

664-669

第19卷第5期
1999年9月生态学报
ACTA ECOLOGICA SINICAVol. 19, No. 5
Sept., 1999

桑-蚕系统中镉的吸收、累积与迁移

陈朝明^①, 龚惠群^②, 王凯荣, 唐 菁^③, 万继武^③

(中国科学院长沙农业现代化研究所, 长沙 410125)

S 888.2 S 881.22

摘要:对桑-蚕系统中镉的吸收、累积与迁移行为研究结果表明:(1)桑树对土壤镉污染有一定的耐性,桑树镉累积量(Ta)和相对累积率(Ra)与土壤镉浓度(Sc)的关系可分别用回归方程 $Ta=a+b\log(Sc)$ 和 $\log(Ra)=a+b\log(Sc)$ 描述。(2)随着土壤镉浓度的增加,镉在桑树根部的分布率明显增加,地上部分的分布率有所降低,运转到叶片的比率明显降低。(3)蚕体、蚕砂和蚕茧的镉含量、镉累积量,随着桑叶镉含量的增加而增加。(4)栽桑子系统中,通过桑叶养蚕和伐枝条,约50%的桑树镉被移出土壤镉库。养蚕子系统中,占食下桑叶镉累积量4.7%的镉,经蚕茧移出养蚕系统而转入缫丝业。对桑-蚕系统而言,通过蚕茧移出系统的镉仅占桑树吸收镉的0.77%。(5)采用栽桑养蚕来治理和利用镉污染土壤时,应重视养蚕过程中含镉废物的管理。

关键词:土壤镉;桑-蚕系统;镉吸收;镉累积;镉迁移

The absorption, accumulation and migration of cadmium in the system of soil mulberry and silkworm

CHEN Chao-Ming, GONG Hui-Qun, WANG Kai-Rong, TANG Jing, WAN Ji-Wu (Changsha Institute of Agricultural Modernization, Academia Sinica, Changsha 410125, China)

Abstract: The absorption, accumulation and migration of cadmium (Cd) in the system of growing mulberry and feeding silkworm was conducted. The results are the following: (1) Mulberry is a kind of Cd-tolerant cash crop and can absorb Cd from soil. The relationships between amount of Cd accumulation (Ta), relative rate of Cd accumulation (Ra) in mulberry tree and Cd concentration in soil (Sc) are expressed by the equations: $Ta=a+b\log Sc$ and $\log Ra=a+b\log Sc$. (2) With increasing Cd concentration in soil, distribution percentage of Cd in roots increased significantly, that in aboveground parts of mulberry decrease a little, and that in leaf decreased significantly. (3) With increasing Cd content in the mulberry leaf, Cd content in silkworm body, excrement, chrysalis and silk shell also increased. (4) In the subsystem of growing mulberry, about 50% of amount of Cd accumulation in the mulberry tree was removed from soil by using leaf for feeding silkworm and cutting branch. In the subsystem of feeding silkworm, 4.7% of amount of Cd accumulation in taked mulberry leaf by silkworm was removed from feeding silkworm subsystem to reeling mill with cocoon. Therefore for the system of growing mulberry and feeding silkworm, only 0.77% of amount of Cd absorbed by mulberry tree were removed from the system. (5) It should pay serious attention to manage the Cd-containing residus produced by feeding silkworm, when Cd-polluted land was utilized for growing mulberry.

Key words: Cd in soil; system of growing mulberry and feeding silkworm; absorption of Cd; accumulation of Cd; migration of Cd

文章编号: 1000-0933(1999)05-0664-06 中图分类号: X171 文献标识码: A

基金项目:中国科学院“八五”重点资助项目“镉污染农田生态整治与安全高效利用模式研究”部分内容

收稿日期: 1997-08-02; **修订日期:** 1998-02-18

现工作单位 ①中国科学院上海植物生理研究所; ②中国科学院上海细胞生物学研究所; ③湖南省长沙农业学校
李永兴, 李 玲参加了部分试验工作。

有色金属矿的开采、冶炼和使用含镉原料的工厂,通过“三废”将镉排到环境中,其中大部分进入农业土壤系统^[1]。农业土壤镉污染的综合治理已成为当今改善环境和提高环境质量的一个重要问题。合理调整镉污染土地的种植制度是一条重要的技术途径,利用种植生长周期长、形体高大的木本植物净化镉土壤已有报道^[2],也有在镉污染土壤上种植纤维作物——苧麻(*B. nived L. Gaud*)的报道^[3]。“八五”期间,作者在镉污染土壤上种植桑树,发展养蚕业,开辟了安全高效利用镉污染土地的新模式^[4]。

关于植物对镉的吸收、累积方面已有不少的研究^[5~7],但桑树对镉的吸收、运转及镉在桑-蚕系统中的行为的研究工作还很缺乏^[8]。本文研究了不同镉污染水平下,土壤-桑树-家蚕系统中镉的吸收、累积和迁移规律,为采用栽桑养蚕来治理和利用镉污染土壤提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验小区与供试土壤

供栽桑试验的小区为 1m×1m×1m(长×宽×深)的砖砌水泥池。供试土壤为第四纪红色粘土发育的生红壤。试验池上层土壤(0~50cm)用化肥和菜籽饼培肥,培肥后试验土壤的基本理化性状见表 1。

表 1 供试土壤的基本性状

Table 1 Fundamental physical-chemical properties of tested soil

类型 Soil type	质地 Texture	有机质(OM) (g/kg)	总量 Total(g/kg)			速效 Available(mg/kg)			Cd (mg/kg)	pH
			N	P	K	N	P	K		
红壤 Red soil	粘土 Clay	8.39	0.68	0.47	16.9	77.2	9.0	188.7	0.92	6.43

1.2 镉添加处理

将 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 用水溶解后,加到拌有化肥、菜籽饼的适量供试土壤中,然后混入试验池上层土壤(0~50cm),平衡 2 个月后栽桑。土壤镉处理浓度设置 6 个水平,实测各处理土壤镉浓度为 0.92(对照)、8.49、22.3、40.6、75.8 和 145mg/kg。

1.3 栽桑试验

供试桑树品种为“湖桑 197”。1992 年 2 月栽植,每处理小区定植 5 株,按照栽桑常规技术管理,每年夏、秋各伐分枝 1 次,测定分枝和叶片的生物量。于桑树生长第 3 年的夏、秋季,从各处理中挖出桑树 1 棵,测定整株桑树各器官(须根、主根、主茎、分枝和叶片)的生物量及其镉含量。

1.4 养蚕试验

供试蚕品种为“芙蓉×湘辉”,由湖南省蚕种站提供。养蚕试验于 1992、1993 年 6~7 月间进行。采摘各试验池的桑叶分别喂养蚕,按照养蚕技术规程进行管理。养蚕期间,对各处理的桑叶、残叶、蚕砂、蚕体及蚕茧进行计量,并测定其镉含量。

1.5 样品分析

样品的干物质量,采用常压恒温干燥法^[9]。

镉含量测定 土壤样品用王水-高氯酸消化,植株等生物样品(桑树、蚕体、蚕砂、蛹和茧层)用硝酸-高氯酸消化。PE-4000 型原子吸收分光光度计测定。

2 结果与讨论

2.1 桑树对土壤镉的吸收、累积和运转

2.1.1 桑树对土壤镉的吸收 桑树各器官的镉含量,随着土壤镉浓度的增加而增加,经相关性分析,呈显著或极显著的直线正相关(表 2)。土壤镉浓度为 8.46~75.8mg/kg 时,桑树各器官镉含量大小顺序为:须根>主根>主茎>叶片>分枝。不同土壤镉浓度下,桑树须根和主根的镉含量明显高于其它器官的镉含量,须根的镉含量是其它器官镉含量的 1.63~4.6 倍,主根的镉含量是其它器官(除须根外)镉含量的 1.41~49.7 倍。各处理中,桑树各器官镉含量分别是对照相应器官的 1.24~292 倍,说明桑树各器官对土壤镉均有富集作用。

表 2 桑树不同器官的镉含量
Table 2 Cd content in organs of mulberry

土壤镉 Soil Cd (mg/kg)	镉含量 Cd content(mg/kg DW)					
	须根 Fibrous foot	主根 Main root	主茎 Trunk	分枝 Branch	叶片 Leaf	整株 Tree
0.92(本底,CK)	1.07	0.565	0.401	0.311	0.657	0.430
8.49	25.0	2.68	0.980	0.599	0.815	1.02
22.3	39.4	5.83	1.61	0.804	1.12	1.67
40.6	46.5	10.7	2.48	0.974	0.20	1.90
75.8	64.1	18.3	3.38	1.16	1.62	2.75
145	281	165	33.2	6015	3.32	35.9
相关系数(r)	0.9452	0.9138	0.9066	0.9241	0.9827	0.9045
P	<0.01	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.05

2.1.2 镉对桑树生物量的影响 土壤镉对桑树不同器官生物量的影响见表 3。当土壤镉浓度 $\leq 22.3\text{mg/kg}$ 时,根的生物量比对照约减少 20%;土壤镉浓度达到 40.6mg/kg 时,根的生物量减少近 50%。当土壤镉浓度 $\leq 40.6\text{mg/kg}$ 时,地上部分生物量与对照接近或略有增加;当土壤镉浓度 $\geq 75.8\text{mg/kg}$ 后,地上部分生物量才明显下降;当土壤镉浓度达 145mg/kg 时,桑树逐渐死亡。因此土壤镉对桑树地下部分生物量的影响明显地大于地上部分,这是由于须根和主根的镉含量明显高于地上器官的镉含量。土壤镉对桑树根部的影响主要表现为抑制其生长发育,须根的数量和长度减少,当土壤镉浓度达 75.8mg/kg 以上时,根出现瘤状结节,并有木栓化趋势。经相关性分析,桑树整株生物量(Yb, g)、地上部分生物量(Yup, g)与土壤镉浓度($Sc, \text{mg/kg}$)呈极显著的负相关。其回归方程为:

$$Yb = 2428.1 - 14.912Sc \quad (r = -0.9828, n = 6);$$

$$Yup = 2266.6 - 13.809Sc \quad (r = -0.9765, n = 6).$$

表 3 土壤镉对桑树各器官生物量的影响

Table 3 Effect of Cd on biomass in organs of mulberry

土壤镉 Soli Cd (mg/kg)	相对生物量 Relative biomass(%)							整株 Tree	生长状况 Growth status
	地下部分			地上部分					
	Under-ground parts			Upper-ground parts					
	须根	主根	合计	主茎	分枝	叶片	合计		
	Fibrous	Main root	Total	Trunk	Branch	Leaf	Total		
0.92(CK)	100	100	100	100	100	100	100	100	正常 Normal
8.49	86.6	77.5	78.5	120	108	113	111	108	正常 Normal
22.3	87.8	77.7	79.1	104	97.0	79.2	92.8	91.8	正常 Normal
40.6	65.2	48.7	51.0	101	99.9	80.5	94.8	91.2	基本正常 General normal
75.8	31.2	46.4	44.3	87.5	62.3	66.5	65.6	63.9	生长缓慢 Growth slowly
145	4.1	3.8	3.8	42.2	5.3	2.1	7.7	7.3	逐渐死亡 Die gradually

据 Kuboi 等研究^[7],用植物生物量下降 25% 时植物含镉量作为该植物耐镉性的临界浓度,比土壤镉浓度指标更适宜。在本试验中,桑树地上部分生物量下降 25% 时,桑叶镉含量为 1.55mg/kg(DW) ,对应的土壤镉浓度为 54.1mg/kg ,该值即为桑树耐镉临界值上限。因此,桑树对土壤镉具有一定的耐受能力。

2.1.3 镉在桑树体内的累积、分布和运转 桑树各器官的镉累积量见表 4,整株桑树的镉累积量随着土壤

镉浓度的增加而增加。经相关性分析,整株桑树的镉累积量与土壤镉浓度呈对数函数关系(图 1):

$$Ta = 1.091 + 1.523 \log Sc \quad (r = 0.9875 \quad n = 6)$$

其中, Ta 为整株镉累积量(mg), Sc 为土壤镉浓度(mg/kg)。

桑树对镉的相对累积率随着土壤镉浓度的增加而下降。经相关性分析,桑树对镉的相对累积率与土壤镉浓度呈双对数函数关系(图 1):

$$\log Ra = -1.996 - 0.7002 \log Sc$$

$$(r = -0.9931 \quad n = 6)$$

其中, Ra 为整株镉相对累积率, $Ra = Ta/C$,

Ta 为整株镉累积量(mg), C 为 0~50cm 土层的镉总量(mg), 土壤容重为 1.12 kg/cm^3 。

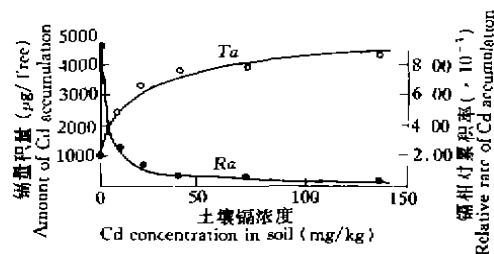


图 1 土壤镉浓度对桑树镉累积量(Ta)和相对累积率(Ra)的影响

Fig. 1 Effect of Cd concentration on amount of Cd accumulation (Ta) and relative rate of Cd accumulation (Ra)

表 4 桑树的镉累积量和相对累积率

Table 4 Amount and relative rate of Cd accumulation of mulberry

土壤镉 Soil Cd (mg/kg)	镉累积量 Cd accumulation					累积量 Ta	相对累积率 Ra
	须根	主根	主茎	分枝	叶片	整株 Tree	
	Fibrous root	Main root	Trunk	Branch	Leaf		
	(mg/tree · a)					(mg/tree · a)	($\times 10^{-3}$)
0.92(CK)	0.027	0.088	0.071	0.405	0.359	0.950	9.22
8.49	0.548	0.323	0.208	0.846	0.502	2.43	2.55
22.3	0.875	0.704	0.295	1.02	0.485	3.38	1.35
40.6	0.767	0.810	0.444	1.27	0.528	3.82	0.839
75.8	0.506	1.32	0.522	0.942	0.588	3.88	0.457
145	0.289	0.964	2.47	0.424	0.038	4.19	0.258

Ta ——Amount of accumulation; Ra ——Ratio of accumulation

镉在桑树各器官的分布率见图 2。土壤未添加镉时,桑树根部(须根+主根)镉的比率较低,约为 12%;镉在主茎和分枝中的分布率最高,约占 50%,其中分枝镉的分布率明显高于主茎;叶片中累积的镉约占 38%。土壤添加镉后,桑树吸收的镉在根部累积的比率明显增高,而在地土部分累积的比率逐渐减少,其中镉在主茎中的分布率与对照接近,而在分枝中的分布率比对照有所下降,特别是叶片中镉的分布率明显降低。土壤镉浓度在 8.49~75.8mg/kg 范围内,桑树根部对镉有较高的富集能力,约 40%的镉富集在根部,运转到桑树主茎和分枝的量约占总累积量的 41%;而运转到叶片的镉量相对较少,约占总累积量的 16%,这对利用镉污染土壤栽桑养蚕具有实际意义。

2.2 蚕对桑叶镉的吸收、累积和运转

2.2.1 蚕对桑叶镉的吸收和累积

各处理中蚕体、蚕砂和蚕茧的镉含量和镉累积量均随着桑叶镉含量的增加而增加。经相关性分析,蚕体、蚕砂、蛹和茧层的镉含量与桑叶的镉含量呈显著或极显著的直线正相关,蚕体、蚕砂和蛹的镉累积量与桑叶镉含量呈显著或极显

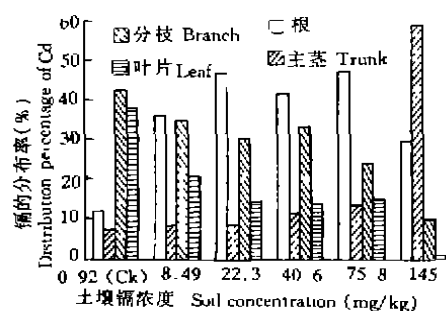


图 2 镉在桑树各器官的分布率

Fig. 2 Distribution percentage of Cd in organs of mulberry

著的直线正相关(表 5)。

表 5 蚕食下桑叶、蚕体、蚕砂和蚕茧的镉含量及其镉累积量

Table 5 Cd content and amount of Cd accumulation in leaf, silkworm body, excrement and cocoon

桑叶镉 Leaf Cd (mg/kg DW)	镉含量 Cd content				镉累积量 Cd accumulation				
	蚕体 Worm	蚕砂 Excrement (mg/kg DW)	蛹 Chrysalis	茧层 Shell	食下桑叶 Taked leaf	蚕体 Worm	蚕砂 Excrement	蛹 Chrysalis	茧层 Shell
0.657(CK)	0.670	1.16	0.42	0.19	291.6	19.8	271.8	11.0	6.70
0.815	0.880	1.40	0.46	0.21	433.2	26.1	407.2	12.5	7.70
1.12	1.02	1.67	0.54	0.26	475.0	30.1	444.9	14.6	9.80
1.62	1.40	2.20	0.65	0.35	561.8	41.3	520.5	18.1	12.4
3.32	3.37	3.81	1.70	0.42	700.8	86.0	614.8	42.2	12.9
相关系数(r)	0.9929	0.9963	0.9835	0.9136	0.9049	0.9967	0.8645	0.9904	0.7634
P	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.05	<0.01	<0.05	<0.01	>0.05

r —Correlation coefficient

2.2.2 镉在蚕生长发育过程中的运转 幼虫期,镉随着摄食的桑叶进入蚕体和排泄物——蚕砂中,本试验中蚕培皮含的镉忽略未计。除桑叶镉含量为 3.32mg/kg 的处理以外,全龄期蚕食下的桑叶镉在蚕体、蚕砂中的平均分配比例约为 6.7:93.3,处理间的差异不大。研究表明,用鲜叶含镉量小于 0.49mg/kg 的桑叶(相应的干基镉含量为 1.20mg/kg)养蚕时,蚕的生长发育和蚕茧质量均不受明显影响^[10],其原因很可能是蚕体吸收的镉量较少,不足以影响蚕的生长发育。

蚕完成幼虫期后,进入结茧化蛹阶段,蚕体吸收的镉又分别运转到营茧前的粪尿、茧层和蛹中,其分布率见图 3。由此可见,除桑叶镉含量为 3.32mg/kg 的处理以外,蚕体镉在蛹、茧层和粪尿中的分布率各处理间的差异较小。蚕体镉在蛹、茧层和粪尿中的平均分布率约为 48:32:20。

2.3 镉在桑-蚕系统中的迁移和分配

研究结果表明^[10,11],当土壤镉浓度 ≤ 40.6 mg/kg 时,桑树生长正常或基本正常,镉对桑叶品质无明显影响,蚕的生长发育和蚕茧质量均正常。因此,对土壤镉浓度为 8.49~40.6mg/kg 时,镉在桑-蚕系统中的迁移作定量测算和归结(图 4)。

根据试验测定,3 年龄桑树年累积的镉量占土壤总镉量(0~50cm 土层)的 0.0839%~0.255%,其中桑树累积镉量的 30.1%~34.9%分布在分枝,13.9%~20.7%的镉运转到叶片。生产实践中,每年对桑树砍伐分枝,伐下的枝条大多作燃料或造纸等,有的也直接还田。因此,通过采摘桑叶养蚕和伐枝,约 50%桑树所吸收的镉被移出土壤镉库。

试验表明,蚕对桑叶的食下率为 87.3%,残存桑叶量为 12.7%^[10]。桑叶镉进入养蚕系统后,蚕体吸收的镉仅占食下桑叶镉量的 6.7%,而 93.3%的桑叶镉转入蚕砂中。

结茧化蛹后,蚕体吸收镉的 80%迁移到茧层和蛹中,20%存在于粪尿中,分别约占食下桑叶镉累积量的 4.7%和 1.1%。因此,在养蚕系统中,残存的桑叶、蚕砂和粪尿(在蚕簇上)所含有的镉占食下桑叶镉量的 95.3%,仅占食下桑叶镉累积量 4.7%的镉,随蚕茧移出养蚕系统,进入缫丝系统。经计算,通过蚕

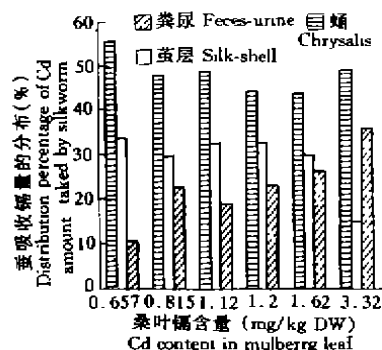


图 3 蚕吸收的镉在蛹、茧层和粪尿中的分布率

Fig. 3 Distribution percentage of Cd amount taken by silkworm in chrysalis, silk-shell and feces-urine

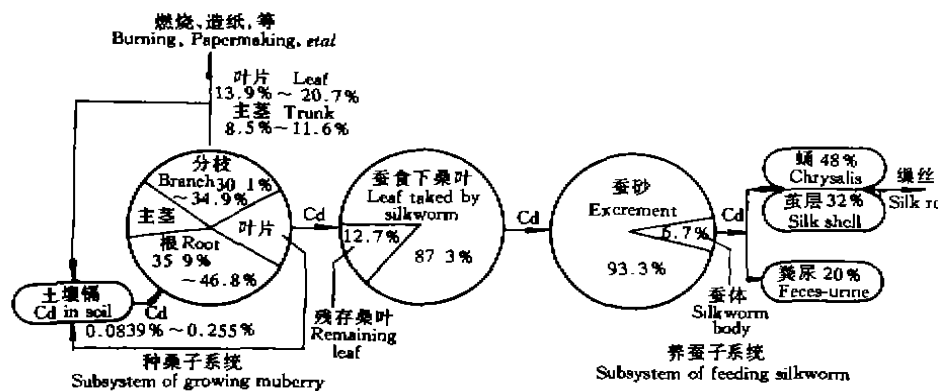


图4 镉在桑-蚕系统中的迁移和分配

Fig. 4 The migration and distribution of Cd in system of growing mulberry and feeding silkworm

茧移出桑-蚕系统的镉仅占桑树吸收镉量的 0.77%。

根据镉在桑-蚕系统中的分配与迁移特点,在利用镉污染土壤栽桑,发展养蚕业时,应加强养蚕过程中的残存桑叶、蚕砂及茧茧前排出的粪尿等含镉残留物的管理,防止镉污染的扩散。

参考文献:

- [1] 鲁如坤,等.关于土壤-作物生态系统中镉的研究.土壤,1992,24(3):129~132,137.
- [2] 黄会一,等.镉土治理林业生态工程的研究.中国环境科学,1989,9(5):419~426.
- [3] 项雅玲,等.苧麻吸镉特性及镉污染农田的改良.中国麻作,1994,16(2):39~42.
- [4] 《中国环境年鉴》编委会.中国环境年鉴 1995.北京:中国环境年鉴社,1995,236.
- [5] 董克虞,等.农作物对镉的吸收累积规律.环境科学,1981,2(3):166~171.
- [6] 郑逢中,等.秋茄对镉吸收、累积及净化作用的研究.植物生态学与地植物学学报,1992,16(3):220~226.
- [7] Kuboi T. et al. Relationship between tolerance and accumulation characteristics of Cadmium in higher plants. *Plant and soil*, 1987, 104: 275~280.
- [8] 周伟.镉和铅污染土壤对桑树生长的影响.蚕业科学,1995,21(4):265~266.
- [9] 中国土壤学会农业化学专业委员会.土壤农化常规分析方法.北京:科学出版社,1983.
- [10] 龚惠群,等.镉对家蚕生长发育和蚕茧质量影响的研究.应用与环境生物学报,1998,4:159~162.
- [11] 陈朝明,等.Cd对桑叶品质、生理生长特性的影响及其机理的研究.应用生态学报,1996,7(4):417~423.