

## 陕西省西部某县农产品产地土壤重金属污染评价\*

李艳, 张丽, 杨毅哲

(陕西省耕地质量与农业环境保护工作站, 西安 710003)

**摘要:**【目的】为了解陕西省西部某县农产品产地土壤重金属污染状况。【方法】采用单项污染指数法、内梅罗综合污染指数法和 Hakanson 潜在生态风险指数法对该区域表层土壤中 5 种重金属元素进行污染及生态风险评价。【结果/结论】结果表明: Cd、Pb、Hg、As、Cr 等 5 种元素的平均值分别为 0.318 mg/kg、29.6 mg/kg、0.138 mg/kg、14.0 mg/kg、68.4 mg/kg, 污染累积指数表现为 Cd>Pb>Hg>As>Cr 特征, 各元素含量超过背景值的比例分别为 96.75%、99.77%、80.97%、76.57%、51.28%; 研究区域综合潜在生态风险指数为 266.1, 属中等生态危害程度, 其中 52.67% 土壤样点达到中等生态危害, 9.28% 土壤样点达到强及以上生态危害, 应该引起相关政府部门的高度重视。

**关键词:** 农产品产地土壤; 重金属; 污染评价; 陕西

DOI: 10.12105/j.issn.1672-0423.20190311

## 0 引言

土壤是基本农业生产资料, 农产品产地土壤环境质量直接影响农作物生长、农产品质量安全或产地土壤生态环境。随着我国经济社会的快速发展, 大量含有重金属的物质排放进入环境, 导致农产品产地土壤重金属污染问题日益突出。近年来, 随着国内镉大米、镉小麦等粮食重金属污染事件的曝光, 农产品产地土壤污染问题引起社会广泛关注。2014 年《全国土壤污染状况调查公报》显示, 我国耕地土壤点位超标率为 19.4%, 以 Cd、Ni、As 和 Cu 等重金属污染最为突出。赵其国等<sup>[1-2]</sup>估算, 我国农田土壤重金属污染面积约为 2 000 万  $\text{hm}^2$ , 每年受污染粮食多达 1 200 万 t, 经济损失达 200 亿元。由土壤重金属污染造成的水稻、小麦等粮食作物重金属超标问题十分令人担忧<sup>[3]</sup>。文章所选研究区为陕西省某粮食主产区, 对该区域农产品产地表层土壤 Cd、Pb、Hg、As、Cr 等 5 种重金属污染状况进行分析评估, 为该区域土壤生态环境保护及重金属污染综合防治提供科学依据, 同时对提高农产品质量安全具有重要意义。

收稿时间: 2019-05-23

第一作者简介: 李艳 (1977—), 工程师。研究方向: 农产品产地土壤环境质量监测、土壤重金属污染防治及农业生态环境保护。Email: sxliyan77@163.com

\*基金项目: 农业部农业生态环境保护重大专项 (农科教发 [2012] 3 号)

2019年6月

# 1 材料与方法

## 1.1 研究区概况

研究区位于陕西关中盆地西端,渭河自西向东从中穿过拥有山、川、原等地形,农业用水以灌溉为主,耕作方式主要为小麦—玉米轮作,是陕西省的主要粮食生产县,土壤呈碱性, pH>7.5,土壤以褐土、棕壤、黄绵土等为主。

## 1.2 样品采集与处理

土壤样品采集参照《农田土壤环境质量监测技术规范》(NY/T395-2012)<sup>[4]</sup>,结合研究区污染源、土壤分布状况及土地利用类型特征等因素。在工矿企业周边、污灌区、大中城市郊区等3类重点区域和一般农田土壤样点布设密度分别为10 hm<sup>2</sup>和300 hm<sup>2</sup>;采用GPS定位技术及“梅花点”法采集0~20 cm表层土壤,每个样品取混合土样1 kg,共采集431个土壤样品。经自然风干,磨碎过20目及100目尼龙筛后保存备用。

## 1.3 样品测试分析

土壤样品按照国家标准方法进行分析测定,Cd、Pb、Cr采用原子吸收分光光度法,As、Hg采用原子荧光光谱法。在样品分析测试中加入平行双样、标准质控样(GSS系列)等方式进行全程质量控制。

## 1.4 土壤重金属污染评价方法

### 1.4.1 单项污染指数法和内梅罗综合污染指数法

采用单项污染指数法和内梅罗综合污染指数法,按照《农田土壤环境质量监测技术规范》<sup>[4]</sup>对检测结果进行统计分析和评价。单项污染指数法,公式为:

$$P_i = C_i/S_i \tag{1}$$

式(1)中, $P_i$ 为单项重金属*i*的污染指数; $C_i$ 为土壤污染物实测浓度; $S_i$ 为污染物的评价标准值。该文将《农用地土壤污染风险管控标准(试行)》风险筛选值作为评价标准,其中Cd、Hg、Pb、As、Cr分别为0.6 mg/kg、3.4 mg/kg、170 mg/kg、25 mg/kg、250 mg/kg。

内梅罗综合污染指数法,公式为:

$$P_{综} = \sqrt{[(C_i/S_i)_{max}^2 + (C_i/S_i)_{ave}^2]} / 2 \tag{2}$$

式(2)中, $P_{综}$ 为综合污染指数, $(C_i/S_i)_{max}^2$ 为最大单项污染指数; $(C_i/S_i)_{ave}^2$ 为平均单项污染指数。土壤重金属污染分级标准见表1。

表1 土壤重金属污染分级标准

Table 1 Criteria of pollution classification of soil heavy metals

| 等级划定 | 综合污染指数                 | 污染程度 | 污染水平      |
|------|------------------------|------|-----------|
| 1    | $P_{综} \leq 0.7$       | 安全   | 清洁        |
| 2    | $0.7 < P_{综} \leq 1.0$ | 警戒线  | 尚清洁       |
| 3    | $1.0 < P_{综} \leq 2.0$ | 轻污染  | 土壤污染超过背景值 |
| 4    | $2.0 < P_{综} \leq 3.0$ | 中污染  | 土壤受到中度污染  |
| 5    | $P_{综} > 3.0$          | 重污染  | 土壤受污染相当严重 |

1.4.2 潜在生态风险指数法

此方法是瑞典科学家 Hakanson 提出的，是目前采用较多的方法<sup>[5-8]</sup>，该方法将重金属的含量与环境生态效应、毒理学等因素联合考虑，反映重金属的潜在风险程度。其公式为：

$$RI = \sum E_r^i \tag{3}$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \tag{4}$$

$$C_f^i = C_s^i / C_n^i \tag{5}$$

式(3)~(5)中，RI为重金属综合污染潜在生态风险指数； $E_r^i$ 为单项重金属污染潜在生态危害系数； $T_r^i$ 为Hakanson制定的标准化重金属毒性响应系数，此值反映了该种重金属的毒性水平，5种重金属的毒性系数为：Hg=40>Cd=30>As=10>Pb=5>Cr=2<sup>[9-11]</sup>； $C_f^i$ 为单项重金属的污染系数； $C_s^i$ 为土壤中重金属*i*的实测浓度(mg/kg)； $C_n^i$ 为重金属*i*的参比值(mg/kg)。土壤重金属潜在生态风险等级划分标准见表2。

表 2 土壤重金属潜在生态风险等级划分标准  
Table 2 Criteria of the potential ecological risk index grade of soil heavy metals

| 等级划定 | $E_r^i$                | RI                  | 潜在生态风险程度 |
|------|------------------------|---------------------|----------|
| 1    | $E_r^i < 40$           | $RI < 150$          | 轻微危害     |
| 2    | $40 \leq E_r^i < 80$   | $150 \leq RI < 300$ | 中等危害     |
| 3    | $80 \leq E_r^i < 160$  | $300 \leq RI < 600$ | 强危害      |
| 4    | $160 \leq E_r^i < 320$ | $RI \geq 600$       | 很强危害     |
| 5    | $E_r^i \geq 320$       | -                   | 极强危害     |

2 结果与分析

2.1 农产品产地土壤重金属含量特征分析

研究区土壤重金属含量统计分析结果见表3。由表3可知，Cd、Hg、Pb、As、Cr 5种元素在土壤中含量均值分别为0.318 mg/kg、0.138 mg/kg、29.6 mg/kg、14.0 mg/kg、68.4 mg/kg，与关中地区背景值<sup>[12]</sup>相比较，污染累积指数表现为Cd=2.69>Pb=1.82>Hg=1.60>As=1.11>Cr=1.04，Cd、Hg、Pb、As、Cr 5种元素含量超过背景值的比例分别为96.75%、80.97%、99.77%、76.57%、51.28%。结果表明5种重金属元素在表层土壤中均存在不同程度累积，其中Cd元素污染最为严重，其最大值是背景值的158.47倍。各元素变异系数在15.95%~297.84%之间，表现为Cd>Pb>Hg>Cr>As，其中Cd和Pb变异系数分别为297.84%、102.61%，均大于100%，变异程度较大，说明离散程度较大，受外源因素干扰较大；相反As的变异系数最小，说明离散度较小，分布相对比较均匀。

2019年6月

表3 土壤重金属元素含量的统计结果

Table 3 Statistical results of heavy metal elements in soil

| 项目           | Cd     | Hg      | Pb     | As    | Cr    |
|--------------|--------|---------|--------|-------|-------|
| 最小值 (mg/kg)  | 0.081  | 0.015   | 16.2   | 6.58  | 31.3  |
| 最大值 (mg/kg)  | 18.7   | 0.694   | 579    | 30    | 179   |
| 中位值 (mg/kg)  | 0.292  | 0.14    | 27.3   | 14.2  | 66.6  |
| 平均值 (mg/kg)  | 0.318  | 0.138   | 29.6   | 14.0  | 68.4  |
| 标准差 (mg/kg)  | 2.23   | 1.85    | 1.48   | 1.17  | 1.32  |
| 变异系数 (%)     | 297.84 | 61.26   | 102.61 | 15.94 | 29.97 |
| 背景值 (mg/kg)  | 0.118  | 0.086 1 | 16.3   | 12.7  | 65.7  |
| 土壤污染累积指数     | 2.69   | 1.60    | 1.82   | 1.11  | 1.04  |
| 超出背景值百分率 (%) | 96.75  | 80.97   | 99.77  | 76.57 | 51.28 |

## 2.2 单项污染指数法评价

单项指数法评价结果见表4。由表4可知,5种重金属元素污染程度大小依次为Cd>Pb>As>Hg=Cr,受到Cd轻微污染、中轻度污染及重度污染土壤样点的比例分别为3.71%、0.92%、3.71%;受到Pb轻微污染和轻度污染土壤样点的分别为1.16%、0.23%;受到As轻微污染土壤样点为0.23%;Hg、Cr均无污染。结果表明土壤中Cd累积富集最多,污染最为严重。

表4 土壤重金属元素单因子污染指数评价结果

Table 4 Evaluation results of single factor pollution index for soil heavy metal elements

| 单项污染指数           | 污染等级 | 污染程度分布 (%) |       |       |       |       |
|------------------|------|------------|-------|-------|-------|-------|
|                  |      | Cd         | Hg    | Pb    | As    | Cr    |
| $P_i \leq 1$     | 无污染  | 91.65      | 100.0 | 98.61 | 99.77 | 100.0 |
| $1 < P_i \leq 2$ | 轻微污染 | 3.71       | 0     | 1.16  | 0.23  | 0     |
| $2 < P_i \leq 3$ | 轻度污染 | 0.46       | 0     | 0.23  | 0     | 0     |
| $3 < P_i \leq 5$ | 中度污染 | 0.46       | 0     | 0     | 0     | 0     |
| $P_i > 5$        | 重度污染 | 3.71       | 0     | 0     | 0     | 0     |

## 2.3 内梅罗综合指数法评价

内梅罗综合指数法的评价结果见表5。由表5可知,内梅罗综合污染指数处于0.31~31.87之间,均值1.30,属轻度污染水平;56.38%的土壤样点处于安全水平,32.48%的土壤样点处于警戒线水平,6.26%的土壤样点受到中轻度污染,4.18%的点位受到重度污染。表明研究区域的土壤环境状况总体良好,但部分区域已经存在污染问题,应加强受污染农田土壤与农产品的协同监测,以便及时采取措施,确保农产品安全生产。

表5 土壤重金属元素的内梅罗综合污染指数评价结果

Table 5 Evaluation results of Nemerow comprehensive pollution index for soil heavy metal elements

| 综合污染指数     | $P_i \leq 0.7$ | $0.7 < P_i \leq 1$ | $1 < P_i \leq 2$ | $2 < P_i \leq 3$ | $P_i > 3$ |
|------------|----------------|--------------------|------------------|------------------|-----------|
|            | 安全             | 警戒线                | 轻度污染             | 中度污染             | 重度污染      |
| 污染程度分布 (%) | 56.38          | 32.48              | 6.26             | 0.70             | 4.18      |

### 2.4 潜在生态风险评价

潜在生态风险指数评价结果见表 6。由表 6 可知，研究区域  $RI$  均值为 266.1，整体达到中等生态危害，38.05% 样点处于轻微生态危害，52.67% 样点达到中等生态危害，9.28% 样点达到强及以上生态危害。5 种元素潜在生态危害由强到弱依次为  $Cd > Hg > Pb > As > Cr$ ，其中， $Cd$  生态危害系数均值为 165.9，潜在生态危害最大，对研究区域生态风险贡献最大，90.1% 样点达到中等或强以上生态危害； $Hg$  生态危害系数均值为 76.44，潜在生态危害次之，80.97% 样点达到中等或强以上生态危害； $Pb$  生态危害系数均值为 10.32，最大值为 177.6，1.86% 样点达到中等或强以上生态危害；所有样点  $As$ 、 $Cr$  危害系数均小于 40，均属于轻微生态危害，对研究区域生态风险贡献较小。

表 6 土壤重金属元素潜在生态风险指数评价结果

Table 6 Evaluation results of the potential ecological risk index of soil heavy metal elements

| 元素 | $E_i^i$       | $\bar{E}_i^i$ | 污染程度分布 (%) |       |       |      |      |
|----|---------------|---------------|------------|-------|-------|------|------|
|    |               |               | 轻微危害       | 中等危害  | 强危害   | 很强危害 | 极强危害 |
| Cd | 20.59~4 754   | 165.9         | 10.90      | 48.26 | 32.48 | 3.71 | 4.64 |
| Hg | 6.97~322.4    | 76.44         | 19.03      | 43.62 | 31.55 | 5.57 | 0.23 |
| Pb | 4.97~177.6    | 10.32         | 98.14      | 1.63  | 0     | 0.23 | 0    |
| As | 5.18~23.62    | 11.20         | 100        | 0     | 0     | 0    | 0    |
| Cr | 0.95~5.45     | 2.17          | 100        | 0     | 0     | 0    | 0    |
| 综合 | 58.68~4 944.9 | 266.1         | 38.05      | 52.67 | 4.87  | 4.41 | -    |

## 3 结论与讨论

(1) 研究区农产品产地土壤中  $Cd$ 、 $Pb$ 、 $Hg$ 、 $As$  和  $Cr$  5 种重金属元素的平均值分别为 0.318 mg/kg、29.6 mg/kg、0.138 mg/kg、14.0 mg/kg、68.4 mg/kg，污染累积指数表现为  $Cd > Pb > Hg > As > Cr$  特征。表明各元素在表层土壤中均存在不同程度累积，并且局部区域重金属含量很高。当地应加强污染源监管，严格控制  $Cd$ 、 $Hg$ 、 $Pb$  3 种元素的人类活动引入，以避免累积对土壤生态环境的破坏。(2) 研究区表层土壤中  $Cd$  累积富集最多，污染最为严重，受到  $Cd$  污染土壤样点的比例为 8.35%；5 种重金属内梅罗综合污染指数处于 0.31~31.87 之间，均值 1.30，属轻度污染水平。88.86% 的土壤样点处于安全或警戒线水平，6.96% 的土壤样点处于中轻度污染，4.18% 的土壤样点处于重度污染。鉴于该研究区部分土壤重金属已经达到重度污染程度，应加强土壤与农产品的协同监测，以便及时采取防治措施，调整种植结构，确保农产品质量安全。(3) 研究区农产品产地土壤重金属整体表现为中等生态危害，其中 38.05% 样点处于轻微生态危害，52.67% 样点达到中等生态危害，9.28% 样点达到强及以上生态危害。潜在生态危害由强到弱依次为  $Cd > Hg > Pb > As > Cr$ ，其中  $Cd$  潜在生态危害最大，对研究区域生态风险贡献最大。当地应加强产地环境监测，建立动态监测预警体系，及时掌握潜在风险及污染变化趋势，为政府决策提供科学依据。

2019年6月

## 参考文献

- [1] 赵其国, 黄国勤, 钱海燕. 生态农业与食品安全. 土壤学报, 2007, 44(6): 1127~1134.
- [2] 赵其国, 骆永明. 论我国土壤保护宏观战略. 中国科学院院刊, 2015, 30(4): 452~458.
- [3] 路子显. 中国粮食重金属污染现状及防控对策. 粮食科技与经济, 2016, 41(6): 6~11, 53.
- [4] 中华人民共和国农业部. NY/T 395-2012 农田土壤环境质量监测技术规范. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [5] 姜菲菲, 孙丹峰, 李红, 等. 北京市农业土壤重金属污染环境风险等级评价. 农业工程学报, 2011, 27(8): 330~337.
- [6] 陈景辉, 卢新卫, 翟萌. 西安城市路边土壤重金属来源与潜在风险. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1810~1816.
- [7] 江宏, 马友华, 尹国庆, 等. 安徽省某县农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价. 农业资源与环境学报, 2017, 34(4): 352~359.
- [8] 赵杰, 罗志军, 赵越, 等. 环鄱阳湖区农田土壤重金属空间分布及污染评价. 环境科学学报, 2018, 38(6): 2475~2485.
- [9] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112~115.
- [10] 张菊, 陈诗越, 邓焕广, 等. 山东省部分水岸带土壤重金属含量及污染评价. 生态学报, 2012, 32(10): 3144~3153.
- [11] 邢宇鑫, 闫广新, 侯秋丽, 等. 北京门头沟矿区土壤重金属空间分布及污染特征. 农业资源与环境学报, 2016, 33(6): 499~507.
- [12] 李健, 郑春江, 郭希利, 等. 环境背景值数据手册. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.

## Evaluation of heavy metal pollution in soil of agricultural products producing areas in western Shaanxi province

Li Yan, Zhang Li, Yang Yizhe

(Shaanxi Farmland quality and Agricultural Environment Protection Work Station, Xi'an 710003, China)

**Abstract:** [ **Purpose** ] The main purpose of this study is to explore the contamination status of heavy metal in agricultural producing area soils in a western county of Shaanxi province. [ **Method** ] The single factor index method, the Nemerow comprehensive pollution index method and the potential ecological risk index method were used to assess the pollution degree and ecological risk of five heavy metal elements in the topsoil (0~20 cm) in the district. [ **Result/Conclusion** ] The results showed that: The average contents of heavy metal Cd, Pb, Hg, As and Cr in soils were 0.318, 29.6, 0.138, 14.0 and 68.4 mg · kg<sup>-1</sup>, respectively. The percentage of heavy metal elements in soil exceeding the background values of the elements in the study area were as follow respectively: Cd (96.75%), Pb (99.77%), Hg (80.97%), As (76.57%) and Cr (51.28%). The results showed that the pollution rank was Cd>Pb>Hg>As>Cr. The average value of comprehensive potential ecological risk index is 266.1, which ranks at the degree of moderate ecological damage, 52.67% samples reached moderate ecological harm, and 9.28% samples reached strong or above ecological hazards, which should be paid attention by relevant government agencies.

**Key words:** agricultural producing area soil; heavy metal; pollution assessment; Shaanxi province