

网络出版时间:2016-05-03 14:05

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2016.06.013

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20160503.1405.026.html

陕西商洛某冶炼厂周边农作物重金属污染评价

李堆淑^{1a}, 胡景江², 张善红^{1b}

(1 商洛学院 a 生物医药与食品工程学院, b 城乡规划与建筑工程学院, 陕西 商洛 726000;

2 西北农林科技大学 生命科学院, 陕西 杨凌 712100)

[摘要] **【目的】**分析陕西商洛某冶炼厂周边农作物的重金属污染状况,为当地农作物的科学种植提供参考。**【方法】**以商洛某冶炼厂周边的小麦、玉米、香菜、青菜、菠菜、油菜、葱、蒜等农作物为研究对象,测定农作物中 Cu、Zn、Cd、Ni 4 种重金属的含量,采用单项污染指数法、综合指数法和聚类分析法评价农作物中 4 种重金属的污染状况。**【结果】**研究区农作物中 Zn、Cu、Ni 含量均未超标,但是青菜、菠菜、油菜、香菜、小麦中出现了不同程度的 Cd 含量超标现象,由单项污染指数可知,小麦叶、秆及油菜叶和青菜茎 Cd 轻度污染,香菜茎、叶和青菜叶、菠菜叶中 Cd 重度污染。由重金属综合污染指数($P_{\text{综合}}$)可知,麦秆的重金属污染属警戒级,小麦叶、青菜茎、油菜叶属轻度污染,香菜茎、叶和青菜叶、菠菜叶属重度污染,与聚类分析结果一致。农作物中的 Cd 与 Ni、Cd 与 Zn、Ni 与 Zn 之间存在着极显著的正相关性,说明其污染源可能相似,也可能是复合污染所致。**【结论】**陕西商洛某冶炼厂周边叶菜类蔬菜吸附重金属能力较强,玉米、大蒜、葱未被重金属污染,适合于研究区种植,而香菜、青菜、菠菜、油菜和小麦已被重金属污染,尤其是香菜、青菜、菠菜不适合于研究区种植。

[关键词] 冶炼厂周边;重金属污染;农作物;污染评价;陕西商洛

[中图分类号] X826

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2016)06-0085-08

Evaluation of heavy metal pollution of crops around a smelting plant in Shangluo, Shaanxi

LI Dui-shu^{1a}, HU Jing-jiang², ZHANG Shan-hong^{1b}

(1a College of Biopharmaceutical Engineering and Food Science, b College of Urban, Rural Planning and Architectural Engineering, Shangluo University, Shangluo, Shaanxi 726000, China; 2 College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objection】** The heavy metal pollution of crops around a smelting plant in Shangluo, Shaanxi was evaluated to provide reference for planting crops with scientific methods. **【Method】** Contents of four heavy metals, Zn, Cu, Ni, and Cd, in wheat, corn, parsley, green vegetables, spinach, cole, onion, garlic and other crops were determine. Then, the contamination levels were analyzed and evaluated using single pollution index method, comparative index method and clustering analysis. **【Result】** Contents of Zn, Cu, and Ni in crops did not exceed the standards. Contents of Cd in green vegetables, spinach, cole, parsley and wheat exceeded the standard. According to the single pollution index, wheat leaves, wheat straws, rape leaves and green vegetables stalks had light Cd contamination. Stems and leaves of parsley, green vegetables, and spinach leaves were in heavy Cd contamination. According to comprehensive pollution index, the contamination of heavy metals in wheat straw reached the warning line, barley leaves, stems of green vegetables and rape

[收稿日期] 2014-10-22

[基金项目] 国家自然科学基金项目(31170366);商洛市科学技术研究项目(SK2015-12);商洛学院科研基金项目(15SKY-FWDF005)

[作者简介] 李堆淑(1977—),女,宁夏隆德人,副教授,硕士,主要从事植物逆境生理学及环境研究。

[通信作者] 胡景江(1957—),男,陕西定边人,教授,硕士生导师,主要从事植物逆境生理学研究。

leaves were slightly polluted, while stems and leafs of parsley, leaves of green vegetables and leaves of spinach were heavily polluted. All the findings were in accordance with the results of clustering analysis. There were very significant positive correlations between Cd and Ni, Cd and Zn, as well as Ni and Zn, indicating that the pollution sources were similar and the pollution was combined. 【Conclusion】 The leafy vegetables around the smelting plant had strong capacity of absorbing heavy metals. Corn, garlic and shallot were not polluted and were suitable for planting in the research area. The heavily polluted caraway, green vegetables, spinach, rape and wheat were not suitable for planting in the study area.

Key words: smelting plant; heavy metal pollution; crop; pollution evaluation; Shangluo, Shaanxi

影响农作物重金属污染的主要因素是化学农药和化肥的长期施用、污水灌溉及化工、冶炼、采矿工业三废的排放等,其中以工业厂矿周边农田重金属积累最为严重,进而迁移并富集到农产品中,最终对消费者的健康造成影响^[1-3]。矿产资源的开发,严重污染了矿区环境,破坏了生态环境^[4],特别是铅锌矿区土壤有大量的重金属富集^[5]。美国蒙大拿洲西部 Clark Fork 河盆地,长年开采铜及其他有色金属,土壤中重金属富集系数特别高^[6]。福建连城锰矿、尤溪铅锌矿、连城铅锌矿矿区土壤已被 Mn、Zn、Pb、Cd 重金属严重污染^[7]。福建省长汀县稀土采矿区主要蔬菜受到重金属 As 和 Cd 污染,分别超标 10.926 和 1.016 倍^[8]。目前,我国金属矿山开采所产生的大量酸性废水、废气及废渣中经风化和淋滤流失的有毒有害重金属严重污染了矿区的生态环境^[8-9]。阮心玲等^[10]和 Biester 等^[11]研究发现,来自大气沉降的重金属主要在土壤表层富集,向下迁移的程度较小。农作物是人类的食物,土壤如果受到重金属污染,重金属将以不同的形态迁移到农作物中,进一步通过食物链进入人体并不断地累积,将会影响人体正常的生理功能^[12-13]。在陕西省商洛地区,冶炼铅锌等有色金属的厂矿比较多,不但污染了周边的环境,导致重金属不断在土壤和农作物中积累,既影响了农作物的生长,也影响到居民的身体。同时,当地居民为提高农作物的产量,化肥、农药的使用量逐年增加,致使重金属污染物直接或间接地进入农田土壤和农作物,给人体健康带来潜在危害,但目前关于陕西商洛有色金属冶炼厂周边农作物重金属富集的情况尚未见报道。为此,本研究对陕西商洛某冶炼厂周边农作物中的 Ni、Zn、Cu、Cd 等 4 种重金属含量进行测定,并对不同农作物不同部位重金属含量的分布规律及污染状况进行探讨,以为当地居民合理规划冶炼厂周边农作物种植提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

某冶炼厂位于陕西省东南部的秦岭南麓、丹江之畔,紧邻 312 国道,与西合铁路商洛站紧紧相邻,沪陕高速公路穿境而过,交通发达,区位优势明显。企业始建于 1987 年,工厂改建后逐步达到 5 万 t 电锌生产规模,主要经营范围为:锌制品及相关有色金属矿产品;硫酸等化工产品的生产、经营及加工。厂区占地面积 13.33 余 hm^2 ,建筑面积约为 4 万 m^2 ,主要生产及测试设备千余台(件)。冶炼厂所在乡镇有 4 万余村民,全镇总面积 168 km^2 ,其中耕地面积 1 322.13 hm^2 。

1.2 材料

采自陕西省商洛市某冶炼厂周边的农作物包括:小麦(离厂较近的命名为小麦 1,分别测其籽粒(麦粒 1)和叶片(麦叶 1);离厂较远的命名为小麦 2,测其籽粒(麦粒 2)和叶片(麦叶 2))、玉米(离厂较近的命名为玉米 1,离厂较远的命名为玉米 2)、香菜、青菜、菠菜、油菜、葱、蒜等 19 种样品。从冶炼厂的东门出发,顺着围墙往西走,采样区覆盖的面积为 500 m $\times$ 500 m,每种农作物样品的区域采集用对角线法采集 5 块,清洗除杂,杀青,烘干,粉碎,混合均匀,过 0.147 mm 尼龙筛备用。

1.3 方法

1.3.1 测定方法 分别称取 0.5 g 样品(精确到 0.000 1 g),置于洁净干燥的石墨玻璃消解管中,加入 HNO_3 和 H_2O_2 混合液(体积比为 7:1),摇动使样品与消化剂充分混合,浸样过夜。在 150 $^\circ\text{C}$ 下消解 20 min,直到消解液无色澄清为止,然后冷却至室温。若消解液澄清仍有淡黄色,则需水浴(95 $^\circ\text{C}$)加热赶酸,直至消解液无色澄清。冷却至室温加入 2.5 mL 硫脲-抗坏血酸混合溶液,转移至 50 mL 容量瓶中,用超纯水定容至刻度,抽滤样液,使溶液澄清待测。采用 TAS-986 原子吸收分光光度计(北京

普析通用公司生产)测定 Cu、Zn、Ni 和 Cd 含量^[14],每个样品测 5 次取平均值,共设 3 个重复。

1.3.2 评价方法 采用单项污染指数法和综合污染指数法评价冶炼厂周边农作物的重金属污染状况。

(1)单项污染指数法^[15-16]。计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i。$$

表 1 农作物中重金属含量的极限评价标准
Table 1 Limit standard of heavy metals in crops

重金属元素 Element	粮食/(mg·kg ⁻¹) Grain	蔬菜/(mg·kg ⁻¹) Vegetable	标准 Standard
Cu	≤10	≤10	GB 15199—94
Zn	≤50	≤20	GB 13106—91
Cd	≤0.05	≤0.05	GB 15201—94
Ni	≤0.4	≤0.4	GB 2715—81

(2)内梅罗综合污染指数法^[16]。样品综合污染指数($P_{综合}$)的计算公式为:

$$P_{综合} = [(C_i / S_i)_{ave}^2 + (C_i / S_i)_{max}^2]^{1/2}。$$

表 2 农作物重金属综合污染指数的分级标准

Table 2 Classification criteria for comprehensive pollution index of heavy metal in crops

等级划分 Classification	$P_{综合}$	污染等级 Pollution grade	污染水平 Pollution level
I	$P_{综合} \leq 0.7$	安全 Safety	清洁 Clean
II	$0.7 < P_{综合} \leq 1$	警戒级 Alert level	尚清洁 Still clean
III	$1 < P_{综合} \leq 2$	轻度污染 Slight pollution	作物开始受到污染 Crops begin to be contaminated
IV	$2 < P_{综合} \leq 3$	中度污染 Moderate pollution	作物均受重度污染 Crops are heavily polluted
V	$P_{综合} > 3$	重度污染 Heavy pollution	作物污染相当严重 Crops are seriously polluted

1.3.3 数据处理 用 Excel 2003 和 SPSS 17.0 统计软件对分析数据进行相关性、线性回归和系统聚类分析。

2 结果与分析

2.1 农作物中 4 种重金属的含量及污染状况分析

陕西商洛市某冶炼厂周边农作物中重金属含量的测定结果见表 3。由表 3 可知,19 种样品中,只有青菜叶、青菜茎、油菜叶、菠菜叶、香菜茎、香菜叶和

式中: P_i 为样品中污染物 i 的单项污染指数; C_i 为污染物 i 的实测含量,mg/kg; S_i 为污染物 i 的极限评价标准,mg/kg。农作物中重金属含量的极限评价标准见表 1。 $P_i < 1$ 时,表示样品安全; $1 \leq P_i < 2$ 时,表示样品轻度污染; $2 \leq P_i < 3$ 时,表示样品中度污染; $P_i > 3$ 时,表示样品重度污染。

式中: $(C_i / S_i)_{ave}$ 为样品单项污染指数的平均值, $(C_i / S_i)_{max}$ 为样品单项污染指数的最大值。农作物中重金属综合污染指数的分级标准^[17]见表 2。

麦叶、麦秆中的重金属 Cd 含量超过了农作物中重金属含量的极限评价标准;19 种样品中的 Zn、Ni 和 Cu 含量均在农作物重金属的极限评价标准范围内,说明其是安全的。Cd 含量最大是青菜叶,最小的是玉米粒。青菜中叶的 Cd 含量大于茎,香菜茎中的 Cd 含量大于叶,油菜各部位中的 Cd 含量表现为叶>秆>颖壳,蒜苗中蒜头的 Cd 含量大于蒜叶,小麦各部位的 Cd 含量表现为麦叶>秆>颖壳>麦粒。

表 3 陕西商洛某冶炼厂周边农作物中重金属的含量

Table 3 Contents of heavy metals in crops around a smelting plant in Shangluo,Shaanxi

样品 Sample	Cd			Cu		
	平均值/ (mg·kg ⁻¹) Average value	标准差/ (mg·kg ⁻¹) SD	变异系数/% RSD	平均值/ (mg·kg ⁻¹) Average value	标准差/ (mg·kg ⁻¹) SD	变异系数/% RSD
麦粒 1 Grain of wheat 1	0.012 69	0.000 12	2.596 94	1.240 20	0.000 74	0.595 82
麦粒 2 Grain of wheat 2	0.021 46	0.000 28	3.580 47	0.568 09	0.000 51	0.895 06
麦叶 1 Leaf of wheat 1	0.078 44	0.000 09	0.300 01	0.439 97	0.000 35	0.790 61
麦叶 2 Leaf of wheat 2	0.071 80	0.004 47	16.942 27	0.434 62	0.000 70	1.616 50
麦颖壳 Glumes of wheat	0.027 03	0.001 72	17.379 89	0.308 61	0.000 47	1.538 58
麦秆 Wheat straw	0.050 33	0.001 00	5.394 21	0.239 10	0.000 12	0.512 63
玉米粒 1 Corn grain 1	0.005 55	0.000 12	5.808 01	0.398 77	0.000 03	0.071 16
玉米粒 2 Corn grain 2	0.006 78	0.000 07	2.911 49	0.515 80	0.000 08	0.154 85
香菜茎 Stem of coriander	0.289 46	0.000 17	0.163 98	0.499 49	0.000 16	0.323 88

续表 3 Continued table 3

样品 Sample	Cd			Cu		
	平均值/ (mg · kg ⁻¹) Average value	标准差/ (mg · kg ⁻¹) SD	变异系数/% RSD	平均值/ (mg · kg ⁻¹) Average value	标准差/ (mg · kg ⁻¹) SD	变异系数/% RSD
香菜叶 Leaf of coriander	0.269 08	0.003 21	3.251 60	0.706 98	0.000 29	0.413 35
青菜叶 Leaf of brassica chinensis	0.372 69	0.000 11	0.079 89	0.635 60	0.000 28	0.446 06
青菜茎 Stem of brassica chinensis	0.072 40	0.000 25	0.936 24	0.678 79	0.000 27	0.401 91
油菜叶 Leaf of rape	0.079 35	0.000 16	0.541 91	3.940 33	0.000 91	0.231 32
油菜颖壳 Glumes of rape	0.007 03	0.000 17	6.762 10	1.325 72	0.000 62	0.471 16
油菜秆 Rape straw	0.039 57	0.000 33	2.240 55	1.293 12	0.000 45	0.346 97
蒜叶 Leaf of garlic	0.025 37	0.002 86	30.728 20	0.707 91	0.000 77	1.094 72
蒜头 Garlic bulb	0.026 94	0.000 47	4.788 91	1.416 09	0.000 68	0.480 21
菠菜叶 Leaf of spinach	0.288 93	0.000 84	0.793 39	1.542 40	0.000 47	0.309 29
葱白 Onion white	0.031 81	0.000 51	4.327 60	2.340 14	0.001 61	0.689 87

样品 Sample	Zn			Ni		
	平均值/ (mg · kg ⁻¹) Average value	标准差/ (mg · kg ⁻¹) SD	变异系数/% RSD	平均值/ (mg · kg ⁻¹) Average value	标准差/ (mg · kg ⁻¹) SD	变异系数/% RSD
麦粒 1 Grain of wheat 1	1.227 24	0.001 54	0.499 95	0	0	0
麦粒 2 Grain of wheat 2	0.774 77	0.001 27	0.560 07	0	0	0
麦叶 1 Leaf of wheat 1	4.701 91	0.000 46	0.064 83	0	0	0
麦叶 2 Leaf of wheat 2	4.739 83	0.000 93	0.131 86	0	0	0
麦颖壳 Glumes of wheat	2.045 18	0.000 65	0.152 06	0	0	0
麦秆 Wheat straw	2.729 17	0.000 47	0.092 26	0	0	0
玉米粒 1 Corn grain 1	0.467 06	0.001 75	1.098 49	0	0	0
玉米粒 2 Corn grain 2	0.589 28	0.001 16	0.618 30	0	0	0
香菜茎 Stem of coriander	4.512 34	0.001 25	0.182 16	0	0	0
香菜叶 Leaf of coriander	6.761 01	0.001 24	0.142 60	0.062 54	0.000 16	2.984 76
青菜叶 Leaf of brassica chinensis	7.188 70	0.000 61	0.068 20	0.043 32	0.000 16	4.110 64
青菜茎 Stem of brassica chinensis	4.767 73	0.001 06	0.149 57	0.018 03	0.000 21	13.657 40
油菜叶 Leaf of rape	5.344 97	0.001 66	0.217 92	0.049 38	0.000 59	13.715 66
油菜颖壳 Glumes of rape	1.110 20	0.001 54	0.534 20	0	0	0
油菜秆 Rape straw	1.233 85	0.000 12	0.039 93	0	0	0
蒜叶 Leaf of garlic	1.990 79	0.000 64	0.152 18	0	0	0
蒜头 Garlic bulb	2.016 71	0.010 78	2.553 82	0	0	0
菠菜叶 Leaf of spinach	7.231 96	0.000 43	0.047 86	0.068 17	0.000 07	1.214 84
葱白 Onion white	1.860 29	0.000 25	0.062 39	0.024 89	0.000 13	5.824 26

为评价农作物小麦、玉米、香菜、青菜、菠菜、油菜、葱、蒜等的食用安全性,利用单项污染指数法和综合污染指数法计算 19 种样品的重金属单项污染指数(P_i)及综合污染指数($P_{综合}$),结果见表 4。

表 4 陕西商洛某冶炼厂周边农作物中重金属的单项污染指数和综合污染指数

样品 Sample	P_i				$P_{综合}$	污染程度 Pollution degree
	Cd	Cu	Ni	Zn		
麦粒 1 Grain of wheat 1	0.253 8	0.124 020	0	0.000 031	0.200 347	安全 Safety
麦粒 2 Grain of wheat 2	0.429 2	0.056 809	0	0.000 025	0.324 392	安全 Safety
麦叶 1 Leaf of wheat 1	1.568 8	0.043 997	0	0.000 009	1.172 636	轻度污染 Slight pollution
麦叶 2 Leaf of wheat 2	1.436 0	0.043 462	0	0.000 019	1.073 616	轻度污染 Slight pollution
麦颖壳 Glumes of wheat	0.540 6	0.030 861	0	0.000 013	0.405 230	安全 Safety
麦秆 Wheat straw	1.006 6	0.023 910	0	0.000 009	0.752 077	警戒级 Alert level
玉米粒 1 Corn grain 1	0.111 0	0.039 877	0	0.000 035	0.086 174	安全 Safety
玉米粒 2 Corn grain 2	0.135 6	0.051 580	0	0.000 023	0.105 551	安全 Safety
香菜茎 Stem of coriander	5.789 2	0.049 949	0	0.000 063	4.318 757	重度污染 Heavy pollution
香菜叶 Leaf of coriander	5.381 6	0.070 698	0.156 35	0.000 062	4.028 456	重度污染 Heavy pollution
青菜叶 Leaf of brassica chinensis	7.453 8	0.063 560	0.108 30	0.000 031	5.568 679	重度污染 Heavy pollution

续表 4 Continued tabe 4

样品 Sample	P_i				$P_{\text{综合}}$	污染程度 Pollution degree
	Cd	Cu	Ni	Zn		
青菜茎 Stem of brassica chinensis	1.448 0	0.067 879	0.045 075	0.000 053	1.087 992	轻度污染 Heavy pollution
油菜叶 Leaf of rape	1.587 0	0.394 033	0.123 450	0.000 083	1.226 927	轻度污染 Slight pollution
油菜颖壳 Glumes of rape	0.140 6	0.132 572	0	0.000 077	0.118 457	安全 Safety
油菜秆 Rape straw	0.791 4	0.129 312	0	0.000 006	0.600 211	安全 Safety
蒜叶 Leaf of garlic	0.507 4	0.070 791	0	0.000 032	0.383 799	安全 Safety
蒜头 Garlic bulb	0.538 8	0.141 609	0	0.000 539	0.413 416	安全 Safety
菠菜叶 Leaf of spinach	5.778 6	0.154 240	0	0.000 022	4.319 259	重度污染 Heavy pollution
葱白 Onion white	0.636 2	0.234 014	0.062 225	0.000 013	0.500 678	安全 Safety
总体平均值 Population mean	1.726 0	0.101 220	0.099 080	0.000 060	1.404 561	轻度污染 Slight pollution

由表 4 可知,19 种样品中,Cu、Ni、Zn 的 $P_i < 1$,即低于标准值,说明样品是安全的。麦叶、麦秆、青菜茎、油菜叶中 Cd 的 $P_i = >1 \sim \leq 2$,属轻度污染等级;而香菜的茎和叶、青菜叶、菠菜叶中 Cd 的 $P_i > 3$,属于重度污染;其他样品中 Cd 的 $P_i < 1$,属安全等级。总体来看,供试样品中 Cd 的超标率达到 47.37%。小麦(叶、颖壳、秆)、玉米、香菜茎、油菜(颖壳和秆)、蒜(叶和蒜头)、菠菜叶中重金属单项污染指数的大小顺序为 $Cd > Cu > Zn > Ni$,香菜叶、青菜叶中重金属单项污染指数的大小顺序为 $Cd > Ni > Cu > Zn$,油菜叶、葱白中重金属单项污染指数的大小顺序为 $Cd > Cu > Ni > Zn$ 。

表 5 陕西商洛某冶炼厂周边农作物中各重金属含量间的相关分析($n=19$)

Table 5 Correlation analysis of heavy metals in crops around a smelting plant in Shangluo, Shaanxi($n=19$)

重金属元素 Element	Cd	Cu	Ni	Zn
Cd	1.000			
Cu	-0.058	1.000		
Ni	0.720 **	0.002	1.000	
Zn	0.844 **	0.123	0.628 **	1.000

注: ** 表示极显著相关($P < 0.01$),表 7 同。
Note: ** indicates highly significant correlation ($P < 0.01$). The same for Table 7.

由表 5 可知,农作物中重金属元素 Cd 与 Ni、Zn 的相关系数分别为 0.720 和 0.844,均呈极显著正相关,Ni 与 Zn 的相关系数为 0.628,也呈极显著正相关,表明炼锌厂周边农作物中存在着不同程度、不同组合的多种重金属污染物,并且重金属元素 Cd 与 Ni、Cd 与 Zn、Ni 与 Zn 向植物地上部的转运是相互促进的。而重金属元素 Cu 与 Cd、Cu 与 Ni 相关

由表 4 还可知,麦秆的重金属综合污染指数 $P_{\text{综合}} = >0.7 \sim \leq 1$,属警戒级;麦叶、青菜茎和油菜叶的重金属综合污染指数 $P_{\text{综合}} = >1 \sim \leq 2$,属轻度污染;香菜(茎和叶)、青菜叶、菠菜叶的重金属综合污染指数 $P_{\text{综合}} > 3$;其他样品的重金属综合污染指数 $P_{\text{综合}} \leq 0.7$,属安全等级。小麦各部位 Cd 的综合污染指数表现为叶 $>$ 秆 $>$ 颖壳 $>$ 籽粒,其他农作物受 Cd 的综合污染程度基本上以叶较其他部位严重。

2.2 农作物重金属污染的相关性分析

采用 SPSS 17.0 统计软件对各农作物中重金属含量之间的相关性进行分析,结果见表 5。

性不显著,其中 Cu 与 Cd 之间呈现负效应,表明农作物中的重金属元素 Cu 可能与其他重金属元素的化学反应不同,也可能是农作物中的重金属元素 Cu 与其他重金属元素的来源不同。

对小麦各器官中重金属污染的相关性进行分析,结果见表 6。

表 6 陕西商洛某冶炼厂周边农田小麦各器官中重金属污染的相关分析($n=6$)

Table 6 Correlation analysis of heavy metal contamination between organs of wheat around a smelting plant in Shangluo, Shaanxi($n=6$)

器官 Organs	籽粒 Grain	叶 Leaf	颖壳 Glumes	秆 Straw
粒 Grain	1.000			
叶 Leaf	0.892 *	1.000		
颖壳 Glumes	-0.035	0.608	1.000	
秆 Straw	-0.065	0.584	0.998 *	1.000

注: * 表示显著相关($P < 0.05$),表 7 同。
Note: * indicates significant correlation ($P < 0.05$). The same for Table 7.

由表 6 可知,小麦籽粒与叶中重金属污染的相关系数为 0.892,麦秆与颖壳中重金属污染的相关系数为 0.998,均呈显著正相关($P<0.05$);小麦其他器官之间重金属污染的相关性不显著,其中籽粒与颖壳和麦秆中的重金属污染呈负效应关系。

利用 SPSS 17.0 统计软件对各农作物之间的重金属污染状况进行相关性分析,结果(表 7)表明,玉米与香菜、玉米与蒜、香菜与蒜、菠菜与葱、青菜与菠菜、

青菜与葱之间均呈极显著正相关,香菜与青菜、青菜与油菜、菠菜与油菜、香菜与葱之间均呈显著正相关,说明这些农作物所受的重金属污染可能属于非点源污染类型,污染程度比较接近^[18]。其他农作物之间重金属污染的相关性不显著,尤其小麦与其他农作物之间重金属相关性均不显著,并且小麦与玉米、香菜、青菜、蒜、菠菜、葱之间重金属污染的相关性均呈现出负效应,体现了农田生态系统污染源的复杂性。

表 7 陕西商洛某冶炼厂周边农作物之间重金属污染的相关性分析($n=18$)

Table 7 Correlation analysis of heavy metal pollution between crops around a smelting plant in Shangluo, Shaanxi($n=18$)

农作物 Crop	小麦 Wheat	玉米 Corn	香菜 Coriander	青菜 Brassica chinensis	油菜 Rape	蒜 Garlic	菠菜 Spinach	葱 Onion
小麦 Wheat	1.000							
玉米 Corn	−0.464	1.000						
香菜 Coriander	−0.343	0.911 **	1.000					
青菜 Brassica chinensis	−0.318	0.615	0.811 *	1.000				
油菜 Rape	0.326	0.418	0.552	0.857 *	1.000			
蒜 Garlic	−0.621	0.979 **	0.973 **	0.722	0.454	1.000		
菠菜 Spinach	−0.621	0.293	0.573	0.988 **	0.883 *	0.468	1.000	
葱 Onion	−0.861	0.657	0.843 *	0.984 **	0.760	0.767	0.963 **	1.000

2.3 农作物重金属污染程度的聚类分析

以农作物对 Cd、Cu、Zn 和 Ni 的单项污染指数为参数,对 19 种样品进行聚类分析,结果见图 1。由图 1 可知,某冶炼厂周边农作物按污染程度可以分为 4 类:第 I 类为香菜茎、菠菜叶、香菜叶、青菜叶,4 种重金属对其污染的综合程度为严重污染;第

II 类为麦叶 1、麦叶 2、青菜茎、油菜叶,4 种重金属对其污染的综合程度为轻度污染;第 III 类为麦秆,4 种重金属对其污染的综合程度属警戒级污染;第 IV 类为玉米粒 1、玉米粒 2、麦粒 2、蒜叶、麦颖壳、麦粒 1、油菜秆、油菜颖壳、葱白、蒜头,4 种重金属对其污染的综合程度属安全级别。

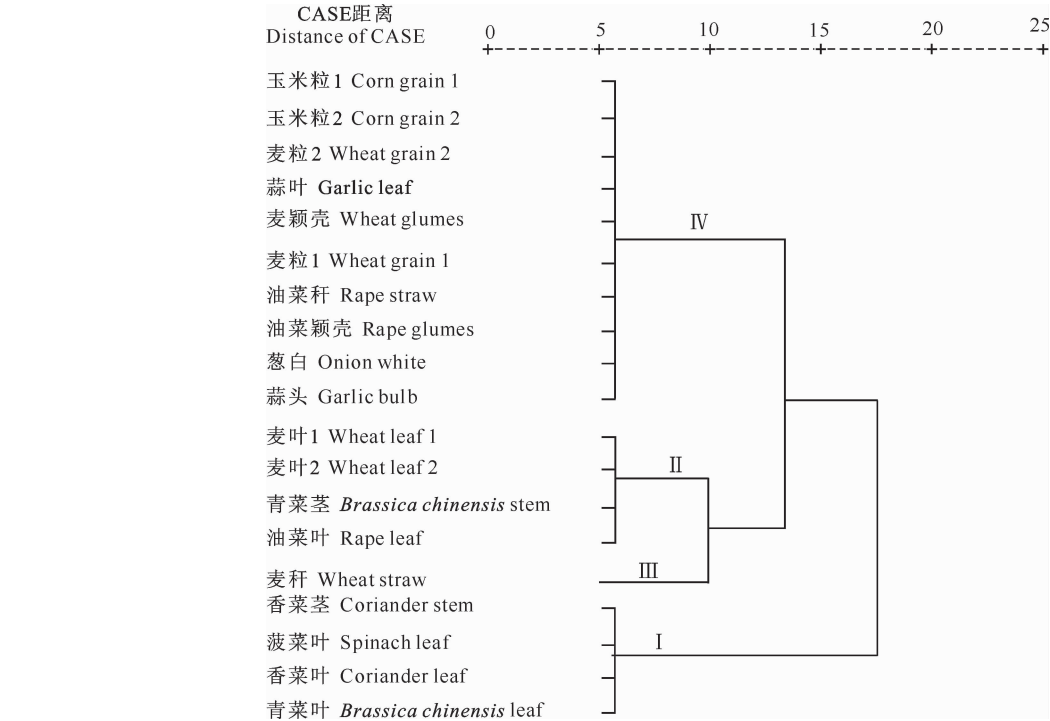


图 1 陕西商洛某冶炼厂周边农作物重金属污染程度的聚类分析

Fig. 1 Clustering analysis of heavy metals in crops around a smelting plant in Shangluo, Shaanxi

3 结论与讨论

由于植物生长特性不同,不同农作物对重金属的吸附能力有较大的差别,同一种农作物的不同器官重金属的富集程度也有差异^[19-20]。因此,可以用农作物的重金属超标率和污染程度来反映各种农作物对土壤重金属的吸收状况,污染程度越大,表明植物越容易从土壤或大气中吸收某种重金属元素。本研究对陕西商洛某冶炼厂周边农作物重金属污染的评价结果表明:

1)从冶炼厂周边各种农作物单项污染指数的评价结果看,19种样品中Cu、Ni、Zn的 $P_i < 1$,属于安全级别,但小麦、香菜、青菜、油菜、菠菜中Cd的 $P_i > 1$,表明其已受到Cd的污染。从重金属综合污染指数的评价结果看,小麦、香菜、青菜、油菜、菠菜的重金属综合污染指数 $P_{\text{综合}} > 1$,也表明这些农作物已吸收土壤或大气中的重金属沉降物并已受到污染。

2)陕西某冶炼厂周边的菠菜、香菜、青菜、油菜都易吸收Zn、Ni元素,油菜、葱、蒜、菠菜易富集Cu元素,青菜、香菜、菠菜、油菜中的Cd元素含量较高且已被污染。同种农作物不同部位重金属含量不同,一般表现为茎>叶>果,或者叶>茎>果。不同农作物同种重金属含量也不同,一般为叶菜类>果菜类。可见,叶菜类蔬菜对重金属的富集能力较强。

3)相关性分析表明,农作物样品中重金属元素Cd与Ni、Cd与Zn、Ni与Zn之间存在极显著正相关关系,说明其污染来源相似,并且周边土壤的污染可能是复合污染。根据小麦各器官中的重金属污染状况以及农作物之间重金属污染的相关性分析结果,同样能推断出这些农作物的污染为多种重金属不同程度、不同组合污染所致。

4)供测农作物样品污染程度的聚类分析结果与重金属综合污染指数的分析结果一致。由此认为,在陕西商洛某冶炼厂周边,适合种植玉米、大蒜、葱,不适合种植香菜、菠菜、青菜、小麦和油菜。

在陕西商洛冶炼厂周边重金属污染区,应根据不同农作物种类和各品种间吸收重金属的差异特性,以及耕地的环境质量、生产技术水平、当地居民消费结构等因素,种植一些耐、抗重金属污染的农作物。也可以通过施用改良剂,降低污染物进入生物链的可能,同时还可以通过提高土壤pH值,降低重金属离子的活性等方法进行农田修复。

[参考文献]

- [1] Cao H B, Chen J J, Zhang J, et al. Heavy metals in rice and garden vegetables and their potential health risks to inhabitants in the vicinity of an industrial zone in Jiangsu, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(11): 1792-1799.
- [2] Hu C H, Jiang J H, Zhou W B. Risk evaluation and sources analysis of heavy metals in vegetable field soil of rural area around Poyang lake [J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(6): 771-776.
- [3] 张家春, 林绍霞, 张清海, 等. 贵州草海湿地周边耕地土壤与农作物重金属污染特征 [J]. 水土保持研究, 2014, 21(3): 273-278.
Zhang J C, Lin S X, Zhang Q H, et al. Characteristics of heavy metal pollution in crops and soil around caohai wetland in Guizhou Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(3): 273-278. (in Chinese)
- [4] 刘敬勇. 矿区土壤重金属污染及生态修复 [J]. 中国矿业, 2006, 15(12): 66-69.
Liu J Y. The research progress on heavy metal soil pollution and ecological rehabilitation mine area China [J]. Mining Magazine, 2006, 15(12): 66-69. (in Chinese)
- [5] 王心义, 杨建, 郭慧霞. 矿区煤矸石堆放引起土壤重金属污染研究 [J]. 煤炭学报, 2006, 31(6): 808-812.
Wang X Y, Yang J, Guo H X. Study on heavy metals in soil contaminated by coalwaste rock pile [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(6): 808-812. (in Chinese)
- [6] 王庆仁, 刘秀梅, 崔岩山. 我国几个工矿与污灌区土壤重金属污染状况及原因探讨 [J]. 环境科学学报, 2002, 22(3): 354-359.
Wang Q R, Liu X M, Cui Y S. Soil contamination and sources of heavy metals at individual sites of industry and mining associate with wastewater irrigation in China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2002, 22(3): 354-359. (in Chinese)
- [7] 席运官, 钦佩, 丁公辉. 有机与常规种植稻米品质及安全性的分析与评价 [J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(3): 454-458.
Xi Y G, Qin P, Ding G H. Analysis and evaluation on quality and safety of organic and conventional rice [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(3): 454-458. (in Chinese)
- [8] 李小飞, 陈志彪, 陈志强, 等. 南方稀土采矿地土壤和蔬菜重金属含量及其健康风险评价 [J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 146-151.
Li X F, Chen Z B, Chen Z Q, et al. Concentrations and health risk assessment of heavy metals in soil and vegetables from REEs mining area, Fujian Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(1): 146-151. (in Chinese)
- [9] Lee C H. Assessment of contamination load on water, soil and sediment affected by the Kongjujeil mine drainage, Republic of Korea [J]. Environmental Geology, 2003, 44(5): 501-515.
- [10] 阮心玲, 张甘霖, 赵玉国, 等. 基于高密度采样的土壤重金属分布特征及迁移速率 [J]. 环境科学, 2006, 27(5): 1020-1025.
Ruan X L, Zhang G L, Zhao Y G, et al. Distribution and migration of heavy metals in soil profiles by high resolution sampling [J]. Environmental Science, 2006, 27(5): 1020-1025. (in

Chinese)

[11] Biester H, Muller G, Schöler H F. Estimating distribution and retention of Hg in three different soil contaminated by emissions from chlor-alkali plants; Part I [J]. The Science of the Total Environment, 2002, 284: 177-189.

[12] 姜 晶. 越橘 3 种小浆果的品质评价及重金属元素分析 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2008.

Jiang J. Evaluation of fruit quality and analysis of heavy metals elements contents in blueberry and other two kinds of small fruit [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2008. (in Chinese)

[13] Pan P, Yang J C, Deng S H, et al. Proceedings and prospects of pesticides and heavy metals contamination in soil-plant system [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(12): 2389-2398.

[14] 王广林, 刘登义. 冶炼厂污灌区土壤-水稻系统重金属积累特征研究 [J]. 土壤, 2005, 37(3): 299-303.

Wang G L, Liu D Y. Characteristics of heavy metals accumulation in soil-rice system in the sewage irrigated area near a smeltery [J]. Soil, 2005, 37(3): 299-303. (in Chinese)

[15] 王 勇. 长春市郊区土壤-水稻体系重金属含量及迁移规律 [J]. 吉林农业大学学报, 2008, 30(5): 716-720.

Wang Y. The content and migration rule of heavy metals in the soil-rice system in Changchun suburb [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2008, 30(5): 716-720. (in Chinese)

[16] 邹建美, 孙 江, 戴 伟, 等. 北京近郊耕作土壤重金属状况评价分析 [J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(1): 132-138.

Zou J M, Sun J, Dai W, et al. Evaluation and analysis of heavy metals in cultivated soils in the suburbs of Beijing [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(1): 132-138. (in Chinese)

[17] 邓超冰, 李丽和, 王双飞, 等. 典型铅锌矿区水田土壤重金属污染特征 [J]. 农业环境科学报, 2009, 28(11): 2297-2301.

Deng C B, Li L H, Wang S F, et al. Pollution characteristics of heavy metal in paddy soil near a typical Pb-Zn mining area [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(11): 2297-2301. (in Chinese)

[18] 郭亚平, 胡曰利. 土壤-植物系统中重金属污染及植物修复技术 [J]. 中南林学院学报, 2005, 25(2): 59-62.

Guo Y P, Hu Y L. Heavy metal pollution and the phytoremediation technology in the soil-plant system [J]. Journal of Central South Forestry University, 2005, 25(2): 59-62. (in Chinese)

[19] 韦 伟, 金琳山. 不同蔬菜的重金属污染评价与特征分析 [J]. 长江蔬菜, 2014(14): 55-57.

Wei W, Jin L S. Characteristics analysis and assessment on heavy metal contamination of different vegetables [J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2014(14): 55-57. (in Chinese)

[20] Hu J L, Wu F Y, Wu S C, et al. Phytoavailability and phytovariety codetermine the bioaccumulation risk of heavy metal from soils, focusing on Cd-contaminated vegetable farms around the Pearl River Delta, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013, 91(1): 18-24.

(上接第 84 页)

[11] 文应乾. 桉树林木资产三种评估方法的比较 [J]. 林业资源管理, 2007(6): 58-60.

Wen Y Q. Comparison of three kinds of eucalyptus forest assets evaluation method [J]. Forest Resources Management, 2007(6): 58-60. (in Chinese)

[12] 黄 东, 刘小勇, 何小军. 成本法与收益现值法对林木评估价值的影响分析 [J]. 林业经济, 2007(12): 51-53, 57.

Huang D, Liu X Y, He X J. Cost method and present value method to evaluate the effect of tree value analysis [J]. Economy of Forestry, 2007(12): 51-53, 57. (in Chinese)

[13] 程雁云, 刘兆刚. 帽儿山林场林木资源资产评估 [J]. 东北林业大学学报, 2010(2): 23-26.

Cheng Y Y, Liu Z G. The asset of forest resources forest Maoshan evaluation [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010(2): 23-26. (in Chinese)

[14] 郑德祥, 陈平留. 林业税费变化对林木资产评估价格的影响 [J]. 西南林学院学报, 2005(1): 56-59.

Zheng D X, Chen P L. Forestry tax change impact on price assessment of forest assets [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2005(1): 56-59. (in Chinese)

[15] 张 颖, 高淑媛, 杜 婷. 森林绿色核算中不同林地林木估价方法的比较 [J]. 自然资源学报, 2006(4): 661-669.

Zhang Y, Gao S Y, Du T. Comparison of different forest valuation methods in green accounting for forest [J]. Journal of Natural Resources, 2006(4): 661-669. (in Chinese)