡伟, 等. 桑树在土壤污染和大气污染修复中的应用潜力[J]. *广东蚕业*, 2014, 48(3):38-41.
TANG Cui-ming, WANG Zhen-jiang, DAI Fan-wei, et al. Potential application of mulberry in soil pollution and air pollution remediation[J]. *Guangdong Sericulture*, 2014, 48(3):38-41.
- [12] 谭勇壁. 矿区周边重金属污染农田发展桑树种植产业的可行性研究[D]. 南宁: 广西大学, 2008:16-24.
TAN Yong-bi. Possibility of planting mulberry in mining polluted farmland[D]. Nanning: Guangxi University, 2008:16-24.
- [13] 杜伟, 姚丽萍. 重金属污染与蚕桑生产关系研究进展[J]. *北方蚕业*, 2012, 33(3):1-4.
DU Wei, YAO Li-ping. Research status of relationship between heavy metal pollution and sericulture production[J]. *North Sericulture*, 2012, 33(3):1-4.
- [14] 张兴, 王冶, 揭雨成, 等. 桑树对矿区土壤中重金属的原位去除效应研究[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(7):59-63.
ZHANG Xing, WANG Ye, JIE Yu-cheng, et al. Effect of heavy metal home position elimination on the mulberry in mining area soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(7):59-63.
- [15] 陈朝明, 龚惠群, 王凯荣. Cd对桑叶品质、生理生化特性的影响及其机理研究[J]. *应用生态学报*, 1996, 7(4):417-423.
CHEN Chao-ming, GONG Hui-qun, WANG Kai-rong. Effect of Cd on quality, physiological and biochemical characteristics of mulberry leaves and its mechanism[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1996, 7(4):417-423.
- [16] 万飞. 镉对桑蚕生长发育及茧质影响的试验初报[J]. *中国蚕业*, 2004, 25(4):23-24.
WAN Fei. Preliminary report on the effect of cadmium on the growth of mulberry and silkworm and cocoon quality[J]. *Chinese Sericulture*, 2004, 25(4):23-24.
- [17] 任立研, 宋书巧, 蓝唯源, 等. 土壤铅污染对桑树生长及桑叶品质的影响研究[J]. *资源开发与市场*, 2009, 25(7):583-585.
REN Li-yan, SONG Shu-qiao, LAN Wei-yuan, et al. Research on impact of soil lead pollution on growth of mulberry tree and quality of mulberry[J]. *Resource Development & Market*, 2009, 25(7):583-585.
- [18] 唐翠明, 罗国庆, 吴剑安, 等. 桑树多倍体杂交组合粤桑11号的育成[J]. *蚕业科学*, 2006, 32(4):571-574.
TANG Cui-ming, LUO Guo-qing, WU Jian-an, et al. Breeding of a mulberry polyploid hybrid combination Yuesang 11[J]. *Science of Sericulture*, 2006, 32(4):571-574.
- [19] 林寿康, 吕志强, 计东风, 等. 桑树新品种农桑12号、农桑14号的育成[J]. *蚕业科学*, 2001, 27(3):210-213.
LIN Shou-kang, LÜ Zhi-qiang, JI Dong-feng, et al. Experiment in growing new mulberry varieties Nongsang 12 and Nongsang 14[J]. *Science of Sericulture*, 2001, 27(3):210-213.
- [20] 吕志强, 计东风, 周勤, 等. 桑树新品种强桑1号的选育[J]. *蚕业科学*, 2011, 37(1):9-12.
LÜ Zhi-qiang, JI Dong-feng, ZHOU Qin, et al. Breeding of a new mulberry variety, Qiangsang 1 [J]. *Science of Sericulture*, 2011, 37(1):9-12.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2000:477-479.
LU Ru-kun. Soil agricultural chemical analysis method[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2000:477-479.
- [22] Hakanson L. An ecology risk index for aquatic pollution control; A sediment logical approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975-1001.
- [23] 王晓娟, 王文斌, 杨龙, 等. 重金属镉(Cd)在植物体内的转运途径及其调控机制[J]. *生态学报*, 2015, 35(23):7921-7929.
WANG Xiao-juan, WANG Wen-bin, YANG Long, et al. Transport pathways of cadmium (Cd) and its regulatory mechanisms in plant[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(23):7921-7929.
- [24] 刘克, 何文祥, 张红, 等. 镉在小麦各部位的富集和转运及籽粒镉含量的预测模型[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(8):1441-1448.
LIU Ke, HE Wen-xiang, ZHANG Hong, et al. Cadmium accumulation and translocation in wheat and grain Cd prediction[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(8):1441-1448.
- [25] 雷鸣, 曾敏, 郑袁明, 等. 湖南采矿区和冶炼区水稻土重金属污染及其潜在风险评价[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(6):1212-1220.

- LEI Ming, ZENG Min, ZHENG Yuan-ming, et al. Heavy metals pollution and potential ecological risk in paddy soils around mine areas and smelting areas in Hunan Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(6):1212-1220.
- [26] 刘玲, 吴龙华, 李娜, 等. 种植密度对镉锌污染土壤伴矿景天植物修复效率的影响[J]. *环境科学*, 2009, 30(11):3422-3426.
- LIU Ling, WU Long-hua, LI Na, et al. Effect of planting densities on yields and zinc and cadmium uptake by *Sedum plumbizincicola*[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(11):3422-3426.
- [27] 鲁雁伟, 揭雨成, 余玮, 等. 苧麻种植密度对重金属 Pb, As 富集能力影响研究[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(17):337-341.
- LU Yan-wei, JIE Yu-cheng, SHE Wei, et al. Study on the enrichment ability of heavy metal Pb, As for ramie in different planting density[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(17):337-341.
- [28] 田秀铭, 田光辉. 桑树的合理密植与桑叶产量、蚕茧质量之间关系的调查[J]. *北方蚕业*, 2008, 29(3):15-16.
- TIAN Xiu-ming, TIAN Guang-hui. Investigation of relationship between reasonable planting mulberry with mulberry leaf yield and cocoon quality[J]. *North Sericulture*, 2008, 29(3):15-16.
- [29] 陈朝明, 龚惠群, 王凯荣, 等. 桑-蚕系统中镉的吸收、累积与迁移[J]. *生态学报*, 1999, 19(5):665-669.
- CHEN Chao-ming, GONG Hui-qun, WANG Kai-rong, et al. Absorption, accumulation and migration of cadmium in mulberry-silkworm system[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5):665-669.
- [30] Creger T L, Peryea F J. Phosphate fertilizer enhances arsenic uptake by apricot liners grown in lead-arsenate-enriched soil[J]. *American Society for Horticultural Science*, 1994, 29(2):88-92.
- [31] Jiang Q Q, Segh B R. Effect of different forms and sources of arsenic on crop yield and arsenic concentration[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1994, 74(3):321-343.
- [32] Liu W J, Zhu Y J, Hu Y, et al. Arsenic sequestration in iron plaque its accumulation and speciation in mature rice plant (*Oryza sativa* L.)[J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40(18):5730-5736.
- [33] 宗良纲, 丁园. 土壤重金属(Cu Zn Pb)复合污染的研究现状[J]. *农业环境保护*, 2001, 20(2):126-128.
- ZONG Liang-gang, DING Yuan. Present investigation on synergism of heavy metals copper, zinc and cadmium in soil[J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(2):126-128.