

2018, 44(5): 0665-0671
ISSN 0257-4799; CN 32-1115/S
DOI: 10.13441/j.cnki.cykx.2018.05.001

镉铅复合胁迫对桑苗生长与桑叶重金属含量的影响

黄仁志 李一平 蒋勇兵 贾超华 蒋诗梦 颜新培 秦志雄 罗 军

(湖南省蚕桑科学研究所,长沙 410127)

摘要 桑树是湖南重金属污染耕地替代种植的代表性植物之一。以桑品种湘桑6号、湘7920、农桑14号、粤桑11号为试验材料,人为添加不同浓度梯度的镉、铅进行盆栽试验,研究镉、铅复合胁迫对桑苗生长及桑叶重金属含量的影响。结果表明:桑苗株高、节距、最大叶幅随土壤中镉和铅含量的提高而降低,桑叶镉、铅含量与土壤镉和铅含量呈正相关;以桑叶产量减少25%时所对应的土壤重金属含量作为桑树对镉、铅胁迫的耐受值,在本试验条件下,桑树对重金属污染土壤中镉、铅的平均耐受阈值分别为40.88 mg/kg和527.00 mg/kg。

关键词 重金属;胁迫;桑树

中图分类号 S888.2 文章编号 0257-4799(2018)05-0665-07

Effect of Cadmium and Lead Combined Stress on Growth of Mulberry Saplings and Contents of Heavy Metal in Mulberry leaf

Huang Renzhi Li Yiping* Jiang Yongbing Jia Chaohua Jiang Shimeng Yan Xinpei Qin Zhixiong Luo Jun

(Sericultural Research Institute of Hunan Province, Changsha 410127, China)

Abstract Mulberry tree has become one of the representative substitute plants for heavy metal contaminated farmland in Hunan Province. In this study, we investigated the effect of different concentrations of cadmium (Cd) and lead (Pb) on the growth and heavy metal contents in leaves of 4 mulberry varieties Xiangsang 6, Xiang 7920, Nongsang 14 and Yue-sang 11 by pot experiment. Results showed that the height of mulberry saplings, leaf spacing and the maximum leaf width decreased with the increase of Cd and Pb content in soil. The contents of Cd and Pb in mulberry leaf were positively correlated with the heavy metal contents in soil. The experimental condition under which soil heavy metal contents corresponding to the leaf yield of mulberry decreased by 25% were used as the tolerance values of mulberry to cadmium and lead stress. Under this experimental condition, the average tolerance thresholds of mulberry trees to cadmium and lead in heavy metal contaminated soil were 40.88 mg/kg and 527.00 mg/kg, respectively.

Keywords Heavy metal; Stress; Mulberry tree

2013年,湖南稻米Cd超标事件披露后,引起社会的广泛关注^[1]。越来越多的人开始关注身边

的土壤污染问题,发展合理、有效、经济的重金属污染土壤修复技术成为必需^[2]。2014年,国家在湖南省长株潭(长沙、株洲、湘潭)地区启动重金属污染耕地的修复治理试点工作,在启动的0.95万hm²Cd超标农田产业结构调整中就有超过一半的面积已经落实发展蚕桑^[1,3]。桑树作为一种在我国广泛分布的多年生木本植物,根系庞大、生长迅速、生物量大、适应能力强、抗盐碱、耐贫瘠,在pH 4.5~9.0的范围内都能正常生长^[4-5]。桑树对重金属具有一

收稿日期:2018-02-01 接受日期:2018-04-10

资助项目:农业部财政部重大专项(No.农办财函[2015]38号),现代农业产业技术体系建设专项(No.CARS-18),湖南省国土资源厅科技项目(No.2014-06),蚕桑种质资源多元化应用研发创新团队项目(No.2017XC01)。

第一作者信息:黄仁志(1975—),男,副研究员。

E-mail:huang0873@sina.com

通信作者信息:李一平,研究员。

E-mail:704032779@qq.com

* Corresponding author. E-mail:704032779@qq.com

定的富集和耐受能力,栽桑养蚕生产模式不仅可增加重金属污染区农民的经济收入,同时还可消除土壤中重金属通过食物链进入人体造成累积毒害的危险,可能成为治理和利用我国重金属污染农田,实现农作物种植结构调整的一种经济生态模式^[5-7]。重金属对桑树的胁迫已有许多文献报道,其中涉及的重金属有 Cd^[8]、Cr^[9]、Pb^[10]、Co^[11]、Cu^[12]、Zn^[13]、Mn^[14],而 Cd、Pb 复合胁迫对桑树生长的影响鲜有报道,本课题组承担重度污染区桑树替代种植研究任务,取得了相关基础研究数据。为减少田间试验中不可控因素如水、肥、重金属污染不均等对试验的影响,采用盆栽试验研究 Cd、Pb 复合胁迫对桑苗生长及桑叶吸收积累 Cd、Pb 的影响,以期为我省重金属污染耕地桑树替代种植及安全利用提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 材料

盆栽用土壤取自本所桑园内的熟土,风干、敲碎、过筛备用。选取湖南省常用的 4 个桑树品种进行盆栽试验,其中湘 7920、农桑 14 号与湘桑 6 号为 1 年生嫁接苗,粤桑 11 号为 1 年生实生苗。

CdCl₂·2.5H₂O 和 Pb(CH₃COO)₂·3H₂O 均为分析纯,购自国药集团化学试剂有限公司。预先用去离子水分别配制成 Cd 和 Pb 的浓缩液(质量浓度为 1 g/L),保存备用。

1.2 盆栽试验处理

用高 35 cm、内径 15 cm 的塑料花盆进行盆栽试验,按镉 6 个浓度梯度(0、5、10、25、50、100 mg/kg)与铅 6 个浓度梯度(0、150、300、450、600、900 mg/kg)两两对应组成 Cd、Pb 复合胁迫处理,如 B1 处理组为对照,即 Cd 质量比 0 mg/kg、Pb 质量比 0 mg/kg, B2 处理组为 Cd 质量比 5 mg/kg、Pb 质量比 150 mg/kg,以此类推。每个桑树品种每个处理设置 4 个重复,用事先配制好的重金属浓缩溶液稀释成各设计浓度后喷洒在土样中,并不断搅拌均匀,保持土壤含水率 55%,平衡 2 周后再搅拌均匀,实测 6 个梯度浓度,各留 500 g 土样作背景值检测用,每盆栽土 12 kg。从桑园苗圃中选择健壮、生长状况一致的桑苗移栽于盆中,每盆栽种 1 棵,定干高度 20 cm。各处理随机排列,四周放 2 排盆栽苗作保护行。为避免雨水对重金属的冲淋,所有试验塑料盆

均放在本所院内阳光棚下进行。

1.3 桑苗生长状况调查

3 月中旬桑苗栽植后,每周观察桑苗的生长状况,按常规方法进行管理,视土壤墒情浇自来水,每次每盆浇水 1 L。7 月和 9 月施肥,每盆 5 g 尿素溶于 1 L 水中,和浇水一同进行。8 月中旬记录各处理区不同品种桑苗的株高、最大叶幅、节距及叶片数。

1.4 桑叶中重金属 Cd、Pb 含量的测定

在 10 月下旬,从每个处理组的 4 个重复中随机选取 3 株桑苗,分别收集每株桑苗的全部桑叶(含已脱落于盆中的桑叶),用水清洗 1~2 遍,除去叶片表面的灰尘等杂质,再用蒸馏水清洗 2 次,晾干后在鼓风烘箱中 105 ℃ 杀青 30 min,70 ℃ 烘干至恒重。烘干样品粉碎后收集保存待测。称取 0.500 g±0.010 g 桑叶样品至专用消解瓶,加入 15 mL 混合酸(浓 HNO₃ 与 HClO₄ 的体积比为 4:1),浸泡过夜后置于电热板上进行消解,温度调节至 180 ℃±5 ℃,待消解完全赶酸至近干,取下冷却至室温后,用去离子水定容至 50 mL 并做好标记,采用 ICE-3400 原子吸收分光光度计(美国 Thermo 公司)测定重金属 Cd、Pb 的含量。

土壤样品经自然风干后,采用四分法取样,用研钵磨碎后过 100 目尼龙筛,样品袋中保存备用。检测时,每个土样取 0.500 g±0.010 g 至专用消解瓶,加入 10 mL 王水(浓 HCl 与浓 HNO₃ 的体积比为 3:1)和 5 mL HClO₄,浸泡过夜后置于电热板上进行消解,温度调节至 200~220 ℃。若消解不完全,再加少许 HClO₄,直到瓶中溶液透明无色,赶酸至近干,冷却后用去离子水定容至 50 mL 并做好标记^[15]。重金属元素用原子吸收分光光度计测定,所有样品均设置 3 个重复样和 1 个空白样,测定过程中用国家标准物质进行定量。

1.5 数据处理

桑树各生长指标值和桑叶中重金属 Cd、Pb 含量表示为平均值±标准差,使用软件 SPSS 17.0 进行数据分析,并用 Duncan 新复极差法检验平均数的差异显著性($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 盆栽土壤背景值

盆栽土壤基础肥力为 N 质量比 0.27 g/kg、P 质量比 0.28 g/kg、K 质量比 15.31 g/kg, pH 值为

6.87,有机质质量分数为 5.89%。实测盆栽土壤镉、铅含量如表 1 所示。

表 1 盆栽试验土壤中镉和铅的含量

Table 1 Content of Cd and Pb in soil of pot experiment
[质量比 / (mg·kg⁻¹) Mass ratio]

处理组编号 Treatment group No.	镉含量 Cd content		铅含量 Pb content	
	设置值 Setting value	实测值 Measured value	设置值 Setting value	实测值 Measured value
B1	0	0.42	0	32.37
B2	5	4.50	150	151.96
B3	10	13.27	300	313.50
B4	25	30.47	450	481.69
B5	50	54.00	600	615.91
B6	100	109.29	1 000	1 043.48

2.2 镉、铅胁迫下桑苗的生长特征

2.2.1 镉、铅胁迫下桑苗的形态特征

3月中旬—10月中旬定期观察 Cd、Pb 胁迫处理下各品种桑苗的生长状况。桑苗栽植后 1 个月内,各处理的桑苗均能正常生长,无明显差别;2 个月后能观察到不同浓度重金属 Cd、Pb 胁迫下桑苗长势的差异,B5、B6 处理组桑叶偏黄,生长缓慢,节距和叶面积均减小;随生长时间延长,差异越明显,高浓度胁迫处理的桑叶明显发黄,桑树止芯,停止生长,7、8 月份高浓度胁迫处理桑叶开始脱落。8 月上旬桑苗生长表现如图 1 所示。B1、B2、B3 处理组桑苗生长正常,未止芯,有新芽发出,叶面深绿色;B4 处理组各桑树品种桑苗均部分止芯,叶片浅绿色;B5、B6 处理组桑苗全部止芯,叶片发黄且大部分脱落。其中粤桑 11 号的 B6 处理组 4 株桑苗中有 3 株已干枯。



图 1 不同桑品种幼苗在重金属 Cd、Pb 胁迫处理后期(8月上旬)的生长状况

Fig. 1 Growth status of different varieties of mulberry saplings in late stage (early August) of experiment after Cd and Pb heavy metal stress

2.2.2 镉、铅胁迫下桑树的株高变化 随着土壤中 Cd、Pb 含量的增加,桑苗株高呈下降趋势,Cd、Pb 胁迫下各品种桑苗长势具有显著差异(图 1、表 2)。由表 2 可以看出,除湘桑 6 号外,低浓度重金属胁迫处理组(B2)桑苗株高比对照组 B1 高,只是农桑 14 号的差异不显著;中等浓度重金属胁迫处理组(B3、B4)桑苗株高比对照组桑苗矮,而高浓度重金属胁迫

处理组(B5、B6)桑苗株高降幅达 68.83%~88.33%。可见,低浓度 Cd、Pb 胁迫处理会促进桑树生长,而土壤 Cd、Pb 含量进一步增加,则株高呈逐渐降低的趋势。4 个品种间比较,粤桑 11 号表现较好,其株高随镉、铅处理浓度增加表现出的降低趋势较为缓慢,可见其耐受重金属的能力较强;而农桑 14 号整体株高最低(表 2)。

表 2 镉、铅胁迫下桑苗的株高变化

Table 2 Changes in height of mulberry tree under stress of Cd and Pb

桑品种 Mulberry variety	处理组编号 Treatment group No.					
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
粤桑 11 号 Yuesang 11	118.67±11.55 ^b	145.33±15.88 ^a	138.67±7.09 ^a	84.00±3.61 ^c	51.00±4.58 ^d	21.33±5.86 ^e
湘桑 6 号 Xiangsang 6	115.67±21.57 ^a	111.33±5.86 ^a	99.00±11.36 ^a	62.67±6.66 ^b	58.00±7.55 ^b	11.67±2.89 ^c
农桑 14 号 Nongsang 14	80.33±14.72 ^a	82.33±15.31 ^a	60.33±10.21 ^b	45.67±10.41 ^b	12.33±2.31 ^c	13.33±2.08 ^c
湘 7920 Xiang 7920	112.00±6.56 ^b	130.00±8.72 ^a	72.33±5.51 ^c	44.33±4.51 ^d	29.67±5.51 ^e	27.67±2.52 ^e

同行数据后不同小写字母表示 0.05 水平显著差异。表 3~4 同。

Data in the same line with different lowercase letters mean significant difference (Duncan's test, $P < 0.05$). The same in Table 3 and 4.

2.2.3 镉、铅胁迫处理对桑苗节距的影响 由表 3 可见,各桑品种的桑苗节距随土壤 Cd、Pb 含量的增加而缩短,特别是高浓度 Cd、Pb 处理组(B6)桑苗节距明显缩短,仅为对照组桑苗的 29.80%~71.03%,其中,农桑 14 号、湘桑 6 号和湘 7920 的高浓度处理组

(B5、B6)节距较对照显著缩短。农桑 14 号和湘桑 6 号的桑苗节距随土壤 Cd、Pb 含量的增加而缩短,湘 7920 的处理组 B2 比 B3 的节距小,粤桑 11 号 B1 处理(对照)比 B2、B3 都小,但差异不显著,这与陈朝明等^[16]的研究相一致,即低浓度重金属促进桑树生长。

表 3 镉、铅胁迫下桑苗的节距变化

Table 3 Changes in leaf spacing of mulberry tree under stress of Cd and Pb

桑品种 Mulberry variety	处理组编号 Treatment group No.					
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
粤桑 11 号 Yuesang 11	3.48±0.38 ^{ab}	4.45±0.45 ^a	3.79±1.60 ^{ab}	3.34±0.28 ^{ab}	3.02±0.82 ^b	3.16±0.49 ^b
湘桑 6 号 Xiangsang 6	5.62±1.14 ^a	4.51±0.75 ^b	4.06±0.43 ^b	3.80±0.58 ^b	3.74±0.58 ^b	1.68±0.19 ^c
农桑 14 号 Nongsang 14	3.48±0.76 ^a	3.36±0.36 ^a	3.12±0.50 ^a	2.93±0.37 ^a	1.91±0.50 ^b	1.41±0.26 ^b
湘 7920 Xiang 7920	3.16±0.38 ^a	2.80±1.03 ^{abc}	2.96±0.41 ^{ab}	2.49±0.22 ^{abc}	2.19±0.42 ^{bc}	2.10±0.28 ^c

2.2.4 镉、铅胁迫处理对叶片最大叶幅的影响 Cd、Pb 复合胁迫对桑苗最大叶幅有直接影响(表 4)。B6 处理组桑苗的最大叶幅比对照组减小

30.08%~45.47%,且每个桑树品种桑苗在高浓度处理(B5、B6)条件下的最大叶幅均较对照组显著下降。

表4 镉、铅胁迫下桑苗的最大叶幅变化

Table 4 Change in maximum leaf width of mulberry tree under stress of Cd and Pb

桑品种 Mulberry variety	处理组编号 Treatment group No.					
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
粤桑 11 号 Yuesang 11	11.45±1.53 ^{abc}	13.15±1.46 ^a	12.63±2.81 ^{ab}	11.08±1.16 ^{abc}	9.20±0.96 ^{bc}	8.70±1.30 ^c
湘桑 6 号 Xiangsang 6	18.48±2.29 ^a	16.00±1.56 ^a	17.15±1.58 ^a	15.20±2.44 ^a	15.75±1.77 ^a	10.08±1.44 ^b
农桑 14 号 Nongsang 14	15.55±2.76 ^a	16.80±1.48 ^a	15.93±1.99 ^a	14.25±0.71 ^{ab}	9.88±0.74 ^b	9.55±4.01 ^b
湘 7920 Xiang 7920	15.38±2.38 ^a	14.18±1.89 ^{ab}	14.10±1.75 ^{ab}	13.35±1.62 ^{abc}	12.15±0.74 ^{bc}	10.75±1.01 ^c

(最大叶幅 / cm Maximum leaf width)

2.3 镉、铅胁迫对桑树桑叶产量的影响及桑树对镉、铅的耐受值

桑叶的生物产量能有效反映桑树的生长势。本试验中各处理组的桑叶产量见表5。对于粤桑11号, B2处理组的桑叶产量比对照组高28.67%, B4处理组的桑叶产量是对照的56.85%, 生物量明显减少, 而B5处理组有2株桑苗叶片已经全部凋零, B6处理后期基本上没有叶片, 10月份取样时, 4株桑苗已有3株枯死。湘桑6号、农桑14号、湘7920桑叶产量随Cd、Pb含量的增加而下降。B6处理后期桑苗止芯, 基本上没有叶片, 停止生长发育。相对而言, 粤桑11号低浓度处理下产量提高而高浓度处理下停止生长或枯死, 说明其对重金属Cd、Pb胁迫比其他3个品种更为敏感。

桑树株高、节距、最大叶幅及桑叶产量都有一致性表现, 根据以往的研究报道^[17-18], 选择桑叶产量减少25%时对应的土壤重金属含量作为桑树对Cd、Pb胁迫的耐受值进行分析。由表6可知, 土壤Cd、Pb含量与桑叶产量的回归分析, 相关系数均大于0.87, 说明它们之间具有较好的相关性, 特别是农桑14号、粤桑11号和湘7920桑叶中Cd含量与

土壤Cd含量间的相关系数均大于0.93, 而农桑14号超过0.99。与对照相比, 以桑叶产量减少25%推算土壤中Cd、Pb的含量, 得出在本试验条件下桑树对重金属污染土壤中Cd的平均耐受阈值为40.88 mg/kg, 对Pb的平均耐受阈值为527.00 mg/kg。

2.4 镉、铅胁迫下桑叶Cd、Pb含量的变化

如表7所示, 桑叶镉含量与土壤Cd含量具有明显的正相关, 土壤Cd含量越高, 桑叶Cd含量也越高。对于饲料桑品种粤桑11号, B2处理组桑叶中Cd的质量比只有0.045 mg/kg, B3、B4处理组桑叶Cd含量有所提高, 但质量比仍低于0.5 mg/kg (国家饲料卫生标准GB13078—2001), 而B5、B6处理组桑叶Cd含量明显提高, 质量比高于1 mg/kg, 超过国家饲料卫生标准Cd限量标准的1倍。

不同浓度Pb、Cd复合胁迫处理后, 桑叶中的Pb含量不同, 低、中浓度胁迫处理组(B1~B4)桑叶Pb含量随土壤Pb含量的增加而提高, 但B5、B6处理组桑叶Pb含量反而降低, 而且B6处理组比B5更低(表8)。分析认为高浓度重金属胁迫处理下桑树长势较差, 桑叶变黄, 对重金属Pb的吸收转运有影响。有关桑树对Cd、Pb的吸收转运机制有待进一步研究。

表5 镉、铅胁迫对桑树单株桑叶产量的影响

Table 5 Leaf yield of single mulberry tree under stress of Cd and Pb

桑品种 Mulberry variety	处理组编号 Treatment group No.					
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
粤桑 11 号 Yuesang 11	38.82±14.22	49.95±14.60	38.97±18.91	22.07±1.88	1.25	—
湘桑 6 号 Xiangsang 6	73.59±19.17	55.50±4.99	38.97±10.17	15.47±2.64	10.71±2.25	2.90
农桑 14 号 Nongsang 14	59.51±1.00	48.26±14.12	42.50±3.49	24.23±11.23	3.74	1.71
湘 7920 Xiang 7920	59.32±19.70	52.05±10.21	32.67±12.95	11.48±9.28	6.41±2.96	—

[产量 / (g, m_d) Yield per plant]

表6 土壤镉、铅含量与桑叶产量的相关性分析

Table 6 Correlation analysis of Cd and Pb contents in soil and leaf yield of mulberry tree

重金属 Heavy metal	桑品种 Mulberry variety	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient	耐受阈值 / (mg·kg ⁻¹) Tolerance value	平均值 / (mg·kg ⁻¹) Mean value
镉 Cd	农桑 14 号 Nongsang 14	$y = -0.017x + 0.94$	0.992	$x = 40.59$	40.88
	粤桑 11 号 Yuesang 11	$y = -0.021x + 1.22$	0.959	$x = 46.10$	
	湘桑 6 号 Xiangsang 6	$y = -0.015x + 0.84$	0.914	$x = 39.00$	
	湘 7920 Xiang 7920	$y = -0.017x + 0.89$	0.932	$x = 37.82$	
铅 Pb	农桑 14 号 Nongsang 14	$y = -0.002x + 1.08$	0.997	$x = 416.50$	527.00
	粤桑 11 号 Yuesang 11	$y = -0.002x + 1.36$	0.873	$x = 552.50$	
	湘桑 6 号 Xiangsang 6	$y = -0.001x + 1.01$	0.988	$x = 726.00$	
	湘 7920 Xiang 7920	$y = -0.002x + 1.08$	0.989	$x = 413.00$	

以桑叶产量(y)减少 25%时所对应的土壤重金属含量(x)作为桑树对镉、铅胁迫的耐受阈值。

Soil heavy metal contents (x) corresponding to the leaf yield of mulberry tree (y) decreased by 25% were used as the tolerance values of mulberry tree to Cd and Pb stress.

表7 镉、铅胁迫下桑叶中的镉含量

Table 7 Cd content of mulberry leaf under stress of Cd and Pb

[质量比 / (mg·kg⁻¹) Mass ratio]

桑品种 Mulberry variety	处理组编号 Treatment group No.					
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
粤桑 11 号 Yuesang 11	0.015±0.004	0.045±0.003	0.071±0.017	0.243±0.061	1.207±0.010	
湘桑 6 号 Xiangsang 6	0.012±0.001	0.023±0.001	0.107±0.004	0.294±0.007	4.321±0.010	4.467±0.011
农桑 14 号 Nongsang 14	0.002±0	0.011±0.001	0.305±0.006	0.473±0.007	1.035±0.023	2.287±0.039
湘 7920 Xiang 7920	0.019±0.003	0.056±0.003	0.068±0.006	0.424±0.031	1.528±0.021	

表8 镉、铅胁迫下桑叶中的铅含量

Table 8 Pb content of mulberry leaf under stress of Cd and Pb

[质量比 / (mg·kg⁻¹) Mass ratio]

桑品种 Mulberry variety	处理组编号 Treatment group No.					
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
粤桑 11 号 Yuesang 11	6.160±0.142	11.510±0.311	6.388±0.035	6.912±0.069	11.136±0.075	—
湘桑 6 号 Xiangsang 6	5.808±0.017	14.937±0.108	28.664±0.211	37.712±0.099	28.168±0.162	19.285±0.043
农桑 14 号 Nongsang 14	8.518±0.017	10.682±0.108	21.418±0.211	26.676±0.099	7.437±0.162	5.482±0.043
湘 7920 Xiang 7920	7.380±0.051	14.815±0.145	27.172±0.114	28.689±0.077	26.674±0.053	—

3 讨论

镉、铅复合胁迫下各品种桑苗的株高、节距、最大叶幅均随镉、铅处理浓度的增加而降低,桑叶中镉、铅含量与土壤中镉、铅含量呈正相关;且高浓度镉、铅胁迫处理桑苗后桑叶发黄,提前止芯。特别是粤桑11号,低浓度的镉、铅处理明显促进桑苗生长,高浓度处理组的4株桑苗有3棵枯死,其他3个品种桑苗在高浓度处理后后期停止生长,但没有枯死现象,说明粤桑11号对高浓度重金属镉、铅胁迫较敏感,其耐镉、铅机制有待进一步的挖掘研究。在本试验条件下,推算得出桑树对重金属污染土壤中镉和铅的平均耐受阈值分别为40.88 mg/kg和527.00 mg/kg。

本课题组通过大田试验得知:在镉质量比为2.93 mg/kg的土壤中栽植桑树,桑树整株富集系数平均为0.107,桑树对重金属镉的转移系数平均为0.243^[19]。桑树不是超富集植物,但是桑树根系庞大、生长迅速、生物量大、适应能力强、抗盐碱、耐贫瘠,在pH 4.5~9.0的范围内都能正常生长,是重金属污染耕地替代种植较好的植物,且能给重金属污染区农户及蚕桑企业带来一定的经济效益,适宜推广。在本试验中,不同品种桑树对重金属表现出不同的吸收积累能力和耐受能力,所获得的数据为今后的研究奠定了部分基础。为了能把试验获得的结论进行有效的推广应用,应根据桑树的不同应用目的加快桑树品种的筛选,在双超污染区进行替代种植,栽种低镉(铅)吸收积累桑树品种,保障桑树应用安全;在低浓度重金属污染区栽植高吸收积累镉的桑树品种,在利用桑叶养蚕和生产饲料桑的同时可为重金属污染耕地的生态修复助力。

参考文献 (References)

[1] 佚名.让老百姓吃上放心粮:2014年国家启动重金属污染耕地修复治理[J].中国农业信息,2014(10):64

[2] 蒋勇兵.低浓度鼠李糖脂作用下铜绿假单胞杆菌在玻璃珠介质中的吸附和传输[D].长沙:湖南大学,2014

[3] 艾均文,龚昕,肖建中,等.基于可持续发展要求对湖南打造生态高效蚕业的探讨[J].湖南农业科学,2015(2):62-66

[4] 杜周和,刘俊凤,刘刚,等.桑树作为水土防护林的研究[J].广西蚕业,2001,38(3):10-12

[5] 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(2):20-24

[6] 王凯荣,陈朝明,龚惠群,等.镉污染农田农业生态整治与安全高效利用模式[J].中国环境科学,1998,18(2):97-101

[7] JIANG Y, HUANG R, YAN X, et al. Mulberry for environmental protection[J]. Pak J Bot, 2017, 49(2): 781-788

[8] WANG K. Tolerance of cultivated plants to cadmium and their utilization in polluted farmland soils[J]. Eng Life Sci, 2002, 22(1/2): 189-198

[9] ASHFAQ M, AHMAD S, SAGHEER M, et al. Bioaccumulation of chromium in silkworm in relation to mulberry, soil and wastewater metal concentrations[J]. J Anim Plant Sci, 2012, 22(3): 627-634

[10] ZHOU L, ZHAO Y, WANG S, et al. Lead in the soil-mulberry (*Morus alba* L.)-silkworm (*Bombyx mori*) food chain: translocation and detoxification[J]. Chemosphere, 2015, 128: 171-177

[11] ASHFAQ M, ALI S, HANIF M A. Bioaccumulation of cobalt in silkworm (*Bombyx mori* L.) in relation to mulberry, soil and wastewater metal concentrations[J]. Process Biochem, 2009, 44(10): 1179-1184

[12] TEWARI R K, KUMAR P, SHARMA P N. Antioxidant responses to enhanced generation of superoxide anion radical and hydrogen peroxide in the copper-stressed mulberry plants[J]. Planta, 2006, 223(6): 1145-1153

[13] TEWARI R K, KUMAR P, SHARMA P N. Morphology and physiology of zinc-stressed mulberry plants[J]. J Plant Nutr Soil Sci, 2008, 171(2): 286-294

[14] TEWARI R K, KUMAR P, SHARMA P N. Oxidative stress and antioxidant responses of mulberry (*Morus alba*) plants subjected to deficiency and excess of manganese[J]. Acta Physiol Plant, 2013, 35(12): 3345-3356

[15] 贾超华,颜新培,龚昕,等.镉超标耕地蔬菜重金属污染调查与健康风险评估[J].中国农学通报,2016,32(5):106-112

[16] 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

[17] WANG K, GONG H, WANG Y, et al. Toxic effects of cadmium on *Morus alba* L. and *Bombyx mori* L.[J]. Plant Soil, 2004, 261(1): 171-180

[18] KUBOI T, NOGUCHI A, YAZAKI J. Relationship between tolerance and accumulation characteristics of cadmium in higher plants[J]. Plant Soil, 1987, 104(2): 275-280

[19] 蒋诗梦,颜新培,龚昕,等.桑树品种间重金属镉的分布与富集规律研究[J].中国农学通报,2016,32(22):76-83