

西南地区典型坡耕地农作物风险评价及土壤中 Cd 的特征研究

吴鹏盛, 林勇征* (四川省天晟源环保股份有限公司, 四川成都 610059)

摘要 通过对万源市 4 个乡镇的耕地土壤进行重金属污染特征调查, 探究研究区农作物中重金属含量与土壤污染的相关性。结果表明, 引起土壤污染的重金属并不能全部迁移转化进入农作物中, 且土壤污染严重地区的农作物中重金属含量处于食用安全限值以内, 两者之间并没有明显的相关性。研究区 4 个乡镇土壤重金属污染程度从大到小依次为庙子乡>大竹镇>旧院镇>白羊乡, 庙子乡玉米、马铃薯、四季豆、茶叶、花生中 As、Cd、Pb 等有害重金属含量均未超标, 可以安全食用。但若长期大量食用庙子乡种植的农作物, 谷类作物中的 Cd 和叶菜类蔬菜中的 Pb 可能会在人体中富集, 对人体健康造成危害。对影响土壤中 Cd 含量的因素研究结果显示, 土壤 Cd 含量高低受到地层、成土母岩、土壤酸碱度的影响。

关键词 坡耕地; 农作物; 风险评价; 重金属; 污染

中图分类号 X53; P66 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2023)02-0085-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.02.021



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Risk Assessment of Crops and Study on the Characteristic of Cd in Soil of Typical Sloping Farmland in Southwest China

WU Peng-sheng, LIN Yong-zheng (Sichuan Tianshengyuan Environmental Services Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610059)

Abstract The correlation between heavy metal content in crops and soil pollution in the study area was explored by investigating the characteristics of heavy metal pollution in cultivated soil of four towns in Wanyuan City. The results showed that the heavy metal leads to soil pollution could not migrate and transfer into crops fully, and the contents of heavy metal in the crops was within the safe limits in the area where soil was polluted badly, there was no obvious correlation between them. The pollution degree of heavy metals in the soil of the four townships in the study area was Miaozi Township>Dazhu Town>Jiuyuan Town>Baiyang Township in descending order. The harmful heavy metal, such as As, Cd, Pb of corn, potatoes, kidney beans, tea leaf and peanuts in the Miaozi Township was not exceed standard, and were safe to eat. However if people eat the crops planted in Miaozi Township chronically and in strength, the Cd in cereal crops and the Pb in the leafy vegetables will enrich in their body, and do harm to their health. The results about the factors affect the contents of Cd in soil showed the contents of Cd in soil affected by formation, soil-forming rock and soil pH.

Key words Slope cropland; Crops; Risk assessment; Heavy metals; Pollution

坡耕地是四川省主要的耕地类型, 总面积 $5.48 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占四川省总耕地面积的 83.07%, 是水土流失的主要源地^[1]。随着土壤养分的不断流失, 坡耕地土壤越来越贫瘠, 为保证农业产业正常进行和农产品产量的提高, 化学肥料和农药的使用已越来越频繁且用量呈不断增长趋势。因其自然资源的特殊性, 万源市被称为中国硒都, 富硒的天然资源给当地经济发展提供了良好的机遇, 但是随着农业生产的不断进行, 土壤污染已不再是个别地区的环境污染现象。目前四川省土壤研究热点主要集中在城市土壤环境, 对农田土壤环境缺乏科学的认识。2008 年何愿等^[2]对万源市土壤质量初步评价发现, 土壤营养优势区主要分布在庙子乡一大竹河一带, 总体呈现东高西低的分布规律; 并运用 As、Cd、Pb、Hg、Cr 这 5 种重金属元素对土壤环境质量进行评价, 发现庙子乡一大竹河一带土壤重金属达到轻度污染状态。以往的研究中很少有涉及该地区重金属元素在土壤及农作物间的迁移转化研究。该研究通过对万源坡耕地土壤中重金属富集特征的分析, 明确耕地土壤中重金属污染特征并结合风险评价方式进行风险评估, 确定重金属污染严重乡镇, 同时对该乡镇的农作物重金属含量与形态特征以及农作物食用安全性进行分析, 探究农作物中重金属含量与土壤污

染之间的相关性, 为后续的土壤污染防治与修复提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 四川省万源市是重要的富硒土壤分布区之一, 研究区位于四川省东北部、大巴山中心地区, 构造活动影响强烈, 地貌类型大部为山地, 呈现中低山地貌特征。属北亚热带湿润季风气候区, 当地气候温和, 四季分明, 雨量充沛, 雨热同期, 无霜期长, 垂直地域性差异显著。多年平均气温 $14.7 \text{ }^\circ\text{C}$, 最高极端气温 $39.7 \text{ }^\circ\text{C}$, 最低极端气温 $-9.4 \text{ }^\circ\text{C}$, 多年平均降雨量 $1\ 246 \text{ mm}$ ^[3]。万源市地下矿藏主要有煤、铁、锰、石膏、石灰石、钡矿(毒重石)、硫铁矿、钒矿、铝土矿等。出露地层 7 个系, 包括寒武系、奥陶系、志留系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系。万源市构造以褶皱为主。褶皱线大致平行列布, 其主要特点是褶皱强度由东北向西南渐次减弱^[4]。断裂带规模较小, 并有由北向南减弱的趋势。

1.2 样品采集与处理 依据《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004), 综合考虑研究区农业用地分布情况, 在万源地区 4 个乡镇(庙子乡、旧院镇、大竹镇、白羊乡)的农田中采集 0~20 cm 表层土壤, 表土样品 271 份均采自典型农耕地(庙子乡 76 个、大竹镇 37 个、白羊乡 94 个、旧院镇 64 个)。每个土壤样品由 3~5 个分样组成, 混合后用四分法取 1 kg 土壤装入样品袋在当地阴凉、干燥、通风处晾晒至恒重。去除样品中的有机残渣、植物根系及其他杂物, 用研钵研磨土壤样品, 然后过 100 目筛称取 200 g 送样测试。

1.3 测试方法 测试重金属元素 As、Cd、Pb、Zn、Se 及土壤

基金项目 四川省天晟源环保股份有限公司科研项目(kyxm-2021-005)。

作者简介 吴鹏盛(1992—), 男, 甘肃武威人, 工程师, 硕士, 从事土壤环境方面研究。* 通信作者, 工程师, 硕士, 从事土壤环境方面研究。

收稿日期 2022-02-07; **修回日期** 2022-04-21

有机质,其中As根据GB/T 17135中硼氢化钾-硝酸银分光光度法测定;Se根据GB/T 17136中冷原子吸收分光光度法测定;Pb、Cd根据GB/T 17141中石墨炉原子吸收分光光度法测定;Zn根据GB/T 17138中火焰原子吸收分光光度法测定。分析所用试剂均为优纯级,所用水均为超纯水。分析过程均加入国家标准土壤参比物质进行质量控制。

1.4 评价方法 单因子指数法、内梅罗指数法、综合污染指数法、潜在生态风险指数法、环境风险评价法是土壤重金属污染评价的常用方法^[5],该研究采用单因子指数法、内梅罗综合污染指数法和地积累指数法对研究区土壤环境进行评价,然后选出污染严重乡镇对其农作物食用安全进行进一步调查研究。

1.4.1 单因子指数法。该模型能分别反映各个污染物的污染程度,适用于研究区内一种影响因子对特定区域的污染评价,单因子指数法的结果为其他环境质量指数、环境质量分级和综合评价提供了基础和可能性。单因子指数法的表达式如下:

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式中, P_i 为土壤中污染物*i*的单因子污染指数,可以表征污染物*i*对特定区域的污染强度; C_i 为污染物*i*的实测值; S_i 为污染物*i*在土壤环境质量标准(GB 15618—1995)中II类标准的临界值^[6]。如果 $P_i \leq 1.0$,说明土壤没有受到人为污染;如果 $P_i > 1.0$,说明土壤中污染物*i*的含量已超过土壤污染限值,人为活动影响到土壤质量,土壤重金属累积污染程度越高则单因子污染指数越高。

1.4.2 内梅罗综合污染指数法。内梅罗综合污染指数法突出反映了高浓度污染物对土壤环境质量的影响,能将所选区域土壤环境质量作为一个整体与其他地区或已有资料进行对比分析。该方法兼顾了各单元素的污染指数最大值和平均值,对研究区多种重金属进行综合评价时首选^[7]。该方法计算公式如下:

$$P_{\text{综合}} = \sqrt{\frac{(\bar{p}_i)^2 + [\max(p_i)]^2}{2}} \quad (2)$$

式中, $P_{\text{综合}}$ 为土壤综合污染指数, \bar{p}_i 为各污染物的指数平均值, $\max(p_i)$ 为单因子指数最大值。若 $P_{\text{综合}} \leq 1$ 为未污染地区; $1 < P_{\text{综合}} \leq 2$ 为轻度污染地区; $2 < P_{\text{综合}} \leq 3$ 为中度污染地区; $P_{\text{综合}} > 3$ 为重度污染地区。

1.4.3 地积累指数法。地积累指数法用来反映沉积物中重金属富集程度,当前被广泛用于土壤环境质量评价方面。该方法重点考虑了人为污染因素、环境地球化学背景值^[8],特别考虑到自然成岩作用对研究区土壤背景值的影响,其计算公式如下:

$$L_{\text{geo}} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5B_n} \right) \quad (3)$$

式中, L_{geo} 为地积累指数; C_n 是元素*n*在土壤中的含量; B_n 为当地土壤中该元素的地球化学背景值(采用四川省土壤环境背景值作为参考);1.5为修正指数。地积累指数参考标准见表1。

表1 地积累指数分级标准

Table 1 Grading standard of geological cumulative pollution index

L_{geo}	污染指数 Pollution index	污染程度 Pollution degree
<0	0	无污染
0~1	1	无污染到中度污染
>1~2	2	中度污染
>2~3	3	中度污染到强污染
>3~4	4	强污染
>4~5	5	强污染到极强污染
>5	6	极强污染

1.4.4 农作物中重金属风险评价方法。污染物对人体的危害风险评估是衡量污染物对人体危害大小的一个重要参数,污染物进入人体的方式包括呼吸、饮食和皮肤渗入等方面。少数从事特殊职业人群和长期生活在空气污染较重的矿区、工厂的少数人群面临更大的威胁,大部分人群中污染物对人体的摄入主要通过饮食^[9]。重金属通过上述方式进入人体内,不会在体内自行分解,而是蓄积在体内,对人体健康形成潜在的危害,引起致畸、致癌和致突变等,致使人体受到伤害。此次调查研究采用Nabulo等^[10]提出的变形公式进行健康风险评估,其公式如下:

$$HQ_i = ADD_i / RfD_i \quad (4)$$

$$ADD_i = (DI \times M_{\text{Fveg}}) / W_B \quad (5)$$

式中, HQ_i 表示重金属对人体的危害商数,指通过食用叶菜类蔬菜摄入指定的微量金属*i*; ADD_i 表示人体平均日吸收的金属剂量[$\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$]; RfD_i 表示不会对身体造成危害的金属每日最大摄入量参考剂量[$\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$],依据JECFA提出的参考标准,Pb、Cd、As这3种重金属每日参考剂量值分别为0.003 5、0.000 83、0.003 $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$;DI为叶菜类蔬菜中微量金属的每日摄入量(kg/d)^[11]; M_{Fveg} 表示蔬菜组织中的微量金属浓度(mg/kg); W_B 为个人体重(kg)。

成人人体每日摄入量记为182 g/kg ,儿童为118 g/kg ,成人体重平均记为60.7 kg ,儿童体重记为24.5 kg 参与计算。农作物类型之间的 HQ_i 变化反映其相对特定的微量重金属对人体造成的伤害指数。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属污染状况

2.1.1 重金属含量特征。从表2可以看出,Cd、Zn、Se变异系数偏大,是因为这3种元素在各乡镇土壤中含量差距较大,具有较强的离散程度。分别计算各乡镇As、Cd、Pb、Zn这4种重金属元素变异系数发现庙子乡Cd、Zn以及大竹镇Cd变异系数均大于1.6。由此可见不仅各乡镇之间元素含量差异显著,并且同一乡镇内的不同采样点之间元素含量也有显著差异。

2.1.2 单因子指数法评价。利用国家土壤二级标准限值对万源市坡耕地重金属进行单因子指数评价,当单因子污染指数>1时表示该样品超标,用超标样品数与总样品数的比值来表征研究区土壤受污染面积和受污染地区污染程度。如表3所示,庙子乡表土中As、Cd、Zn这3种重金属元素均有

超标,分别占全乡耕地面积的 22.4%、93.4%、47.4%。另外,在全部样品中 As、Cd、Zn 这 3 种重金属元素含量超标的样品占比分别为 6.3%、50.6%、15.1%,且庙子乡是主要贡献来源,庙子乡综合污染最为严重。大竹镇表土样品中 Cd 元素含量超标的样品占全镇的 94.6%,表明大竹镇大部分耕地 Cd 污染严重。

表 2 研究区坡耕地土壤中重金属含量

Table 2 Heavy metal content in slope farmland soil in the study area
单位:mg/kg

项目 Item	As	Cd	Pb	Zn	Se
中位数 Median	15.40	0.38	26.00	88.30	0.37
平均值 Mean	13.99	2.01	26.21	170.58	1.65
最大值 Maximum	99.20	47.80	44.80	2 292.00	22.30
最小值 Minimum	2.34	0.10	15.30	20.00	0.22
标准偏差 SD	3.74	5.49	5.11	276.18	3.27
变异系数 CV	0.267	2.731	0.195	1.619	1.982

表 3 研究区坡耕地土壤 4 种重金属超标样品数量统计

Table 3 Statistics of 4 kinds of heavy metal samples exceeding the standard in sloping farmland soil in the study area

乡镇 Township	As	Cd	Pd	Zn
白羊乡 Baiyang Township	0	22	0	0
大竹镇 Dazhu Town	0	35	0	5
旧院镇 Jiuyuan Town	0	9	0	0
庙子乡 Miaozhi Township	17	71	0	36
总计 Total	17	137	0	41
占比 Proportion // %	6.3	50.6	0	15.1

2.1.3 内梅罗综合污染指数法评价。内梅罗综合污染指数法评价结果表明,与其他乡镇相比庙子乡内梅罗综合污染指数为 11.67,远远超出评价标准当中重污染的限值(3),属于重度污染地区。其原因在于庙子乡遭受很严重的 Cd 污染和轻微的 Zn 超标。另外大竹镇的内梅罗综合污染指数为 1.69,属于轻度污染地区,从各污染元素来看 Cd 的贡献远远超过其他元素,说明该镇耕地存在 Cd 污染的风险。

2.1.4 地积累指数法评价。地积累指数法评价结果显示,白羊乡 Cd 元素污染指数在 0~2,且比例高达 82%,表明白羊乡大部分耕地受到重金属 Cd 的污染,且污染等级属于中度污染。大竹镇 Cd 污染总体处于强污染状态,这一结果与单因子指数法和内梅罗综合污染指数法评价结果一致;另外受检样品中 As 元素处于中度污染的比例为 27%,所以 As 污染也是大竹镇需要重视的另一个问题。旧院镇土壤样品中 97% 的 Cd 污染等级达到中度污染,且污染指数离散程度较小。庙子乡 41% 的土壤样品中 As 地积累指数在 1~2,属于中度污染,97.3% 的土壤样品中 Cd 属于强污染到极强污染级别。

从 3 种评价结果来看,反映出的共同问题是 4 个乡镇均受到 Cd 的污染,其中庙子乡和大竹镇属于强污染状态,旧院镇和白羊乡处于中度污染;庙子乡和大竹镇的部分耕地遭受 As 的污染,污染程度较轻,但也应重视;庙子乡 Zn 污染属于中度到强污染级别。通过 3 种评价方法能基本确定 4 个乡镇重金属污染特征,从结果看庙子乡污染严重,多种重金属

共同作用使其耕地生态风险加剧。耕地污染的直接受害者是农作物,重金属如何从土壤中活化、迁移、富集到植物中的这一过程和转化效率尚不得知,因此研究这一过程和植物中重金属形态及含量的关系是研究的重点。

2.2 表层土壤中影响 Cd 含量的因素 研究区 4 个乡镇 Cd 元素含量有较大差异,土壤在成土过程中受到出露地层、成土母岩、pH 等因素的影响。因此这 3 种因素可能也是造成土壤中 Cd 元素含量各异的主要因素。

2.2.1 地层与土壤 Cd 含量的相关性。万源地区地层从第四系到震旦系均有出露,出露地层较为复杂,基本呈从东北到西南依次变新的趋势。研究区中旧院镇出露三叠系蒲圻组、嘉陵江组和侏罗系八道湾组等;大竹镇出露震旦系红砂溪组和震旦系灯影组;庙子乡出露寒武系金顶山组、龙王庙组和震旦系红砂溪组^[12]。

从表 4 可以看出,寒武系岩石中 Cd 的含量远远高于三叠系岩石和震旦系岩石中 Cd 的含量,结合各乡镇出露地层来看正好符合这一规律,庙子乡整体出露寒武系地层,且地表土壤中 Cd 元素含量也最大,大竹镇出露震旦系地层,其地表土中 Cd 元素含量也低于庙子乡,这说明出露地层是影响表土中 Cd 元素含量的一个重要原因,是土壤镉污染的一个天然来源。

表 4 典型区各地层岩石中 Cd 含量统计

Table 4 Statistics of Cd content in rocks of various layers in typical areas
单位:mg/kg

地层 Stratum	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Mean
三叠系 Triassic	0.100	0.033	0.062
寒武系 Cambrian	3.160	0.072	0.410
震旦系 Sinian	0.970	0.064	0.160

2.2.2 成土母岩与土壤 Cd 含量的相关性。研究区岩石类型主要为砂岩、灰岩和页岩,不同岩性中 Cd 的平均含量分别为砂岩 0.197 mg/kg、灰岩 0.513 mg/kg、页岩 0.910 mg/kg, Cd 含量从高到低依次为页岩>灰岩>砂岩。岩石平均 Cd 含量与土壤平均 Cd 含量相关性分析结果表明两者呈正相关,可以看出成土母岩中 Cd 含量的高低直接关系着土壤中 Cd 含量的高低,也就是说成土母岩是土壤高镉的天然源头。

2.2.3 土壤 pH 与土壤 Cd 含量的相关性。表 5 显示,研究区土壤大部分呈弱酸性,pH 在 4.42~8.41,4 个乡镇 pH 平均值从高到低依次为旧院镇>白羊乡>大竹镇>庙子乡。与表层土壤中 Cd 含量特征对照来看,土壤的酸碱程度与土壤中 Cd 含量存在负相关,即土壤 pH 越低土壤中 Cd 含量越高。

2.2.4 Cd 的形态特征。重金属含量并不能表示其对环境影响力的大小,这是因为土壤中重金属的迁移性和植物毒性主要取决于重金属的形态^[13-15]。土壤重金属的主要来源为成土母质^[16],它是影响土壤环境质量的主要因素之一,也是人类很难改变的地质背景因素。从表 5~6 可以看出,土壤 Cd 的有效态与环境 pH 呈负相关,这与严明书等^[17]的研究结果一致。另外庙子乡土壤虽然 Cd 污染严重,但是其农作物中

Cd 含量均未超过安全限值,是因为庙子乡土壤中 Cd 的生物可利用态(水溶态和离子交换态)只有 26.57%,大大降低了

表 5 表层土壤 pH 特征
Table 5 pH characteristics of surface soil

乡镇 Township	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV//%
白羊乡 Baiyang Township	8.35	4.56	6.41	1.30	1.38
旧院镇 Jiuyuan Town	8.41	4.96	7.48	0.95	12.69
大竹镇 Dazhu Town	8.24	4.65	6.36	1.13	17.70
庙子乡 Miaozi Township	8.41	4.42	6.14	1.18	19.15

表 6 土壤中 Cd 的赋存形态
Table 6 Combined forms of Cd in the soil

乡镇 Township	占比 Proportion//%							残渣态 Residue state	全量 Full mg/kg
	水溶态 Water- soluble state	离子交换态 Ion exchange state	碳酸盐结合态 Carbonate combined state	腐殖酸结合态 Humic acid combined state	铁锰结合态 Ferromanganese combined state	强有机酸结合态 Strong organic acid combined state			
白羊乡 Baiyang Township	0.81	36.00	15.40	12.58	13.89	9.67	11.65	0.310	
旧院镇 Jiuyuan Town	0.63	21.84	22.32	10.87	19.76	10.45	14.13	0.36	
大竹镇 Dazhu Town	0.40	34.65	14.28	5.51	20.57	6.39	18.20	1.99	
庙子乡 Miaozi Township	0.27	26.30	9.00	9.86	20.02	8.28	26.27	2.19	

2.3 土壤污染区中农作物的食用安全性评价

2.3.1 农作物中重金属含量特征。庙子乡土壤是遭受重金属污染最严重的乡镇,以庙子乡为研究区采集了包含玉米、马铃薯、花生、四季豆、茶叶的 17 件植物样品及根系土,其重金属含量如表 7 所示。从表 7 可以看出,庙子乡农作物中

As、Cd、Pb 这 3 种重金属含量低于《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762—2012)中对应元素的标准限值,属于食用安全级别。根系土中重金属含量与植物重金属含量之间呈弱相关性,说明土壤中重金属不是植物重金属的唯一来源。

表 7 农作物中重金属含量特征
Table 7 Characteristics of heavy metal content in crops

农作物 Crop	As		Cd		Pb		Zn 实测值 Measured value	Se 实测值 Measured value
	实测值 Measured value	国标限值 National standard limit	实测值 Measured value	国标限值 National standard limit	实测值 Measured value	国标限值 National standard limit		
花生 Peanut	0.020	0.5	0.020	0.5	0.084	0.2	59.30	0.078
玉米 Corn	0.024	0.5	0.031	0.1	0.046	0.2	25.90	0.310
马铃薯 Potato	0.010	0.5	0.067	0.1	0.027	0.2	4.23	0.013
四季豆 Green bean	0.130	0.5	0.070	0.1	0.090	0.2	62.90	0.071
茶叶 Tea leaf	0.110	0.5	0.063	0.2	0.370	5.0	38.70	0.080

2.3.2 农作物中重金属风险评价。对于 Pb、Cd、As 这 3 种重金属的食品摄入量,分别计算马铃薯、玉米、四季豆、花生、茶叶中重金属的微量金属浓度,得出对人体的食品参考危害商数,从而探究不同种类作物中哪种重金属是会对人体造成危害,得出参考危害商数(表 8)。从表 8 可以看出,四季豆中 Pb 的危害商数最大,是食用该种作物主要的重金属风险,相对于其他农作物四季豆中 3 种重金属的危害商数都是最高

的。蔬菜中重金属的含量过高会伤害人体健康,而且儿童比成人面临更严重的身体健康风险。马铃薯、四季豆是当地居民餐桌上不可缺少的蔬菜,几乎每天都会食用,其受到重金属污染后对人体健康造成的危害值得予以重视^[18]。玉米和马铃薯中 Cd、Pb 的累积造成对身体的危害较大,而茶叶中 Pb 的危害高于 As 和 Cd。

表 8 各农作物中 3 种重金属对人体造成的危害商数
Table 8 Hazard quotient of three kinds of heavy metals in each crop to human body

农作物 Crop	Pb		Cd		As	
	成人 Adult	儿童 Children	成人 Adult	儿童 Children	成人 Adult	儿童 Children
花生 Peanut	4.37	2.83	4.39	2.84	1.21	0.79
玉米 Corn	2.39	1.55	6.80	4.41	1.46	0.94
马铃薯 Potato	1.40	0.91	14.69	9.52	0.61	0.39
四季豆 Green bean	46.80	30.33	15.35	9.95	7.89	5.11
茶叶 Tea leaf	19.24	12.47	13.81	8.95	6.67	4.33

3 结论

(1) 不同乡镇土壤中重金属元素含量相差较大,且同一乡镇的不同采样点同样存在差异,表明重金属在土壤中的富集程度不仅与地层背景有关,也受人为活动的影响。

(2) 3 种污染指数评价结果一致,4 个乡镇均表现出不同程度的 Cd 污染,其中以庙子乡最为严重,大竹镇次之。庙子乡和大竹镇还表现出一定程度的 As 污染,这对农作物的重金属安全造成威胁。

(3) 庙子乡玉米、马铃薯、四季豆、茶叶、花生中 As、Cd、Pb 等有害重金属含量均未超标,可以安全使用。

(4) 庙子乡四季豆中 Pb 的污染危害最为严重,而长期大量食用该地区谷物类作物,身体可能会受到 Cd 的危害。

(5) 分别从地层、成土母岩、土壤酸碱度这 3 个方面对土壤中 Cd 含量进行相关性分析,结果发现,研究区内出露地层越老的乡镇其表层土壤 Cd 含量越高,成土母岩是表层土壤 Cd 的天然污染源,土壤 pH 越低土壤中 Cd 含量越高。土壤中 Cd 的形态特征影响作物中 Cd 的富集效率。

参考文献

[1] 张丽萍,朱钟麟,邓良基.四川省坡耕地资源及其治理对策[J].水土保持通报,2004,24(3):47-49.
 [2] 何愿,张成江,徐争启,等.万源市土壤质量初步评价[J].安徽农学通报,2008,14(11):51-54.
 [3] 刘小明.四川省万源市富硒茶园区土壤与茶叶中硒的分布和生物可利用性及其影响因素研究[D].成都:成都理工大学,2013.
 [4] 李瑞平,郝英华,李光德,等.泰安市农田土壤重金属污染特征及来源解析[J].农业环境科学学报,2011,30(10):2012-2017.

[5] 刘世梁,傅伯杰,刘国华,等.我国土壤质量及其评价研究的进展[J].土壤通报,2006,37(1):137-143.
 [6] 施泽明,倪师军,张成江,等.成都市城市土壤中重金属的现状评价[J].成都理工大学学报(自然科学版),2005,32(4):391-395.
 [7] 蒋实,徐争启,张成江.四川省万源市土壤 pH 值测定及土壤酸碱度分析[J].安徽农业科学,2009,37(25):12105-12108.
 [8] RAPANT S, KORDIK J. An environmental risk assessment map of the Slovak Republic: Application of data from geochemical atlases[J]. Environmental geology, 2003, 44(4): 400-407.
 [9] 孙崇玉.吉林省典型黑土区农田土壤重金属环境风险研究[D].哈尔滨:中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所),2013.
 [10] NABULO G, BLACK C R, CRAIGON J, et al. Does consumption of leafy vegetables grown in peri-urban agriculture pose a risk to human health? [J]. Environmental pollution, 2012, 162: 389-398.
 [11] SASTRE J, HERNÁNDEZ E, RODRÍGUEZ R, et al. Use of sorption and extraction tests to predict the dynamics of the interaction of trace elements in agricultural soils contaminated by a mine tailing accident [J]. Science of the total environment, 2004, 329(1/2/3): 261-281.
 [12] IMPELLITTERI C A, SAXE J K, COCHRAN M, et al. Predicting the bio-availability of copper and zinc in soils: Modeling the partitioning of potentially bioavailable copper and zinc from solid to soil solution [J]. Environmental toxicology and chemistry, 2003, 22(6): 1380-1386.
 [13] 钟晓兰,周生路,李江涛,等.长江三角洲地区土壤重金属生物有效性的研究:以江苏昆山市为例[J].土壤学报,2008,45(2):240-248.
 [14] 严明书,张茂忠,陈琦伟,等.重庆市国土资源 1:5 万生态化学调查:渝北实验区调查报告[R].重庆:重庆市地勘局川东南地质大队,2012:137-151.
 [15] 李其林.重庆市土壤—作物系统重金属特征研究[D].重庆:西南大学,2008.
 [16] 庞文品,秦樊鑫,吕亚超,等.贵州兴仁煤矿区农田土壤重金属化学形态及风险评估[J].应用生态学报,2016,27(5):1468-1478.
 [17] 严明书,李武斌,杨乐超,等.重庆渝北地区土壤重金属形态特征及其有效性评价[J].环境科学研究,2014,27(1):64-70.
 [18] 石建凡.四川万源典型农业区土壤元素地球化学特征及质量评价[D].成都:成都理工大学,2016.

(上接第 78 页)

[20] 邸亚男,朱丽英,沈婕,等.四种有机溶剂对斑马鱼眼睛发育的影响[J].中国比较医学杂志,2020,30(5):75-80.
 [21] 黄毅,唐云明.金属离子·有机溶剂对黄鳍碱性磷酸酶的影响[J].安徽农业科学,2008,36(20):8513-8515.
 [22] QIAN H F, PAN X J, SHI S T, et al. Effect of nonylphenol on response of physiology and photosynthesis-related gene transcription of *Chlorella vulgaris* [J]. Environmental monitoring and assessment, 2011, 182: 61-69.
 [23] 张容芳,唐东山,刘飞.藻类抗氧化系统及其对逆境胁迫的响应[J].环境科学与管理,2011,36(12):21-25.
 [24] CALABRESE E J, BALDWIN L A. Applications of hormesis in toxicology, risk assessment and chemotherapeutics [J]. Trends in pharmacological sciences, 2002, 23(7): 331-337.
 [25] 魏静,林莉,潘雄,等.不同环境胁迫因子对藻类分子生物学特性的影响研究进展[J].长江科学院院报,2020,37(4):14-24.
 [26] BAJJI M, KINET J M, LUTTS S. The use of the electrolyte leakage method

for assessing cell membrane stability as a water stress tolerance test in durum wheat [J]. Plant growth regulation, 2002, 36(1): 61-70.
 [27] LANG F, BUSCH G L, RITTER M, et al. Functional significance of cell volume regulatory mechanisms [J]. Physiological reviews, 1998, 78(1): 247-306.
 [28] FRANCIS-LANG H, ZANNINI M, DE FELICE M, et al. Multiple mechanisms of interference between transformation and differentiation in thyroid cells [J]. Molecular & cellular biology, 1992, 12(12): 5793-5800.
 [29] 张磊,段舜山,孙凯峰,等.有机磷农药草甘膦异丙胺盐对球形棕囊藻的刺激效应[J].生态学报,2010,19(1):51-56.
 [30] 唐学玺,李永祺.对硫磷对三角褐指藻核酸和蛋白质合成动态的影响[J].生态学报,2000,20(4):598-600.
 [31] 张葛脐,张敦宇,石硕,等.球等鞭藻对氟苯尼考胁迫的响应研究[J].水生生物学报,2020,44(6):1278-1286.
 [32] 张哲,王江涛,谭丽菊.草甘膦对旋链角毛藻和盐生杜氏藻的毒性兴奋效应[J].生态毒理学报,2010,5(5):685-691.

(上接第 84 页)

[3] 汤峰,徐磊,张蓬涛,等.县域高标准基本农田建设适宜性评价与优先区划定[J].农业工程学报,2019,35(21):242-251.
 [4] 刘需加,吴克宁,赵华甫,等.基于耕地综合质量的基本农田布局优化:以河南省温县为例[J].中国土地科学,2015,29(2):54-59.
 [5] 刘婧,汤峰,张贵军,等.基于 TOPSIS 和矩阵组合的县域永久基本农田储备区划定时序研究[J].中国生态农业学报,2021,29(7):1224-1235.
 [6] 曹丽萍,罗志军,冉凤维,等.基于耕地质量和空间集聚格局的县域基本农田划定[J].水土保持研究,2018,25(4):349-355,364.
 [7] 钟珊,赵小敏,郭熙,等.基于耕地综合质量的贵溪市基本农田布局优化调整[J].浙江农业科学,2016,57(11):1806-1810.
 [8] 罗志军,赵越,赵杰,等.基于景观格局与空间自相关的永久基本农田划定研究[J].农业机械学报,2018,49(10):195-204.
 [9] 罗倩,张威,邵景安,等.武陵山区县域尺度永久基本农田划定优化[J].

中国农业资源与区划,2021,42(7):48-57.
 [10] 边振兴,刘琳琳,王秋兵,等.基于 LESA 的城市边缘区永久基本农田划定研究[J].资源科学,2015,37(11):2172-2178.
 [11] 杜越天,王心一.城市周边永久基本农田划定次序研究:以潜江市为例[J].安徽农业科学,2021,49(10):181-185.
 [12] 熊昌盛,谭策,岳文泽.基于局部空间自相关的高标准基本农田建设分区[J].农业工程学报,2015,31(22):276-284.
 [13] 李龙,吴大放,刘艳艳.基于四象限法的城市周边永久基本农田划定研究:基于自然质量和建设稳定性[J].中国农业资源与区划,2020,41(5):87-97.
 [14] 任艳敏,孙九林,刘玉,等.县域永久基本农田划定方法研究[J].农业机械学报,2017,48(4):135-141.
 [15] 朱美青,黄宏胜,史文娇,等.基于多规合一的基本农田划定研究:以江西省余江县为例[J].自然资源学报,2016,31(12):2111-2121.