

# 贵州草海湿地周边耕地土壤与农作物重金属污染特征

张家春<sup>1</sup>, 林绍霞<sup>2</sup>, 张清海<sup>2</sup>, 何腾兵<sup>1</sup>, 林昌虎<sup>3</sup>, 丁玉娟<sup>1</sup>, 卫四涛<sup>1</sup>

(1. 贵州大学, 贵阳 550025; 2. 贵州省理化测试研究院, 贵阳 550002; 3. 贵州科学院, 贵阳 550001)

**摘要:** 采集草海湿地周边主要农作物可食部分及对应根系的土壤样品, 分析测试了重金属 Cd, Cr, Hg, Pb, As 和 Zn 的含量, 对比研究了土壤和作物中重金属污染水平及对重金属的富集能力。结果表明: 土壤重金属元素 Zn, As, Cr 平均含量未超过贵州省土壤元素背景值, 其他 3 种重金属 Pb, Cd, Hg 平均值分别是背景值的 1.24, 1.44, 7.5 倍; 与中国《食品中污染物限量》标准相比, 除 Hg 平均含量超标外, 蔬菜中 As, Cr, Zn, Cd 和 Pb 平均含量处在可接受范围内。6 种重金属的单因子污染指数的高低依次是 Hg>Pb>Cd>As>Cr>Zn, 葱和萝卜处于安全水平, 其余农作物处于警戒线; 不同种类作物中重金属富集特征差异较大, 菠菜对 As, Cd, Hg, Pb 的富集系数比其余作物高, 萝卜叶对 Cr 和 Zn 的富集能力较强, 重金属 Cr 富集系数最低的是玉米, Zn 和 Hg 富集系数最低的是萝卜根, Cd 和 Pb 富集系数最低为马铃薯, As 富集能力最低的为白菜。

**关键词:** 重金属; 农作物; 污染特征; 富集能力; 草海湿地

中图分类号: X131.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)03-0273-06

## Characteristics of Heavy Metal Pollution in Crops and Soil around Caohai Wetland in Guizhou Province

ZHANG Jia-chun<sup>1</sup>, LIN Shao-xia<sup>2</sup>, ZHANG Qing-hai<sup>2</sup>,

HE Teng-bing<sup>1</sup>, LIN Chang-hu<sup>1,3</sup>, DING Yu-juan<sup>1</sup>, WEI Si-tao<sup>1</sup>

(1. Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Guizhou Academy of Test and Analysis, Guiyang 550002, China; 3. Guizhou Academy of Sciences, Guiyang 550001, China)

**Abstract:** The edible parts of main crops and the corresponding root-zoning soil samples around the part of wetland in Caohai were collected to analyze and test the contents of Cd, Cr, Hg, Pb, As and Zn, and the enrichment abilities on heavy metals in test crops and the pollution level of heavy metals in soils and crops were studied and contrasted. The results showed that the average contents of soil heavy metal Zn, As, Cr did not exceed the background values in soils in Guizhou Province, the average values of other 3 kinds of heavy metals Pb, Cd, Hg were 1.24, 1.44, 7.5 times of the background values; compared with the standard of 'China Food Contaminants', the average content ranges of As, Cr, Zn, Cd and Pb in vegetables were acceptable. The level of single factor pollution about six kinds of heavy metals decreases in the order Hg>Pb>Cd>As>Cr>Zn, the levels of these metal in onions and radishes are at the safe level, other crops in a cordon line; the enrichment characteristics of heavy metals of different types of crops were obviously different, the enrichment coefficients of Cd, Hg, As, Pb in spinach are higher than other crops, the accumulation ability of heavy metals on Cr and Zn of radish leaves were stronger, the enrichment coefficients of Cr in maize was the lowest, the enrichment coefficient of Zn and Hg in the radish root is lowest, the enrichment coefficients of Cd and Pb in potato was the lowest, the enrichment coefficients of As in cabbage is the lowest.

**Key words:** heavy metals; pollution characteristics; enrichment abilities; Caohai wetland

土壤是人类赖以生存的自然资源及农业生产的重要资源, 近些年来随着经济和城市化的快速发展, 城市和工业污染物大量向农村和农业环境转移, 使得

土壤环境污染种类和数量加剧。与大气污染、水污染和废弃物污染等直观性不同, 土壤污染具有隐蔽性和滞后性, 很难通过感官就能发现。土壤污染中备受

关注的是土壤重金属污染,土壤一旦遭受重金属的污染,由于其具有不可逆性及长期性,又不易在生物物质循环和能量交换中分解<sup>[1]</sup>,因此导致土壤肥力及农作物产量和品质降低,而且重金属能够在土壤中积累和植物对重金属的富集作用而残留在作物体内,使得重金属通过土壤—作物—食物系统的迁移和累积来影响人类的健康<sup>[2-4]</sup>。因此,在涉及重金属污染的诸多问题中,土壤—蔬菜(或粮食作物)系统的重金属污染格外引人关注<sup>[5-6]</sup>。

贵州草海是一个典型的小流域,包含了流域具备的各种特征和基本要素,如城镇乡村、山坡坝地、溪流湖泊、工农商、珍稀动植物保护区等利益相关者<sup>[7]</sup>。在草海流域,面对巨大的农业人口压力,为提高土地产出水平围湖造田,化肥、农药的使用量逐年增加,造成草海流域土壤环境污染物倍增,致使重金属污染物直接或间接地进入农田土壤,导致农作物受到不同程度的重金属污染,给人体健康带来潜在的危害。迄今为止,有关草海重金属污染方面主要集中在土壤、沉积物等方面<sup>[8-10]</sup>,针对草海湖周边耕地土壤—农作物系统的重金属污染及评价方面还未见报道。为了解草海生态区土壤及其农作物重金属的污染状况,更好地促进草海生态环境的可持续发展,本文对草海湖周边主要农业区耕地土壤及农作物样品进行分析和测定,对比分析土壤中人体危害较大的 Cd, Cr, Hg, Pb, As, Zn 重金属元素的污染特征及富集规律,并对土壤和农作物中重金属污染状况进行评价,以期对草海生态区土壤及农作物污染控制提供理论依据,正确引导居民合理耕作,促进农业可持续发展。

## 1 研究区概况

草海为国家级自然保护区,属于一个典型完整的高原湿地生态系统,是我国特有的黑颈鹤等珍稀鸟类及其它候鸟的重要越冬地<sup>[11]</sup>,草海湖也是贵州最大的高原天然淡水湖泊。位于贵州省西北边缘威宁彝族回族苗族自治县县城西南隅,东经 104°12′—104°18′,北纬 26°49′—26°53′,平均海拔 2 171.7 m,保护区面积 96 km<sup>2</sup>,周边耕地面积有 11.05 km<sup>2</sup>。草海高原湿地属亚热带高原季风气候,具有长冬无夏、春秋相连、干湿分明、光照丰富的特点,年平均气温 10.5℃,年均日照时数 1 805.4 h,年均太阳总辐射量为 4 698.4 kJ/km<sup>2</sup>,日照充分,≥10℃的年积温 2 275℃,无霜 204 d,年平均降雨量 950.9 mm,是贵州省境内降水量最少的地区。草海自然保护区分布的土壤主要是黄棕壤、石灰土、石质土及沼泽土。保护区域内种植的农作物主要有玉米、马铃薯、菜豆、蔬

菜等,形成的农业植被有玉米+马铃薯组合、玉米+菜豆组合、蔬菜等旱地作物植被。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集与制备

根据草海实际情况,在保证样品具有代表性的基础上,在白马村、东山村、郑家营村、民族村、大马城村、草海湖入口处、出水口、银龙村、张家湾村、西海村等村种植的农作物进行植株样品和对应根系土壤样品的采集,共采集草海生态区农作物样品 80 个和土壤样品 64 个。每种农作物按小区采集 5 个样品,去除老叶以及根部土壤,取其可食用部分混合 1 kg,贴好标签,带回实验室。土壤样品采用多点采集混合样,用竹削刀取 0—20 cm 的土壤 5 个分样组成混合样,充分混合后用四分法反复取舍,保留 1 kg 左右土壤装于布袋中。

将取回的土样分别装入不含重金属的布袋,带回实验室风干,剔除植物残体及大砾石等非土壤物质,同时避免酸、碱等污染。按四分法将风干样充分混合后,研细,过孔径 20 目尼龙筛。过筛后的样品全部置无色聚乙烯薄膜上,并充分搅拌均匀,再采用四分法取其两份,一份置于密封袋中保存,另一份作样品的细磨用。用于细磨的样品再过 100 目尼龙筛,将过筛样品也置于密封袋中保存。制备完成后放入干燥器中保存待测。农作物样品采集后先用自来水冲洗,再用去离子水冲洗干净,90℃杀青 30 min,60~70℃烘干至恒重。所有农作物样品用高速粉碎机粉碎 1 min,过 40~60 目筛,在密封袋中保存备用。

### 2.2 测试方法

分析测试的重金属包括 Pb, Cr, Zn, Hg, As 和 Cd 共 6 种,蔬菜样品采用 HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> 加热消解,土壤样品采用 HCl-HF-HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> 加热消解。土壤与蔬菜中 As 采用原子荧光光谱法,以双道原子荧光光度计测定;蔬菜中其它重金属元素以 ICP-MS 测定。土壤中 Cr 采用火焰原子吸收分光光度法;土壤中 Cd 采用石墨炉原子吸收分光光度法测定;土壤中 Hg 和 Pb 采用石墨炉原子吸收分光光度法测定;土壤中 Zn 采用火焰原子吸收分光光度法。所有样品均做相应的试剂空白,并以国家标样进行质量控制。为与国内外相关标准和评价方法相一致,本研究在获得蔬菜烘干样重金属含量后,根据蔬菜样实测含水率数据,将其进一步转换为以鲜重计量的蔬菜重金属含量值。

### 2.3 评价标准与方法

单因子污染指数法只能分别反映各个污染物的

污染程度,不能全面、综合地反映农作物的污染程度,因此这种方法仅适用于单一因子污染特定区域的评价,但单因子指数法和其他环境质量指数、环境质量分级和综合评价的基础。

$$P_i = C_i / S_i$$

式中:  $C_i$ ——实测浓度值 (mg/kg);  $S_i$ ——评价标准 (mg/kg);  $P_i$ ——农作物中污染物  $i$  的环境质量指数;  $C_i$ ——污染物  $i$  的实测含量;  $S_i$ —— $i$  种污染物的评价标准。若  $P_i \leq 1.0$ , 则农作物没有受到污染; 若  $P_i > 1.0$ , 则农作物已受到污染, 指数越大则表明农作物污染物累积污染程度越高。农作物重金属污染状况评价采用《中华人民共和国蔬菜食品卫生标准》中限量值(表 1)作为标准。

表 1 中华人民共和国蔬菜食品卫生标准

元素	标准限值/(mg · kg <sup>-1</sup> )	标准来源
Hg	≤0.01	GB2762—2005
Cd	≤0.05	GB2762—2005
Pb	≤0.20	GB2762—2005
As	≤0.05	GB2762—2005
Zn	≤20.00	GB13106—1991
Cr	≤0.5	GB2762—2005

当评定区域内农作物质量作为一个整体与外区域农作物质量比较,或土壤同时被多种污染物污染时,需将单因子污染指数按一定方法综合起来应用综合污染指数法进行评价。综合污染评价采用兼顾单元素污染指数平均值和最大值的内梅罗综合污染指数法。该方法计算公式为:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i)^2 + P_{i(\text{max})}^2}{2}}$$

式中:  $P_{\text{综合}}$ ——土壤综合污染指数;  $P_{i(\text{max})}$ ——土壤中单项污染物的最大污染指数。根据内梅罗综合污染指数的大小对农作物质量进行分级。农作物污染分

级的评价标准见表 2。

表 2 农作物污染分级标准

等级划分	综合污染指数	污染程度	污染水平
I	$P_{\text{综}} \leq 0.7$	安全	清洁
II	$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$	警戒线	清洁
III	$1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$	轻污染	尚清洁
IV	$2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$	中污染	作物开始污染
V	$P_{\text{综}} > 3.0$	重污染	作物均受到中度污染

### 3 结果与分析

#### 3.1 草海周边耕地土壤中重金属含量特征

草海生态区耕地共 64 个表层土壤样品的 pH 值为 6.50~7.50。由表 3 可知,重金属元素除 Zn, As, Cr 平均含量未超过贵州省土壤元素背景值。其他 3 种重金属均超出贵州省土壤背景值含量,且 Pb, Cd, Hg 平均值分别是背景值的 1.24, 1.44, 7.5 倍,相应的超标点位所占比例分别为:77.14%, 80.0%, 100.00%; 6 种重金属污染程度排序:  $Hg > Cd > Pb > As > Cr > Zn$ 。与中国的《绿色食品产地环境技术条件》(NY/T391—2000)相比, As, Cr, Pb, Cd, Hg 平均值分别是标准值的 0.98, 0.74, 0.83, 1.43, 3.16 倍, Cd, Hg 均显著超过了这一标准,尤其是 Cd 污染最严重。从各种元素平均含量的地区分布来看, Cr 的最高含量出现在东山村, Zn, Pb 的最高含量出现在民族村, As 的最高含量出现在出水口, Cd, Hg 的最高含量出现在西海村。从总体含量来看,草海生态区耕地土壤重金属 Hg 和 Cd 的含量偏高,基本都超出了国家土壤二级标准值。Cr, Zn 和 Pb 的含量较低,均在二级标准以内。As 的含量基本在标准值以内,只有西海村超出标准。草海生态区周围各村中,民族村、草海湖入口、东山村、银龙村和西海村的重金属含量相对较高,白马村、郑家营村和出水口的重金属含量相对较低。

表 3 贵州草海生态区耕地土壤重金属含量统计

采样点	Cr	Zn	As	Cd	Hg	Pb	pH
白马村	79.43±23.86	26.23±4.34	17.56±3.56	0.72±0.65	0.58±0.50	25.04±7.68	6.76±0.56
东山村	126.86±8.60	40.98±8.96	19.88±4.78	0.89±0.22	0.67±0.72	60.50±6.49	6.69±0.28
郑家营村	121.46±37.63	24.96±4.33	11.45±1.61	0.74±0.29	0.38±0.31	29.35±5.84	6.58±0.43
民族村	102.41±12.36	57.86±25.11	16.67±3.70	1.10±1.40	0.86±2.18	72.95±25.15	7.12±0.14
大马城村	76.38±21.59	35.07±7.42	16.29±3.23	0.80±0.56	1.16±1.90	64.36±13.22	7.26±0.18
草海湖入口	70.52±12.11	35.80±5.32	16.32±2.34	1.05±0.13	1.22±1.44	63.79±11.67	7.45±0.20
出水口	64.69±2.55	29.24±3.10	29.63±4.38	0.79±0.15	0.75±0.45	34.63±12.86	6.60±0.12
银龙村	61.78±13.30	40.05±18.12	18.23±4.45	0.92±0.86	0.48±0.54	26.98±7.56	6.62±0.41
张家湾村	70.15±14.23	29.9±17.88	16.13±2.43	0.82±0.67	0.43±0.42	25.59±6.85	7.31±0.36
西海村	107.78±7.96	35.06±3.01	35.16±2.26	1.68±0.26	1.84±1.76	33.45±4.9	7.18±0.05
总平均值	88.15	35.51	19.73	0.95	0.83	43.66	6.95
国家土壤质量二级标准 <sup>[12]</sup>	90	250.00	30.00	0.30	0.50	300.00	6.50~7.50
贵州省土壤背景值 <sup>[13]</sup>	95.90	99.50	20.00	0.66	0.11	35.20	—
绿色食品产地环境技术条件 <sup>[14]</sup>	120.00	—	20.00	0.30	0.30	50.00	6.50~7.50

### 3.2 不同作物中重金属含量特征

由于我国食品卫生标准限值等针对的多是以鲜重计量的蔬菜重金属含量,为了让实验结果更加准确,本研究在测得蔬菜烘干干样重金属含量测试结果后,利用蔬菜含水率测定值,计算得到蔬菜可食部分的重金属含量统计结果,见表 4。与中国《食品中污染物限量》标准(GB2762—2005)相比,除 Hg 平均含量均超标外,蔬菜中 As,Cr,Zn,Cd 和 Pb 平均含量处在可接受范围内,Hg 相应的超标倍数为 1.40 倍;与《农产品安全质量无公害蔬菜安全要求》标准(GB18406.1—2001)相比,Cr 和 As 平均含量低于标准值,Cd,Hg,Pb 平均含量则超标,超标倍数分别为 1.00,1.40,1.14 倍。根据《食品中污染物限量》等标准,计算得到 80 个蔬菜样本中 As,Cr,Zn,Cd,Pb 和 Hg 的超标率分别达 61.23%,21.11%,11.43%,87.14%,66.13%,90.45%;而由《农产品安全质量无公害蔬菜

安全要求》标准,80 个点位蔬菜中 As,Cr,Cd,Pb 和 Hg 的超标率分别达 11.03%,21.11%,93.14%,73.29%,90.45%。

外部形态及内部结构的不一致,使不同植物器官吸收重金属机制各异,而对吸收的重金属累计也不同<sup>[15]</sup>,从草海生态区不同种类可食部分中重金属含量(表 4)可以看出,重金属 Cr 在萝卜叶中含量最高为 0.508 mg/kg,其次是菠菜的 0.477 mg/kg,最低的是玉米 0.045 mg/kg,萝卜叶 Cr 的含量比玉米大 10 倍。本研究中蔬菜类农作物主要为青菜、白菜、菠菜三种,粮食类作物主要是玉米和马铃薯,蔬菜类和粮食类农作物中 6 种重金属含量特征分析可知,蔬菜类农作物的含量比粮食类作物的含量更高,这与黄银晓等人在北京东郊研究发现的“可食部分重金属含量规律蔬菜>粮食>水果相符”<sup>[16]</sup>

表 4 草海生态区农作物重金属含量

作物类型	Cr	Zn	As	Cd	Hg	Pb
青菜	0.365±0.13	1.270±0.57	0.035±0.018	0.056±0.014	0.012±0.002	0.205±0.016
白菜	0.218±0.18	1.081±0.68	0.043±0.016	0.061±0.017	0.011±0.003	0.227±0.17
菜苔	0.266±0.32	0.727±0.88	0.017±0.011	0.041±0.013	0.016±0.0003	0.289±0.21
菠菜	0.477±0.17	1.235±0.32	0.059±0.020	0.068±0.016	0.016±0.002	0.306±0.14
豌豆尖	0.188±0.33	1.072±0.39	0.038±0.011	0.054±0.011	0.012±0.010	0.185±0.08
葱	0.102±0.11	0.976±0.26	0.024±0.016	0.044±0.009	0.012±0.030	0.222±0.09
蒜苗	0.276±21.59	0.707±0.28	0.034±0.020	0.042±0.014	0.016±0.040	0.263±0.12
萝卜根	0.124±0.14	0.554±0.24	0.026±0.013	0.041±0.011	0.009±0.002	0.168±0.14
萝卜叶	0.508±0.32	1.276±0.37	0.042±0.022	0.063±0.009	0.018±0.003	0.228±0.09
马铃薯	0.086±0.07	0.671±0.29	0.025±0.014	0.036±0.008	0.013±0.002	0.189±0.04
玉米	0.045±0.03	0.672±0.33	0.041±0.016	0.046±0.012	0.015±0.003	0.227±0.07
总体平均值	0.241	0.931	0.035	0.050	0.014	0.228
食品污染物限量 <sup>[17]</sup>	≤0.500	≤20.000	≤0.050	≤0.200	≤0.010	≤0.300
无公害蔬菜安全要求 <sup>[18]</sup>	≤0.500	—	≤0.500	≤0.050	≤0.010	≤0.200

### 3.3 不同作物重金属污染评价

土壤—植物系统是陆地生态系统最基本的结构单元,如果该系统发生重金属污染,其作用范围是广泛的,包括使植物中重金属元素富集、影响水和大气环境质量及人体健康,而且污染具有长期性和潜伏性<sup>[19]</sup>。重金属含量也对农作物的品质有直接影响,参照中华人民共和国蔬菜食品卫生标准,用单因子污染指数及综合污染指数来进一步评价草海生态区中不同农作物重金属污染水平,了解草海生态区中农作物重金属污染情况。用单因子污染指数来单独评价某类重金属在不同农作物中污染程度,而综合污染指数则用来反映各类农作物在 6 种重金属作用下的污染状况。从单因子污染指数及综合污染指数的评价结果(表 5)可以发现,6 种重金属的单因子污染指数的高低依次是 Hg>Pb>Cd>As>Cr>Zn。单因子

污染指数最高是豌豆尖中的 Hg,已经超过 2.0,最低的是萝卜根中的 Zn 为 0.028,从结果可以看出各重金属元素的单项污染指数为 0.028~2.100。菠菜和萝卜叶综合污染指数分别为 1.118,1.020,属于轻污染;葱和萝卜根处于安全水平,其余农作物虽然没有受到污染,但是处于警戒线。

### 3.4 不同作物重金属富集特征

重金属的富集系数是指植物中重金属含量与土壤中重金属含量的比值,它可以大致反映蔬菜在相同土壤重金属含量条件下对重金属的吸收能力。不同农作物对重金属的吸收能力通常用农作物对土壤中某重金属富集系数来表示,富集系数=农作物中某重金属的浓度/该重金属在土壤中的浓度<sup>[20]</sup>。富集系数是最常用评价植物吸收富集重视的生物评价指标,富集系数越大表示其该重金属富集能力越强<sup>[21]</sup>。从图 1 可知,

菠菜对 As, Cd, Hg, Pb 的富集系数比其余农作物高, 富集系数分别为 0.27, 7.47, 2.32, 0.67。萝卜叶对 Cr 和 Zn 的富集能力较强, 富集系数分别为 0.59 和 4.04。重金属 Cr 富集系数最低的是玉米, Zn 和 Hg 富集系数最低的是萝卜根, Cd 和 Pb 富集系数最低为马铃薯, As

富集能力最低的为白菜。工业的发展及城市化使得土壤受到一定程度的重金属污染, 对于污染相对较轻的土壤可以从两方面来处理, 一是选育重金属富集能力弱的农作物, 另一方面发掘利用重金属富集能力植物, 采用植物技术来修复受污染的土壤<sup>[22]</sup>。

表 5 草海生态区不同品种农作物重金属污染评价指数

作物	单因子污染指数						综合污染指数	污染等级
	Cr	Zn	As	Cd	Hg	Pb		
青菜	0.730	0.064	0.700	1.120	1.200	1.025	0.806	警戒线
白菜	0.436	0.054	0.860	1.220	1.100	1.135	0.801	警戒线
菜苔	0.532	0.036	0.340	0.820	1.600	1.445	0.796	警戒线
菠菜	0.976	0.062	1.180	1.360	1.600	1.530	1.118	轻污染
豌豆尖	0.376	0.054	0.760	1.080	2.100	0.925	0.882	警戒线
葱	0.204	0.049	0.480	0.880	1.200	1.110	0.654	安全
蒜苗	0.552	0.035	0.680	0.840	1.600	1.315	0.837	警戒线
萝卜根	0.248	0.028	0.520	0.820	0.900	0.840	0.559	安全
萝卜叶	1.016	0.064	0.840	1.260	1.800	1.140	1.020	轻污染
马铃薯	0.172	0.034	0.500	0.720	1.300	0.945	0.612	警戒线
玉米	0.090	0.034	0.820	0.920	1.500	1.135	0.750	警戒线
平均值	0.485	0.047	0.698	1.004	1.445	1.140	0.803	警戒线

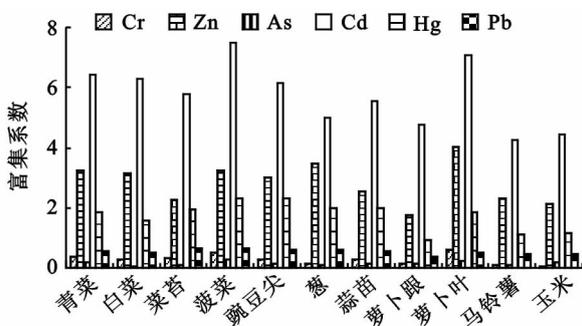


图 1 草海生态区不同品种农作物重金属富集系数

## 4 讨论

草海周边耕地土壤重金属 Hg 和 Cd 的含量偏高, 基本都超出了国家土壤二级标准值。而叶菜类对重金属的吸收富集能力最强, 研究也表明草海生态区叶菜类蔬菜的 Cd 和 Pb 含量较高, 因而在草海重金属污染区应有意识地减少小白菜、青菜、空心菜等易富集重金属的叶菜类农作物种植面积, 相应地增加萝卜、辣椒、马铃薯等根菜类、果菜类农作物的种植比例; 不同农作物对重金属富集能力存在明显差异, 如菜苔、白菜、豌豆尖等对土壤 Hg 比较敏感, 菠菜等对土壤 As 比较敏感, 因此, 生产上应根据不同农作物种类、品种间存在的对重金属富集的基因型差异特性, 以及草海当地居民对农作物习惯性消费结构、产地环境质量、生产技术水平等因素, 有针对性地筛选或选育耐、抗重金属污染的农作物类型品种。

对于草海周边耕地土壤重金属污染较严重的地

区, 可通过施用改良剂、钝化剂等降低土壤污染物的水溶性、扩散性和生物有效性, 降低污染物进入生物链的能力; 草海底泥也要经过改良处理, 在保留其营养元素的基础上, 降低其重金属污染的能力, 再用于耕地使用。同时可提高土壤 pH 值, 降低重金属离子的活性, 土壤 pH 对蔬菜 Cd 的生物富集程度有较大影响, 较高的土壤 pH 可降低蔬菜的 Cd 富集程度, 针对草海耕地土壤 Cd 污染超标的现象, 可通过向土壤中添加  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  等碱性物质来实现提高土壤 pH 值的目的是。提高土壤 pH 值, 对减弱蔬菜累积重金属的效果明显。

## 5 结论

(1) 草海生态区耕地土壤重金属元素除 Zn, As, Cr 平均含量未超过贵州省土壤元素背景值, 其他 3 种重金属均超出贵州省土壤背景值含量, 且 Pb, Cd, Hg 平均值分别是背景值的 1.24, 1.44, 7.5 倍, 相应的超标点位所占比例分别为: 77.14%, 80.0%, 100.00%; 6 种重金属污染程度排序:  $\text{Hg} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{As} > \text{Cr} > \text{Zn}$ 。

(2) 与中国《食品中污染物限量》标准 (GB 2762—2005) 相比, 除 Hg 平均含量均超标外, 蔬菜中 As, Cr, Zn, Cd 和 Pb 平均含量处在可接受范围内; 与《农产品安全质量无公害蔬菜安全要求》标准 (GB18406.1—2001) 相比, Cr 和 As 平均含量低于标准值, Cd, Hg, Pb 平均含量则超标。

(3) 6 种重金属在不同作物中的单因子污染指数

的高低依次是  $Hg > Pb > Cd > As > Cr > Zn$ 。单因子污染指数最高是豌豆尖中的  $Hg$ ，最低的是萝卜根中的  $Zn$ 。菠菜和萝卜叶综合污染指数分别为 1.118, 1.020, 属于轻污染; 葱和萝卜跟处于安全水平, 其余农作物虽然没有受到污染, 但是处于警戒线。

(4) 菠菜对  $As, Cd, Hg, Pb$  的富集系数分别为 0.27, 7.47, 2.32, 0.67, 高于其余农作物。萝卜叶对  $Cr$  和  $Zn$  的富集能力较强, 重金属  $Cr$  富集系数最低的是玉米,  $Zn$  和  $Hg$  富集系数最低的是萝卜根,  $Cd$  和  $Pb$  富集系数最低为马铃薯,  $As$  富集能力最低的为白菜。

#### 参考文献:

- [1] 吕烈武, 郭彬, 漆智平. 海南省万宁市水稻土重金属污染的初步研究[J]. 热带作物学报, 2009(7): 1023-1027.
- [2] 潘根兴, Chang A C, Page A L. 土壤—作物污染物迁移分配与食品安全的评价模型及其应用[J]. 应用生态学报, 2002, 13(7): 854-858.
- [3] 于磊, 张柏. 基于 GIS 的黑土区农业地球化学环境质量综合评价研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(12): 421-424.
- [4] 董霁红, 卞正富, 王贺封, 等. 徐州矿区充填复垦场地作物重金属含量研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(5): 180-182.
- [5] 严连香, 黄标, 邵学新, 等. 锌铬复合胁迫对水稻植株碳氮代谢的影响[J]. 水土保持研究, 2008, 15(5): 149-152.
- [6] 梅凡民, 陈敏, 朱海波. 西安市不同灌溉类型农田土壤重金属污染状况研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 223-226.
- [7] 任晓冬, 黄明杰. 草海流域综合管理研究[J]. 生态经济, 2008, 20(5): 147-151.
- [8] 林绍霞, 张清海, 郭媛, 等. 贵州草海沉积物重金属污染特征及潜在生态风险分析[J]. 农业环境科学学报 2012, 31(11): 2236-2241.
- [9] 丁玉娟, 林昌虎, 何腾兵, 等. 贵州草海耕地土壤重金属污染特征及安全评价[J]. 贵州科学 2013, 31(2): 47-51.
- [10] 卫四涛, 林昌虎, 何腾兵, 等. 草海湖区耕地土壤 HCHs、DDTs 农药残留状况分析[J]. 贵州科学, 2013, 31(2): 52-55.
- [11] 蔡晓玲, 黄小柱, 廖德平. 草海国家级自然保护区耕地土壤化学性质分析[J]. 内蒙古农业科技, 2010(3): 60-61.
- [12] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 330-381.
- [13] 宋春然, 何锦林, 谭红, 等. 贵州农业土壤重金属污染的初步评价[J]. 贵州农业科学, 2005, 33(2): 13-16.
- [14] NY/T391-2000. 绿色食品: 产地环境技术条件[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [15] 许嘉琳, 杨居荣. 陆地生态系统中的重金属[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995.
- [16] 丁真真. 中国农田土壤重金属污染与其植物修复研究[J]. 水土保持研究 2007, 14(3): 19-21.
- [17] GB2762-2005. 食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [18] GB18406.1-2001. 农产品安全质量无公害蔬菜安全要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [19] 胡省英, 冉伟彦, 范宏瑞. 土壤—作物系统中重金属元素的地球化学行为[J]. 地质与勘探, 2003, 39(5): 84-87.
- [20] 荆旭慧, 李恋卿, 潘根兴. 不同环境下土壤作物系统中重金属元素迁移分配特点[J]. 生态环境, 2007, 16(3): 812-817.
- [21] 毛岭峰, 彭培好, 陈文德. 重庆地区主要作物重金属富集特征[J]. 生态学杂志, 2009, 28(6): 1117-1122.
- [22] 南忠仁, 李吉均, 张建明, 等. 白银市区土壤作物系统重金属污染分析与防治对策研究[J]. 环境污染与防治, 2002, 24(3): 170-173.
- [23] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [24] 蓝盛芳, 钦佩. 生态系统的能值分析[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 129-131.
- [25] 陆宏芳, 蓝盛芳, 陈飞鹏, 等. 农业生态系统能量分析[J]. 应用生态学报, 2004, 15(1): 159-162.
- [26] 陆宏芳, 叶正, 赵新峰, 等. 城市可持续发展能力的能值评价新指标[J]. 生态学报, 2003, 23(7): 1363-1368.
- [27] 高长波, 陈新庚, 韦朝海, 等. 广东省生态安全状态及趋势定量评价[J]. 生态学报, 2006, 26(7): 2191-2197.
- [28] 任志远, 黄青, 李晶. 陕西省生态安全及空间差异定量分析[J]. 地理学报, 2005, 60(4): 597-606.

(上接第 272 页)

- [17] 余建, 房莉, 仓定帮, 等. 熵权模糊物元模型在土地生态安全评价中的应用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 260-266.
- [18] 杨春红, 张正栋, 田楠楠, 等. 基于 P-S-R 模型的汕头市土地生态安全评价[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 209-214.
- [19] 陈西蕊, 张蓉珍. 基于 PSR 模型的陕西省土地资源生态安全动态评价[J]. 南方农业学报, 2011, 42(2): 224-228.
- [20] 张智光. 基于生态—产业共生关系的林业生态安全测度方法构想[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 1326-1336.