

桐乡某皮革厂周边土壤重金属污染及健康风险评价

傅晓铎, 刘婷婷* (同济大学浙江学院, 土壤修复工程实验室, 浙江嘉兴 314000)

摘要 [目的]分析桐乡某皮革厂周边土壤重金属污染及健康风险评价。[方法]以桐乡某2个皮革厂周边500 m内土壤作为研究对象,测定春季盛行风东南风下风向区域不同水平距离及深度处(0~30 cm)土样中Cd、Pb、Cr、As、Zn、Cu、Co、Ni、Hg 9种元素的含量,并采用地累积指数法和健康风险评价法对重金属污染状况进行评价。[结果]2个研究区域污染状况相似,表层土壤中均有4种重金属(Cd、Co、Ni、Hg)高于嘉兴市土壤背景值的情况,其中Hg和Cd两类重金属元素普遍超出标准值,但平面内浓度分布无明显规律可循,人类活动对该区域重金属干扰强烈,而风向对重金属分布影响不大;2个皮革厂周围土壤中Cd、Hg处于偏严重污染-严重污染,Co、Ni处于无污染-偏中度污染,Pb、Cr、As、Zn、Cu为无污染,并且各金属的污染程度没有随土壤深度的增加而减轻,在纵向分布上没有呈现出一定的规律性;健康风险评价表明,研究区域内,Cd、As、Ni 3类重金属元素致癌风险虽然均在可接受范围内,但都已存在潜在致癌风险,应重视源头的防治。[结论]该研究为桐乡市土壤环境质量的预警提供依据。

关键词 重金属污染;地累积指数;健康风险评价;桐乡;皮革厂

中图分类号 X53 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2018)35-0080-07

Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Soil around a Leather Factory in Tongxiang

FU Xiao-xing, LIU Ting-ting (Laboratory of Soil Remediation Engineering, Zhejiang University, Tongji University, Jiaxing, Zhejiang 314000)

Abstract [Objective] The research aimed to analyze the heavy metal pollution and health risk assessment of soil around a leather factory in Tongxiang. [Method] Taking the soil within 500 m of two leather factories in Tongxiang as the research object, the Cd, Pb, Cr, As, Zn, Cu, Co, Ni, Hg of nine kinds of element content in soil samples at different horizontal distances and depths (0-30 cm) in the wind direction of the south-east wind in the spring were measured, and the pollution status of heavy metals were evaluated by the land accumulation index method and the health risk assessment method. [Result] The two study area pollution condition similar to that of four kinds of heavy metals in surface soil (Cd, Co, Ni, Hg) higher than that of Jiaxing soil background value, the Hg and Cd two kinds of heavy metal elements in common beyond the standard, but had no obvious plane concentration distribution rules to follow, intense human activities on the area of heavy metal interference, and the wind had a little effects on distribution of heavy metals; In the soil around the two tanneries, Cd and Hg were polluted seriously - seriously, Co and Ni were pollution-free - moderately polluted, Pb, Cr, As, Zn and Cu were pollution-free, and the pollution degree of each metal did not decrease with the increase of soil depth, and there was no regularity in the vertical distribution. Health risk assessment showed that in the study area, although the carcinogenic risks of Cd, As and Ni were all within the acceptable range, they all had potential carcinogenic risks, and the prevention and control of the source should be paid attention to. [Conclusion] The research provides the basis for the early warning of soil environmental quality in Tongxiang City.

Key words Heavy metal pollution; Land accumulation index; Health risk assessment; Tongxiang; Leather factory

近年来,我国土壤重金属污染事件频发,不仅对耕地与农产品质量构成严重威胁,还直接损害了民众身体健康,影响社会稳定^[1]。2012年对广东韶关市仁化县董塘镇3~14岁的儿童进行血铅普查,发现69人中有37人血铅超标^[2]。另一方面,依照现有数据,我国受镉、砷、汞、铜、锌等重金属污染的耕地约有0.1亿hm²,每年因重金属污染的粮食达1000多万t,造成的直接经济损失200余亿元^[3]。中东部部分经济发达地区,以及长三角、珠三角和东北老工业基地周边的土壤重金属污染现象十分突出,“镉大米”等环境事件的频发,也折射出土壤污染治理成为了迫在眉睫需要解决时,需要相关部门进一步加强土壤重金属污染预防和修复工作^[4]。

皮革行业在我国轻工业中占有较重要的地位,特别是随着世界产业结构的调整,我国已经成为世界皮革加工中心及销售中心^[5]。皮革的鞣制方法很多,其中铬鞣制法是目前制革效果最优良的一种方法^[6]。皮革生产制造中产生的重金属污染破坏当地生态平衡,可以使用行业内被应用最频繁的

单项累积指数法对浙江省土壤中的重金属进行科学的评价,得出的数据表明,目前浙江省土壤中的重金属元素Cd、As、Pb、Zn、Cu平均含量均显著高于浙江省土壤背景值。5种重金属超标指数表明浙江省研究区的农业土壤中Cd、Cu等重金属的超标情况已经较为严重;此外,As、Zn、Pb等元素的含量超标状况也不容乐观^[7]。桐乡市是一个以传统工业为主的城镇,其中,皮革产业总体占比较大。但是截至目前,针对桐乡市土壤重金属污染的研究过少,且都是以初步调查和简单污染评价的形式对小范围农田、郊区和工矿企业周边土壤重金属污染现状进行调研,而涉及土壤重金属污染对人体健康危害评估的相关研究鲜见研究。该研究以嘉兴市重点监控企业中的桐乡某2个皮革厂周边土壤为对象,测定春季盛行风东南风下风向不同水平距离及深度处土样中Cd、Pb、Cr、As、Zn、Cu、Co、Ni、Hg 9种元素的含量,并采用地累积指数法和健康风险评价法对重金属污染状况进行评价,以便更详实地了解污染现状、预测污染发展趋势,以期对桐乡市土壤环境质量的预警提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况 此次研究的桐乡市2个皮革厂都位于桐乡市某工业区内,地理位置优越,水资源丰富,坐落于多个村落之间。一号皮革厂是一家传统的制造业公司,主要经营

基金项目 嘉兴市科技局计划项目(2016AY23023);浙江省教育厅项目(Y201839015)。

作者简介 傅晓铎(1995—),女,福建宁德人,研究方向:土壤重金属污染修复。*通讯作者,讲师,博士,从事土壤重金属污染修复研究。

收稿日期 2018-08-09

牛皮沙发革,牛毛皮、羽毛(绒)及其制品的皮革鞣制加工。二号皮革厂经营范围为皮革、皮毛以及皮毛制品,是专注于服装服饰、纺织、皮革行业的民营企业公司。尽管这2个皮革厂已经初具规模,生产工艺先进,但是在带动当地经济增长的同时,也不可避免地在一定程度上损害周围环境。为了完善土地资源的利用、保护人体的健康,该研究根据皮革厂排废排污的一般特点和皮革厂周边具体情况选择了Cd、Pb、Cr、As、Zn、Cu、Co、Ni、Hg 9种常见的重金属元素进行污染评价和健康风险评价。

1.2 样品采集与测定

1.2.1 土壤采集与预处理。表层土壤采样采取网格布点方



图1 采样点分布

Fig.1 Sample point distribution

1.2.2 土样测定。待测土样使用平板消解法消解之后,使用电感耦合等离子体光谱仪(ICP-MS)利用国标法分别测定土壤组成元素中Cd、Pb、Cr、As、Zn、Cu、Co、Ni、Hg 9种元素的含量。

试验所用药剂均在优纯级别,所用试验用品均用10%稀硝酸浸泡24 h后,用超纯水再次洗涤。为保证分析的准确性,试验全程做空白样和并行样,并在测试过程中加入国家标准土壤参比物质(GSS-1)进行质量控制,各种金属的回收率均在国家标准参比物质的允许范围内。

1.3 评价方法

1.3.1 地累积指数法(I_{geo})。地累积指数法是1969年德国科学界Muller^[8]提出用于研究沉积物中重金属的污染程度的一种定量评价方法。该法不但能反映沉积物中重金属的分布特征,还能比较直观判断人为活动对环境的影响^[9],近年来被国内外学者广泛应用于土壤重金属污染的评价,计算公式:

$$I_{geo} = \log_2(C_n/1.5B_n) \quad (1)$$

式中, C_n 为样品中某种重金属含量的测定值,mg/kg; B_n 为参比值,该研究选取嘉兴市土壤背景值,mg/kg。经过系统的计算,地累积指数与污染程度分级标准见表1。

1.3.2 人体健康风险评价法。土壤重金属污染的危害主要

式,此次以嘉兴市2个重点监控皮革厂公司作为调研对象,每个厂根据场地面积采集10个点位,每个点位之间的距离为100 m,2个厂一共采集20个点位,各个点位分别采集0~10、10~20、20~30 cm不同深度的土壤剖面样品3份,整个调研过程共采样60份,采样点见图1。采样时要注意避开外来土层和新近扰动土层,每个采样点采集的土壤均匀混合后采集1~2 kg装进采样袋,同时标明编号。从现场采集完土壤样品并在采集袋上编号之后,要将其带回实验室去除动植物残体等异物并进行一系列的风干、磨碎、过筛、均匀、装袋,为后续的测定试验做好准备。

在于空气中的土壤飞尘进入人体口鼻损害呼吸系统;人类食用受污染的粮食蔬果,从而使重金属进入食物链伤害人体健康;或者通过皮肤直接接触进入人体内循环。皮革厂的周围分布着小面积的农田,日常生产中也排出许多烟尘,这些客观原因让重金属污染三方面的危害被放大。该研究着重于探索重金属对人体健康的致癌风险评价,在此模型中囊括上述3种不同途径危害。

表1 地累积指数与污染程度分级

Table 1 Classification of ground accumulation index and pollution degree

污染等级 Pollution class	I_{geo}	污染程度 Pollution level
0	0	无污染
1	0~1	轻度污染
2	1~2	偏中度污染
3	2~3	中度污染
4	3~4	偏重度污染
5	4~5	严重污染
6	≥5	极重污染

1.3.2.1 暴露评估。土壤飞尘经过呼吸系统而摄入的污染量:

$$EDI_{呼吸} = (CS \times IR_{空气} \times EF \times ED) / (PEF \times BW \times AT) \quad (2)$$

皮肤直接接触而摄入的污染量:

$$EDI_{\text{皮肤}} = (CS \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED) / (BW \times AT) \times 10^{-6} \quad (3)$$

食用粮食蔬果而摄入的污染量:

$$EDI_{\text{食用}} = (CS \times IR_{\text{土壤}} \times EF \times ED) / (BW \times AT) \times 10^{-6} \quad (4)$$

总暴露量:

$$EDI_{\text{总}} = EDI_{\text{呼吸}} + EDI_{\text{皮肤}} + EDI_{\text{食用}} \quad (5)$$

式中, $EDI_{\text{呼吸}}$ 、 $EDI_{\text{皮肤}}$ 、 $EDI_{\text{食用}}$ 、 $EDI_{\text{总}}$ 的单位均为 $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; CS 为金属的含量, mg/kg ; $IR_{\text{空气}}$ 为空气摄入量, m^3/d ; $IR_{\text{土壤}}$ 为

土壤摄入量, m^3/d ; PEF 为土壤尘产生因子, m^3/kg ; SA 为皮肤接触表面积, cm^2/d ; AF 为皮肤的吸收系数, mg/cm^2 ; ABS 为皮肤吸收率, %; EF 为暴露频率, d/a ; ED 为暴露年限, a; BW 为体质量, kg ; AT 为平均作用时间, d。

由于进行暴露评估计算时成人与儿童选取的参数标准具有显著差异性,依据我国现有的场地环境评价导则、USE-PA 健康风险评估法等理论依据,结合近年来国内外各类实际研究结果,这次评价的各类参数取值见表 2。

表 2 暴露评估参数

Table 2 Exposure evaluation parameters

人群 Crowd	$IR_{\text{土壤}}//\text{m}^3/\text{d}$	$IR_{\text{空气}}//\text{m}^3/\text{d}$	EF//d/a	ED//a	SA// cm^2/d	AF// mg/cm^2	ABS//%	PEF// m^3/kg	BW//kg	AT//d
儿童 Children	200	7.5	350	6	1 600	0.07	0.001	1.36×10^9	15.9	致癌 70×365、 非致癌 20×365
成人 Adult	100	15.0	350	30	5 000	0.20	0.001	1.36×10^9	55.9	非致癌 20×365

1.3.2.2 毒性评估与风险表征。此次研究的 9 种重金属中, Cd、Pb、As、Ni 4 种元素同时存在非致癌健康和致癌风险,但由于目前 Pb 的具体致癌毒性参数无从借鉴,所以该

研究仅针对 Cd、As、Ni 探究其致癌健康风险。致癌斜率因子 (SF) 及参考剂量 (RfD) 是健康风险评价中的重要参数, Cd、As 和 Ni 的非致癌和致癌效应毒性参数详见表 3。

表 3 重金属的毒性参数

Table 3 Toxicity parameters of heavy metals

重金属 Heavy metals	RfD _{食用} $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$	RfD _{呼吸} $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$	RfD _{皮肤} $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$	SF $(\text{kg} \cdot \text{d})/\text{mg}$
Cd	1×10^{-2}	1×10^{-3}	1×10^{-5}	3.8×10^{-1}
As	3×10^{-4}	8.6×10^{-5}	1.23×10^{-4}	1.5×10^0
Ni	2×10^{-2}	2.06×10^{-2}	5.4×10^{-3}	8.4×10^{-1}

致癌健康风险评价计算公式如下:

$$\text{Risk}_i = EDI_i \times SF_i \quad (6)$$

$$(\text{Risk})_T = \sum \text{Risk}_i \quad (7)$$

式中, Risk_i 为土壤重金属不同途径下致癌风险指数; $(\text{Risk})_T$ 为土壤重金属致癌风险指数总和; EDI_i 为平均每天不同污染物的日摄入量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; SF_i 为致癌斜率因子, $(\text{kg} \cdot \text{d})/\text{kg}$ 。

一般用一定数量人口出现癌症患者的个数表示致癌健康风险指数 Risk。USEPA 规定, 当 $\text{Risk} < 1 \times 10^{-6}$ 时, 可以认为不存在致癌风险; $\text{Risk} > 1 \times 10^{-6}$, 存在致癌风险; 当 $1 \times 10^{-6} \leq \text{Risk} \leq 1 \times 10^{-4}$, 此时在可接受范围内存在致癌风险。

2 结果与分析

2.1 重金属污染现状及来源分析 重金属由于其毒性和在

环境中的持久性而被列入有害污染物组别^[10]。近年来, 土壤重金属污染以及与其相关的土壤环境质量评价研究越来越引起人们的关注^[11]。在不同土地利用类型中, 稻田土壤中重金属平均含量最高, 果园土壤和菜园土壤次之, 茶园土壤重金属含量平均最低^[12]。该研究以浙江省嘉兴市土壤背景值为对照, 使用超标倍数直观地表达重金属的污染程度, 其中人类活动对重金属含量的影响用变异系数表示。为了解皮革厂周边土壤各类重金属的污染现状、探究春季盛行风下风向区域距污染源远近不同所产生的污染程度分布差异, 分别测定了两厂研究区域内西北方向以网格布点法均匀布点的点位金属含量, 所得结果详见表 4~5 及图 2~3。

表 4 皮革一厂表层土壤 (0~10 cm) 重金属含量

Table 4 Heavy metal content in surface soil (0~10 cm) of No. 1 leather factory

重金属 Heavy metal	检测范围 Detection range// mg/kg	平均值 Mean value mg/kg	变异系数 Variable coefficient//%	超标率 Over standard rate//%	平均值超标倍数 Average over standard multiple	嘉兴市土壤背景值 Soil background value of Jiaxing City// mg/kg
Cd	2.51~9.97	5.058	42	100	16.86	0.065
Pb	4.53~7.63	5.712	16	0	0	24.0
Cr	17.22~38.05	23.548	24	0	0	54.5
As	0.96~4.70	2.716	48	0	0	10.2
Zn	22.21~33.24	26.992	12	0	0	74.9
Cu	6.01~12.96	9.423	24	0	0	21.0
Co	20.24~54.52	23.289	86	20	0	14.65
Ni	6.45~31.70	22.845	39	0	0	27.6
Hg	0.64~3.54	1.539	71	80	5.13	0.069

表 5 皮革二厂表层土壤(0~10 cm)重金属含量

Table 5 Heavy metal content in surface soil (0~10 cm) of No.2 leather factory

重金属 Heavy metal	检测范围 Detection range//mg/kg	平均值 Mean value mg/kg	变异系数 Variable coefficient//%	超标率 Over standard rate//%	平均值超标倍数 Average over standard multiple	嘉兴市土壤背景值 Soil background value of Jiaxing City//mg/kg
Cd	1.21~10.00	4.353	66	90	14.51	0.065
Pb	3.78~9.60	6.855	27	0	0	24.0
Cr	11.50~36.83	23.552	27	0	0	54.5
As	1.12~4.37	2.522	37	0	0	10.2
Zn	20.10~36.38	30.198	18	0	0	74.9
Cu	7.42~14.62	10.651	22	0	0	21.0
Co	0.52~73.52	28.454	77	30	0	14.65
Ni	12.46~31.88	20.657	47	0	0	27.6
Hg	0.56~2.47	1.074	77	80	3.58	0.069

土壤重金属污染除自然因素外,还与现代工矿业和农业的生产以及人类的活动影响有关,这是造成土壤重金属污染的主要原因^[13]。从表4可以看出,被测定的9种重金属在皮革一厂表层土壤中Cd、Co、Hg3种重金属超标,Cd的超标率为100%,Hg的超标率为80%,Co的超标率最低,仅为20%。从表5可以看出,被测定的9种重金属在皮革二厂的表层土壤中依旧是以上3种重金属超标,Cd的超标率为90%,Hg的超标率为80%,Co的超标率仍然最低,仅为30%。以上表格内数据,变异系数越大,反映人类活动对重金属含量的影响程度越深,一旦变异系数超过30%,表明此类金属受人为影响已经相当严重。9种重金属在皮革一厂变异系数从小到大顺序依次为Zn、Pb、Cr(Cu)、Ni、Cd、As、Hg、Co;其中Co的变异系数达86%,为强变异,由此可知Co的含量受人类活动影响特别严重;除Zn、Pb、Cr、Cu外,其余4种元素变异系数均超过30%,所以皮革一厂周边土壤重金属含量受人为影响相当严重。皮革二厂变异系数从小到大顺序依次为Zn、Cu、Pb(Cr)、As、Ni、Cd、Hg(Co),其中Co和Hg的变异系数均达77%,属于强变异,这2种元素的含量受人类活动影响特别严重;除Zn、Pb、Cr、Cu外,其余3种元素变异系数也都超过30%。总体而言,2个皮革厂厂区周边土壤重金属污染程度与人类活动频繁密切相关。

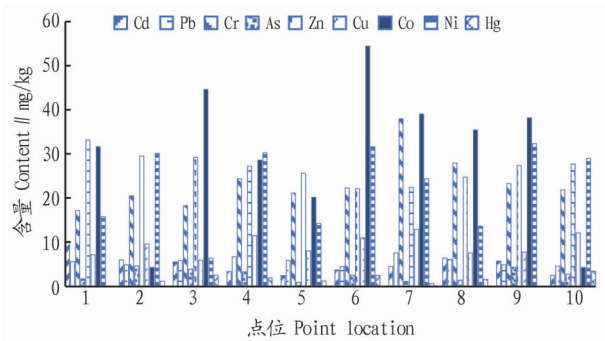


图 2 皮革一厂不同点位土壤表层重金属含量

Fig. 2 Heavy metal content in soil surface at different points in No. 1 leather factory

从整体数据以及分布图来看,所有采样点的各种重金属元素浓度在土壤中的区域分布不存在一定规律性,大量数据

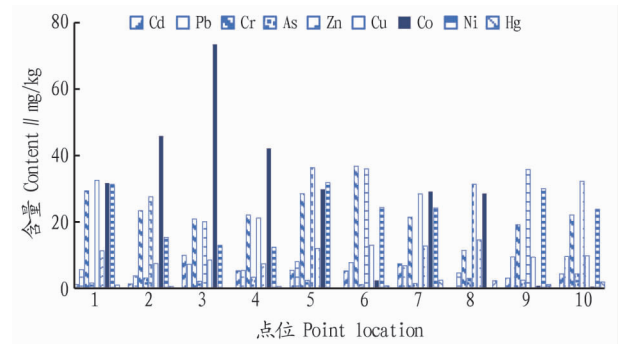


图 3 皮革二厂不同点位土壤表层重金属含量

Fig. 3 Heavy metal content in soil surface at different points in No. 2 leather factory

也很难得出区域分布情况。在2个皮革厂研究区域内,采样点的Pb、Cr、As、Zn、Cu、Ni元素浓度值整体都十分正常,超标率和平均超标值都为0,处于浓度极低且非常安全的状态。Co在表层土壤中出现极个别的超标情况,且情况不是很严重,从高值的变异系数可以看出其含量的多少与人类活动紧密相关。经过比较可知,皮革一厂周边表层土壤镉在任意采样点都大大超过《土壤环境质量标准(GB 15618—1995)》二级标准所规定的各类元素标准值限值,平均值超标倍数为16.86倍,污染最严重的采样点1Cd浓度含量(9.97 mg/kg)超过背景值甚至高达153倍之多,超过标准值33倍。皮革二厂的Cd元素也大部超标,平均值超标倍数为5.13倍。2个厂中,Hg的超标率和变异系数都在一个高水平值,可见受人为影响十分严重。较其他行业而言,皮革类工厂的污染主要集中在Cd和Hg的污染^[14]。2个厂之间虽然距离较远,但工艺和材料的相似性导致污染状况极度相似。从上述2个厂的工艺流程以及能查到的资料,与试验数据相结合来看,能推测出皮革厂整体生产工艺复杂,工序繁琐,原材料可能存在Cd和Hg的各自的化合物,加工分离释放出大量的相关重金属,皮革厂未处理最终的废水废气或处理不到位直接将其排放于大自然中,另一方面可以推测出绝大多数皮革厂的工艺所需原材料等附着着的Cd和Hg的量非常大,没有进行有效处理附着物之后就进行对原材料的使用。因为Hg的毒性很强,致死剂量低,所以我国针对各类功能水都做出了与之

对应的具体要求,饮用水、灌溉水含 Hg 必须在 0.001 mg/L 以内,渔业用水最高 0.005 mg/L^[15]。此外,人体对甲基汞虽然有一定的排泄消解能力,但是成年人的每天摄入量若超过 0.025 mg,它就开始危害人体的健康^[16],例如日本的水俣病,就是成年人过量吸收甲基汞,导致在脑内疯狂累积^[17]。正常土壤的含 Cd 量为 0.01~2.00 mg/kg,平均为 0.35 mg/kg,一旦长期超标,将严重影响人体的安全^[18]。“镉米”“镉菜”是重金属 Cd 在农作物体内残留的产物,骨痛病与人类长期食用这类受污染的农作物之间有密不可分的联系^[19]。Cd 污染的危害不仅限于此,它还让人体内部器官发生不同程度的质变,引起糖尿病、心血管方面的疾病等^[20]。另外,重金属 Cd 污染致癌、致畸、致突变方面的报道也层出不穷。经过调查得知,在我国贵州赫章、江西赣州、广西桂林、湖南衡东、广东马坝和辽宁张土地区,农作物 Cd 含量超标,10%以上居民

已出现不同程度腰背、四肢、骨关节疼痛等症状^[21]。

桐乡市常年主导风向为东南风,该研究在皮革厂的西北方位以网格布点法均匀布设点位,所有采样点的各种重金属元素浓度在土壤中的区域分布不存在一定规律性,大量数据也很难得出区域分布情况。产生这种现象主要存在 3 个方面的原因:①其他企业排污的干扰;② 2 个厂分别处于工业园区及小镇边缘,人口虽然不多,但是存在农田用地,且人类活动频繁,工业园区也伴随着发展开始开疆拓土,绿地、空地以及农田小路有翻新进行建设的可能性;③桐乡市常年强风天气,重金属容易随大气沉降距离更远的地方。风向对土壤重金属的区域性分布无显著影响。

2.2 地累积指数评价 采用地累积指数法对皮革厂周边土壤中 9 种重金属进行总体评价,各类重金属浓度在土壤中纵向评价结果分别见表 6~7 和图 4。

表 6 皮革一厂周边土壤重金属污染地累积指数分级

Table 6 Classification of land accumulation index of heavy metal pollution in soil around No. 1 leather factory

重金属 Heavy metal	地累积指数 Land accumulation index(I_{geo})	各样本比例 Each sample proportion/%						
		0 级	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级	6 级
		Level 0	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5	Level 6
Cd	8.83	0	0	0	3.3	0	33.3	63.4
Pb	0.67	100	0	0	0	0	0	0
Cr	1.47	100	0	0	0	0	0	0
As	0.82	100	0	0	0	0	0	0
Zn	1.59	100	0	0	0	0	0	0
Cu	1.72	100	0	0	0	0	0	0
Co	2.84	66.8	26.6	6.6	0	0	0	0
Ni	2.64	93.4	6.6	0	0	0	0	0
Hg	6.97	13.3	6.6	6.6	6.6	40.0	20.0	6.9

表 7 皮革二厂周边土壤重金属污染地累积指数分级

Table 7 Classification of land accumulation index of heavy metal pollution in soil around No. 2 leather factory

重金属 Heavy metal	地累积指数 Land accumulation index(I_{geo})	各样本比例 Each sample proportion/%						
		0 级	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级	6 级
		Level 0	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5	Level 6
Cd	8.88	13.3	0	0	0	6.6	6.6	73.5
Pb	0.92	100	0	0	0	0	0	0
Cr	1.59	100	0	0	0	0	0	0
As	0.96	100	0	0	0	0	0	0
Zn	1.37	100	0	0	0	0	0	0
Cu	2.01	96.7	3.3	0	0	0	0	0
Co	3.43	40	46.7	13.3	0	0	0	0
Ni	2.67	93.4	3.3	3.3	0	0	0	0
Hg	7.10	16.6	3.3	3.3	16.6	26.6	26.6	7.0

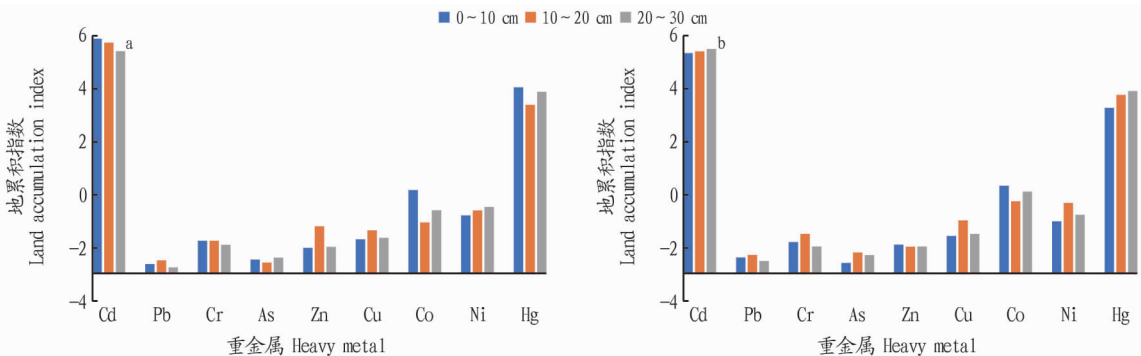


图 4 皮革一厂(a)和皮革二厂(b)土壤重金属地累积指数垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution of soil heavy metal land accumulation index in No. 1 (a) and No. 2 (b) of leather factory

从表 6~7 和图 4 可以看出,皮革一厂周边土壤重金属地累积指数 I_{geo} 从大到小的排序为 Cd、Hg、Co、Ni、Cu、Zn、Cr、As、Pb,皮革二厂周边土壤重金属 I_{geo} 从大到小顺序为 Cd、Hg、Co、Ni、Cu、Cr、Zn、As、Pb。Cd 在一厂的地累积指数最高为 8.83, Hg 的最高值为 6.97; 随着土壤深度增加, Cd 的含量逐渐降低, 而 Hg 未表现出任何规律; 在 0~10 cm 处, Co 存在轻度污染, Ni 也存在部分点位轻污染, 其余重金属元素地累积指数平均值均小于 0, 总体处于无污染水平, 且含量变化在纵向上没有明显规律可循; 在研究区域内, Hg 的地累积指数变化最大, 13.3% 处于无污染水平, 66.9% 的土样为偏重污染到极重污染水平。Cd 在二厂的地累积指数最高为 8.88, Hg 的最高值为 7.10; 随着土壤深度增加, 两类重金属污染严重程度均在加深; 在 0~10、20~30 cm 处 Co 存在轻度污染, Ni 存在部分点位轻污染, 其中重金属污染在纵向没有表现出特定规律, 且其余重金属地累积指数平均值均在 0 以下, 处于无污染水平。可见, 两厂周边土壤几乎都存在重度的 Cd 和 Hg 混合污染, 轻度的部分 Co、Ni 污染。

由上述分析可知, 针对此次调查的桐乡市皮革一厂和桐乡市皮革二厂的实测结果进行地累积评价, 了解到工厂的周遭土壤中重金属元素的垂直分布无特殊情况且不存在一定

的相关规律。Cd 和 Hg 在皮革二厂特别出现的随土壤纵向深度加深重金属含量也增多的规律, 多半为重金属在表层土壤中向下渗透的结果, 且大多数金属都在深层 (20~30 cm) 处含量较高, 因此, 应当着重注意对深层土壤的防治。该研究测定的 9 种重金属中, 选取典型污染重金属 Cd、As、Co、Ni、Hg 进行人体健康风险评估。

2.3 健康风险评估

2.3.1 暴露评估分析。 该研究针对 Cd、As、Co、Ni、Hg 5 种重金属对儿童和成人的致癌日暴露评估进行计算, 具体结果详见表 8~9。

由表 8~9 可知, 3 种途径的重金属日摄入量从大到小依次为 $EDI_{食用}$ 、 $EDI_{皮肤}$ 、 $EDI_{呼吸}$, 且食用的摄入量远高于经呼吸系统吸入和皮肤直接接触的重金属含量。成人经 3 种途径摄入的重金属含量均高于儿童。皮革一厂范围内, 暴露剂量在成人食用摄入 Ni 元素时为最高值, 其值为 $9.68 \times 10^{-5} \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$, 儿童经呼吸系统摄入 Cd 的含量最小, 暴露剂量最小值为 $1.71 \times 10^{-11} \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 。在皮革二厂, 暴露剂量在成人食用摄入 Co 元素时为最高值, 其值为 $1.25 \times 10^{-4} \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$, 儿童经呼吸系统摄入 As 的含量最小, 暴露剂量最小值为 $2.76 \times 10^{-11} \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 。

表 8 皮革一厂土壤重金属致癌日暴露量

Table 8 Daily exposure of heavy metal carcinogenesis in No. 1 leather factory

mg/(kg·d)

重金属 Heavy metal	分类 Classification	$EDI_{呼吸}$		$EDI_{皮肤}$		$EDI_{食用}$		$EDI_{总}$	
		儿童 Children	成人 Adult	儿童 Children	成人 Adult	儿童 Children	成人 Adult	儿童 Children	成人 Adult
Cd	最大	2.85×10^{-10}	1.88×10^{-9}	5.76×10^{-9}	1.73×10^{-7}	1.03×10^{-5}	1.71×10^{-5}	1.03×10^{-5}	1.73×10^{-5}
	最小	1.71×10^{-11}	3.59×10^{-10}	3.47×10^{-10}	1.04×10^{-8}	0.62×10^{-6}	1.03×10^{-6}	6.2×10^{-7}	1.04×10^{-6}
	平均	1.26×10^{-10}	7.57×10^{-10}	2.58×10^{-9}	7.7×10^{-8}	4.56×10^{-6}	7.57×10^{-6}	4.56×10^{-6}	7.65×10^{-6}
As	最大	1.30×10^{-9}	1.4×10^{-9}	4.28×10^{-9}	1.29×10^{-7}	7.64×10^{-6}	1.26×10^{-5}	7.64×10^{-6}	1.27×10^{-5}
	最小	1.91×10^{-11}	1.27×10^{-10}	3.87×10^{-10}	1.16×10^{-8}	0.69×10^{-6}	1.16×10^{-6}	0.69×10^{-6}	1.17×10^{-6}
	平均	7.68×10^{-11}	5.1×10^{-10}	1.56×10^{-9}	4.69×10^{-8}	2.77×10^{-6}	4.69×10^{-6}	2.77×10^{-6}	4.73×10^{-6}
Co	最大	1.11×10^{-9}	1.03×10^{-8}	3.15×10^{-8}	9.48×10^{-7}	4.03×10^{-5}	9.32×10^{-5}	4.03×10^{-5}	9.42×10^{-5}
	最小	0	0	0	0	0	0	0	0
	平均	4.49×10^{-10}	2.97×10^{-9}	9.11×10^{-9}	2.74×10^{-7}	1.62×10^{-5}	2.69×10^{-5}	1.62×10^{-5}	2.71×10^{-5}
Ni	最大	9.28×10^{-10}	1.07×10^{-8}	3.27×10^{-8}	7.24×10^{-7}	5.83×10^{-5}	9.68×10^{-5}	5.83×10^{-5}	9.75×10^{-5}
	最小	2.79×10^{-10}	1.22×10^{-9}	3.73×10^{-9}	1.12×10^{-7}	6.64×10^{-6}	1.68×10^{-5}	6.64×10^{-6}	1.69×10^{-5}
	平均	7.35×10^{-10}	4.87×10^{-9}	1.49×10^{-8}	4.48×10^{-7}	2.65×10^{-5}	4.41×10^{-5}	2.65×10^{-5}	4.45×10^{-5}
Hg	最大	1.18×10^{-10}	7.84×10^{-10}	2.39×10^{-9}	6.15×10^{-8}	3.64×10^{-6}	4.41×10^{-6}	3.64×10^{-6}	4.47×10^{-6}
	最小	0	0	0	0	0	0	0	0
	平均	3.69×10^{-11}	2.45×10^{-10}	7.49×10^{-10}	2.25×10^{-8}	1.33×10^{-6}	2.21×10^{-6}	1.33×10^{-6}	2.23×10^{-6}

表 9 皮革二厂土壤重金属致癌日暴露量

Table 9 Daily exposure of heavy metal carcinogenesis in No. 2 leather factory

mg/(kg·d)

重金属 Heavy metal	分类 Classification	$EDI_{呼吸}$		$EDI_{皮肤}$		$EDI_{食用}$		$EDI_{总}$	
		儿童 Children	成人 Adult	儿童 Children	成人 Adult	儿童 Children	成人 Adult	儿童 Children	成人 Adult
Cd	最大	2.29×10^{-10}	1.61×10^{-9}	4.92×10^{-9}	1.48×10^{-7}	8.77×10^{-6}	1.45×10^{-5}	8.77×10^{-6}	1.46×10^{-5}
	最小	0	0	0	0	0	0	0	0
	平均	1.31×10^{-10}	1.61×10^{-10}	2.65×10^{-9}	7.99×10^{-8}	4.73×10^{-6}	7.85×10^{-6}	4.73×10^{-6}	7.93×10^{-6}
As	最大	1.41×10^{-10}	2.43×10^{-9}	7.43×10^{-9}	2.23×10^{-7}	1.32×10^{-5}	2.19×10^{-5}	1.32×10^{-5}	2.21×10^{-5}
	最小	2.76×10^{-11}	1.83×10^{-10}	5.61×10^{-10}	1.68×10^{-8}	0.99×10^{-6}	1.66×10^{-6}	0.99×10^{-6}	1.68×10^{-6}
	平均	8.51×10^{-11}	5.64×10^{-10}	1.72×10^{-9}	5.19×10^{-8}	3.08×10^{-6}	5.11×10^{-6}	3.08×10^{-6}	5.16×10^{-6}
Co	最大	2.09×10^{-9}	1.38×10^{-8}	4.24×10^{-8}	1.27×10^{-6}	7.57×10^{-5}	1.25×10^{-4}	7.57×10^{-5}	1.26×10^{-4}
	最小	0	0	0	0	0	0	0	0
	平均	6.79×10^{-10}	4.50×10^{-9}	1.37×10^{-8}	4.14×10^{-7}	2.45×10^{-5}	4.07×10^{-5}	2.45×10^{-5}	4.11×10^{-5}
Ni	最大	2.53×10^{-9}	1.68×10^{-8}	2.18×10^{-8}	1.54×10^{-6}	9.15×10^{-5}	6.85×10^{-5}	9.15×10^{-5}	7.00×10^{-5}
	最小	0	0	0	0	0	0	0	0
	平均	7.52×10^{-10}	4.99×10^{-9}	1.53×10^{-8}	4.59×10^{-7}	2.72×10^{-5}	4.52×10^{-5}	2.72×10^{-5}	4.57×10^{-5}
Hg	最大	21.4×10^{-10}	9.60×10^{-10}	2.94×10^{-9}	8.84×10^{-8}	5.23×10^{-6}	8.68×10^{-6}	5.23×10^{-6}	8.77×10^{-6}
	最小	0	0	0	0	0	0	0	0
	平均	4.05×10^{-11}	2.69×10^{-10}	8.23×10^{-10}	2.47×10^{-8}	1.47×10^{-6}	2.44×10^{-6}	1.47×10^{-6}	2.46×10^{-6}

2.3.2 健康风险评价。由表 10 可知,皮革一厂研究范围内,Cd 的致癌健康风险指数(Risk)最大值均通过食用摄入,其中儿童为 1.73×10^{-6} ,成人为 2.88×10^{-6} ,均在致癌风险可接受范围内;Cd 的 Risk 最小值均为呼吸吸入,其中儿童为 4.78×10^{-11} ,成人为 2.88×10^{-10} ,均不存在致癌可能性。As、Ni 在单一途径上的致癌风险表现与 Cd 类似,在 3 种不同的接触途径下,成人 Risk 均高于儿童,且成人和儿童的 Risk 最大值均出现在通过食用摄入途径下,As 为成人 7.04×10^{-6} 和儿童 4.16×10^{-6} ,Ni 为成人 3.70×10^{-5} 和儿童 2.23×10^{-5} ,致癌风险在可接受范围内。由表可知,3 类重金属元素的成人健康风险指数在 3 种接触途径下均高于儿童,且总致癌健康风险指数也高于儿童。综上所述,单一途径及 3 种途径共同作用下 Cd、As、Ni 的致癌风险均在可接受范围内,但已存在潜在致癌风险,应对其排放加以控制。

表 10 皮革一厂重金属致癌风险评价指数

Table 10 Risk assessment index of heavy metal carcinogenesis in No. 1 leather factory

重金属 Heavy metal	Risk _{呼吸}		Risk _{皮肤}		Risk _{食用}		(Risk) _T	
	儿童 Children	成人 Adult	儿童 Children	成人 Adult	儿童 Children	成人 Adult	儿童 Children	成人 Adult
Cd	4.78×10^{-11}	2.88×10^{-10}	9.80×10^{-10}	2.93×10^{-8}	1.73×10^{-6}	2.88×10^{-6}	1.73×10^{-6}	2.91×10^{-6}
As	1.15×10^{-10}	7.65×10^{-10}	2.34×10^{-9}	7.04×10^{-8}	4.16×10^{-6}	7.04×10^{-6}	4.16×10^{-6}	7.10×10^{-6}
Ni	6.17×10^{-10}	4.09×10^{-9}	1.25×10^{-8}	3.76×10^{-7}	2.23×10^{-5}	3.70×10^{-5}	2.23×10^{-5}	3.74×10^{-5}

表 11 皮革二厂重金属致癌风险评价指数

Table 11 Risk assessment index of heavy metal carcinogenesis in No. 2 leather factory

重金属 Heavy metal	Risk _{呼吸}		Risk _{皮肤}		Risk _{食用}		(Risk) _T	
	儿童 Children	成人 Adult	儿童 Children	成人 Adult	儿童 Children	成人 Adult	儿童 Children	成人 Adult
Cd	4.98×10^{-11}	4.12×10^{-11}	1.01×10^{-9}	3.04×10^{-9}	1.80×10^{-6}	2.98×10^{-6}	1.80×10^{-6}	3.01×10^{-6}
As	1.28×10^{-10}	8.46×10^{-10}	2.58×10^{-9}	7.78×10^{-9}	4.62×10^{-6}	7.66×10^{-6}	4.62×10^{-6}	7.74×10^{-6}
Ni	6.32×10^{-10}	4.19×10^{-9}	1.28×10^{-9}	3.86×10^{-7}	2.28×10^{-5}	3.80×10^{-5}	2.28×10^{-5}	3.84×10^{-5}

3 结论

(1) 桐乡市某皮革一厂表层土壤中 Cd、Co、Hg 3 种重金属超标,Cd 的超标率为 100%,Hg 的超标率为 80%,Co 的超标率最低,仅为 20%。皮革二厂的表层土壤中依旧是以上 3 种重金属超标,Cd 的超标率为 90%,Hg 的超标率为 80%,Co 的超标率仅为 30%。在 2 个厂区研究区域内,除 Zn、Pb、Cr、Cu 外,其余 5 种元素变异系数均超过 30%,可见人类活动对该地重金属污染程度有很大的影响。2 个厂受污染情况相似,但区域分布情况无明显特征规律,风向对该区域的重金属分布影响微乎其微。

(2) 皮革一厂周边土壤重金属地累积指数 I_{geo} 从大到小的排序为 Cd、Hg、Co、Ni、Cu、Zn、Cr、As、Pb。皮革二厂周边土壤重金属 I_{geo} 从大到小顺序为 Cd、Hg、Co、Ni、Cu、Cr、Zn、As、Pb。Cd、Hg 处于偏严重污染-严重污染,Co、Ni 处于无污染-偏中度污染,Pb、Cr、As、Zn、Cu 为无污染,并且各金属的污染程度没有随土壤深度的增加而减轻,在纵向分布上没有呈现出一定的规律性。

(3) 在两厂的研究区域内,Cd、As、Ni 3 类重金属元素致癌风险虽然均在可接受范围内,但都已存在潜在致癌风险,应该对其排放量加以控制,予以高度重视和防治。

参考文献

[1] 中国工程院,环境保护部等. 中国环境宏观战略研究[M]. 北京:中国环

境科学出版社,2011.

由表 11 可知,在皮革二厂研究区域内,Cd 的致癌健康风险指数(Risk)最大值均通过食用摄入,其中儿童为 1.80×10^{-6} ,成人为 2.98×10^{-6} ,均在致癌风险可接受范围内;Cd 的 Risk 最小值均为呼吸吸入,其中儿童为 4.98×10^{-11} ,成人为 4.12×10^{-11} ,均不存在致癌可能性。As、Ni 在单一途径上的致癌风险表现与 Cd 类似,且成人和儿童的 Risk 最大值均出现在通过食用摄入途径下,As 为成人 7.66×10^{-6} 和儿童 4.62×10^{-6} ,Ni 为成人 3.80×10^{-5} 和儿童 2.28×10^{-5} ,致癌风险在可接受范围内。由表中大部分数据可知,3 类重金属元素的成人健康风险指数在 3 种接触途径下均高于儿童,且总致癌健康风险指数也高于儿童。综上所述,单一途径及 3 种途径共同作用下 Cd、As、Ni 的致癌风险均在可接受范围内,但已存在潜在致癌风险,应对其排放加以控制。

境科学出版社,2011.

- [2] 李凌,仁宣. 广东韶关仁化 37 名儿童血铅超标 政府介入调查病因 [EB/OL]. (2012-02-23) [2018-07-20]. <http://news.cntv.vn/china/20120223/105763.shtml>.
- [3] 中国科学院学部. 我国土壤重金属污染问题与治理对策[R]. 2013.
- [4] 赵铭. 土壤重金属污染现状、原因、危害及修复研究[J]. 资源节约与环保,2016(4):181,184.
- [5] 崔源,郑国栋,栗天标,等. 海上石油设施溢油风险管理与防控研究[J]. 油气田环境保护,2010,20(4):29-33.
- [6] 杨建洲,强西怀. 皮革化学品[M]. 北京:中国石化出版社,2001:27-33.
- [7] 尹佳吉,郑喜坤. 浙江省土壤重金属污染评价研究[J]. 世界有色金属,2015(12):116-117.
- [8] MÜLLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. Geological journals,1969,2: 108-118.
- [9] 范拴喜,甘卓亭,李美娟,等. 土壤重金属污染评价方法进展[J]. 中国农学通报,2010,26(17):310-315.
- [10] BOAMPONSEM L K, ADAM J I, DAMPARE S B, et al. Assessment of atmospheric heavy metal deposition in the Tarkwa gold mining area of Ghana using epiphytic lichens[J]. Nuclear instruments and methods in physics research section B,2010,268(1):1492-1501.
- [11] 赵其国,孙波,张桃林. 土壤质量与持续环境 I. 土壤质量的定义及评价方法[J]. 土壤,1997(3):113-120.
- [12] 程街亮,史舟,朱有为,等. 浙江省优势农产区土壤重金属分异特征及评价[J]. 水土保持学报,2006,20(1):103-107.
- [13] 赵美微,塔莉,李萍. 土壤重金属污染及其预防、修复研究[J]. 环境科学与管理,2007,32(6):70-72.
- [14] 王世纪,罗杰,李向远,等. 浙江省海宁市制革企业镉污染对生态环境的影响[J]. 安徽农业科学,2009,37(23):11101-11103.
- [15] 所芳,贾锐土. 土壤重金属污染研究现状[J]. 中国西部科技,2009,8(16):53-55.

(下转第 145 页)

苏云金杆菌防治油茶织蛾效果一般,所使用最高浓度的 50 倍液防治效果仅为 38.06%,虫口减退率也仅为 33.83%。

表 5 药剂防治油茶织蛾的效果

Table 5 Control effect of potion on *Casmara patrona*

药剂 Potion	浓度 Concentration	幼虫数 Number of larvae//头		危害率 Damage rate//%		虫口减退率 Decrease rate//%	平均防效 Average control effect//%
		防治前 Before prevention and control	防治后 After prevention and control	防治前 Before prevention and control	防治后 After prevention and control		
苏云金杆菌	1:50	269	178	39.28	24.33	33.83	38.06 dD
<i>Bacillus thuringiensis</i>	1:100	333	246	37.16	31.01	26.13	16.55 dD
	1:200	411	337	41.33	36.43	18.00	11.86 dD
森得保	1:300	293	29	43.91	5.37	90.10	90.05 aA
Sendebao	1:500	384	87	29.28	7.21	77.34	78.79 bB
	1:1 000	336	101	37.66	12.18	69.94	70.31 bB
对照 Control		417	474	—	—	—	— eE

注:同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$);不同大写字母表示差异极显著($P < 0.01$)

Note: Different lowercase letters mean significant differences at 0.05 level; different capital letters mean extremely significant differences at 0.01 level

3 结论与讨论

油茶织蛾是山茶科树种重要的钻蛀性害虫之一,因其危害隐蔽,防治难度加大,国内外对其防治技术的研究较少,所提出的防治技术也以化学防治为主。巢军等^[14]、周慧平等^[15]提出了灯光诱杀、用脱脂棉沾 80%敌敌畏乳油堵孔等方法防治油茶织蛾的建议;沈忠优等^[15]提出了在油茶叶面喷施三唑磷乳油、20%杀螟硫磷乳油防治成虫,在虫道内注射敌敌畏乳油或 40%乐果乳油毒杀幼虫等方法。但上述方法对化学药剂的依赖性强,且多为有机磷类药剂,对于茶油的生产、天敌及环境会造成威胁。该研究选用苏云金杆菌和森得保 2 种生物制剂进行油茶织蛾防治,安全、环境友好,且于 7 月上旬利用森得保 300 倍液喷雾,防效能达 90%以上。

生物防治是林业有害生物防控的重要手段,也是符合生态、有机、环境友好型的防治技术^[17]。谷平等^[13]调查不同生境下油茶织蛾幼虫的天敌,共查获长体茧蜂、线长体茧蜂、油茶织蛾距茧蜂和大螟钝唇姬蜂 4 种天敌,以长体茧蜂为主。其中,在江西峡江戈坪地区寄生率达 31%。该研究也饲养出了油茶织蛾的天敌,但寄生率不足 10%,这可能与环境及油茶经营管理措施相关。

油茶织蛾是油茶的重要害虫,利用森得保、阿维菌素等生物制剂具有很好的控制效果,可以在生产中进行推广。同时,油茶织蛾天敌种类丰富,保护油茶林地的生物多样性,少施用高毒的化学药剂,提高寄生性天敌的丰度,是实现油茶织蛾物防治的重要途径。

参考文献

- [1] 庄瑞林. 中国油茶[M]. 北京:中国林业出版社,2008:54-55.
- [2] 彭邵锋,陆佳,陈永忠,等. 油茶品种资源现状与良种筛选技术[J]. 经济林研究,2012,30(4):174-179.
- [3] 王斌,王开良,董杰浩,等. 我国油茶产业现状及发展对策[J]. 林业科技开发,2011,25(2):11-15.
- [4] 陈永忠,罗健,王瑞,等. 中国油茶产业发展的现状与前景[J]. 粮食科技与经济,2013,38(1):10-12.
- [5] 梁明政. 百色市油茶产业精准扶贫现状与对策探讨[J]. 南方农业,2016,10(24):118-119.
- [6] 邓三龙. 把油茶产业打造成为扶贫攻坚的利器[J]. 林业与生态,2016(11):4-6.
- [7] 华正媛,王井田,刘剑,等. 衢州市油茶害虫及天敌种类调查[J]. 浙江农林大学学报,2012,29(2):232-243.
- [8] 李密,周刚,彭争光,等. 湖南油茶害虫风险性评估及危险性等级划分[J]. 中国农学通报,2014,30(19):277-283.
- [9] 韦春义,马英玲. 我国油茶软腐病的风险分析与控制技术[J]. 安徽农业科学,2010,38(22):18187-18189.
- [10] 向坚成. 油茶蛀茎虫(*Casmara patrona* Meyrick)的初步观察[J]. 昆虫知识,1964,8(4):175-176.
- [11] 沈光普. 油茶织蛾的生物学特性和防治研究[J]. 森林病虫通讯,1979(4):127-129.
- [12] 李苗苗,舒金平,王井田,等. 油茶织蛾生物学特性研究[J]. 林业科学研究,2015,28(6):900-905.
- [13] 谷平,黄敦元,宋墩福,等. 不同生境下油茶蛀茎虫的危害程度及寄生率的比较[J]. 经济林研究,2017,35(1):124-128.
- [14] 巢军,卢进,涂业苟,等. 油茶茶枝镰蛾的生物学特性及防治[J]. 江西植保,2007,30(2):89-90.
- [15] 周慧平,陈艺欢,肖铁光,等. 油茶茶枝镰蛾部分生物学特性观察及防治[J]. 作物研究,2013,27(4):365-366.
- [16] 沈忠优,欧阳峰林,孙颖. 油茶蛀茎虫防治新方法[J]. 南方林业科学,2018,46(2):32-34.
- [17] 党英侨,王小艺,杨志岐. 天敌昆虫在我国林业害虫生物防治上的研究进展[J]. 环境昆虫学报,2018,40(2):242-255.

(上接第 86 页)

- [16] 孙宏飞,马正学,宁应之,等. 皮革废水污染的土壤原生动物生态效应[J]. 甘肃科学学报,2007,19(1):82-84.
- [17] 王菲菲,孔蕾. 浅谈土壤环境中的重金属污染危害问题[J]. 化工管理,2013(24):6.
- [18] 林凡华,陈海博,白军. 土壤环境中重金属污染危害的研究[J]. 环境

科学与管理,2007,32(7):74-76.

- [19] 蔡美芳,李开明,谢丹平,等. 我国耕地土壤重金属污染现状与防治对策研究[J]. 环境科学与技术,2014,37(S2):223-230.
- [20] 李恩临,陈传星,康孝友,等. 水头镇农田土壤及稻米重金属污染评价[J]. 环境科学导刊,2009,28(4):68-70.
- [21] 周建军,周桔,冯仁国. 我国土壤重金属污染现状与治理战略[J]. 中国科学院院刊,2014,29(3):315-320,350.