文章编号:1000-7601(2022)05-0260-08

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2022.05.28

关中平原土壤重金属生态风险评价

——以杨凌示范区为例

左亚杰1,郭 璋1,高文娟2,仲崇民3,马爱生1

(1.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100;2.杨凌示范区生态环境局,陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学化学与药学院,陕西 杨凌 712100)

摘 要:将田间调查与分析相结合,测定了杨凌示范区 164 个农田土壤样品和 88 个主要农作物样品中重金属As、Cd、Hg、Cr、Pb、Ni、Cu 和 Zn 的含量,采用单因子指数法、内梅罗指数法、地质积累指数法和潜在生态危害指数法评价了重金属的积累和风险,用 ArcGIS 技术对重金属的空间分布进行了分析。结果表明:杨凌示范区土壤中上述 8 种重金属的平均含量分别为 15.67、0.18、0.08、51.40、27.34、43.25、28.08、79.32 mg·kg⁻¹,除 Hg 和 Cr 外,其余重金属的平均含量均超过陕西关中塿土背景值,说明其在土壤中有一定累积;但 8 种重金属的平均含量均低于土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准规定的风险筛选值。Cd 和 Cr 的点位超标率分别为 10.98%和 3.05%,其他重金属均未超标。所有土壤样品中 As、Cr、Hg、Pb、Ni、Cu、Zn 的潜在生态危害指数 Ei、均低于 40,为轻度风险。土壤样品中 Cd 的 Ei,值范围为 0.00~49.00,平均值为 22.76±7.60,有 3.66%的土壤样品中 Cd 含量达到轻度生态危害。农作物中上述8 种重金属含量均值分别为 0.016、0.019、0.005、0.108、0.033、0.090、4.880、29.272 mg·kg⁻¹,均低于我国食物中污染物的卫生限量标准。在谷物、蔬菜和水果内,同一种重金属的含量无显著差异,作物的重金属污染指数 MPI 为 0.11。重金属的内梅罗指数为 0.89,达到警戒水平范围;潜在生态危害综合指数 RI=36.5,存在轻度生态危害。这些研究结果表明,杨凌示范区的农田土壤整体仍处于清洁安全水平,属于应予优先保护类土地。

关键词:重金属含量:农田土壤:农作物;污染评价

中图分类号: X131.3 文献标志码: A

Ecological risk assessment of soil heavy metals in Guanzhong Plain: a case study in Yangling Demonstration Area

ZUO Yajie¹, GUO Zhang¹, GAO Wenjuan², ZHONG Chongmin³, MA Aisheng¹

- (1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
 - 2. Ecological Environment Bureau of Yangling Demonstration Zone, Yangling, Shaanxi 712100, China;
 - 3. College of Chemistry and Pharmacy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The content of heavy metals As, Cd, Hg, Cr, Pb, Ni, Cu and Zn in 164 soil samples and 88 main crop samples from Yangling farmland were determined, and the accumulation of heavy metals was analyzed and evaluated by single factor index, Nemero index, geoaccumulation index and potential ecological hazards index. The spatial distribution of heavy metals was analyzed using ArcGIS software. The average contents of the above eight heavy metals in the soil samples were 15.67, 0.18, 0.08, 51.40, 27.34, 43.25, 28.08 mg · kg⁻¹ and 79.32 mg · kg⁻¹, respectively. Except for Hg and Cr, the average contents of all the other heavy metals exceeded the background values for Lou soil in the Guanzhong region of Shaanxi Province. The average contents of all eight heavy metals were below the soil pollution risk screening value of agricultural land. Sample exceeding rates of Cd and Cr were 10.98% and 3.05%, respectively. Other metals did not exceed control value. Potential ecological hazards indexes E_r^i of As, Cr, Hg, Pb, Ni, Cu and Zn in all soil samples were lower than 40, which was a slight risk. E_r^i values

收稿日期:2021-11-09

修回日期:2022-04-16

of Cd in soil samples ranged from 0.00 to 49.00, and the average value was 22.76 ± 7.60 . The soil numbers for Cd in moderate potential ecological risks were 3.66%. The average values of the above-mentioned eight heavy metals in crops were 0.016, 0.019, 0.005, 0.108, 0.033, 0.090, 4.880 mg · kg⁻¹ and 29.272 mg · kg⁻¹, respectively, which were lower than the national food hygiene standard limit. There was no significant difference in the content of the same metal were found in grains, vegetables, and fruits, and the heavy metal pollution index MPI of the crop was 0.11. Nemero index for eight heavy metals was 0.89, meaning a warning range. Comprehensive potential ecological risk index RI = 36.5, meant a slight ecological risk. Results of the research showed that the overall farmland soil in Yangling Demonstration Zone was still at a clean and safe level and belonged to the category of land that should be prioritized for protection.

Keywords: heavy metal content; farmland soil; crops; pollution assessment

土壤是农业生产安全保障的基础。随着我国城镇化进程的推进以及工农业生产的高速发展,多种有害重金属元素通过工业生产、交通运输、生活固体废弃物、废水、化肥施用和农药喷洒等过程污染土壤,再经农作物或土壤被人体吸收,给人们的健康带来潜在风险。我国在2014年进行了土壤污染现状调查,结果显示有19.4%的农田土壤中重金属含量超过环境质量标准,有16.1%的土壤污染超标,全国土壤环境情况需要采取措施加以改善。因此有必要详细调查农业产区土壤中重金属累积状况,既对保障土壤环境和农产品质量安全有着极其重要的意义,又能为国家和地方政府制定环境保护政策提供依据。

杨凌地处关中平原,位于西安市以西、宝鸡市 以东,是我国农业文明发祥地之一,主要种植小麦、 猕猴桃、葡萄及各种蔬菜。随着现代农业和道路交 通的快速发展,重金属对杨凌示范区环境的污染受 到广泛重视。康军等[1]分析了杨凌城市污泥中的 重金属含量,发现 Cd 的单相污染指数为 9.63,达到 严重污染水平,农田过量施用污泥有 Cd 污染风险。 彭丽等[2]研究了杨凌示范区规模化养殖场饲料及 粪便中重金属含量,发现含量呈 Zn>Cu>Pb>Ni>Cd 趋势,样品饲料中 Cd 含量全部超过饲料卫生标准, 部分饲料中 Pb 含量超标。周博等[3] 对杨凌畜禽有 机肥重金属含量分析表明, Zn、Cu、Cd 的含量范围 分别是 102.2~498.3、35.2~123.6 mg·kg⁻¹和 2.7~ 7.87 mg・kg⁻¹,Cd 含量严重超过德国有机肥重金属 限量标准评价,结果与彭丽的结论一致。以上研究 表明,杨凌农田存在多种重金属污染来源。马文哲 等[4]对杨凌示范区蔬菜中重金属含量进行了分析, 发现 Cr 和 Pb 含量范围分别为 0.81~1.47 mg·kg⁻¹ 和 0.22~0.37 mg·kg⁻¹,均超过对应的国家最高限 量值 0.5 mg·kg⁻¹和 0.2 mg·kg⁻¹。而关于杨凌示 范区农田土壤中重金属污染状况的调查仅有部分 研究。杨静等^[5]对杨凌 11 个果园土壤中重金属累积情况进行了调查,发现部分果园 Cd 潜在风险严重,而部分果园亦存在 Hg 和 As 的潜在风险。胡世玮等^[6]采用潜在危害指数等方法分析了杨凌 19 个蔬菜生产合作社土壤中重金属污染状况,发现近半数合作社土壤中 Hg 和 Cd 的污染水平为中等至强污染。因此有必要对杨凌全区农田土壤重金属污染状况进行详细测定和分析,并评价其风险,为当地政府制定农田土壤污染防治政策提供参考依据。

本研究对杨凌示范区不同农田(蔬菜大棚、果园和粮食作物)产地土壤和作物中的重金属含量进行了调查,采用单因子指数法、内梅罗指数法、地质累积指数法和潜在生态危害指数等方法评价杨凌示范区的农业土壤重金属环境质量现状。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

杨凌位于西安市以西 85 km 处。区域坐标为 108°~105°07′E,34°12′~34°20′N,东西长约 16 km, 南北宽约 7 km,总面积 135 km²。主要农田土壤为关中塿土。主要农作物有小麦、玉米、猕猴桃及蔬菜。渭河、漆水河、韦河 3 条河流,以及宝鸡峡二支渠、渭惠渠、高干渠等人工渠系越境而过。区内多年平均年降雨量 635 mm,多年平均蒸发量 820 mm。

1.2 土壤样品的采集与重金属含量测定

2017年6月初在杨凌示范区全区范围内用网格布点法采集了164个有农作物种植的土壤样品。在每个采样点使用棋盘式采样法,仅取表层的土壤(0~20 cm)。登记各个取样点位置坐标,用于绘制取样点地图(图1)以及分布图。土壤样品风干后去除杂物、研磨后过筛,再装入塑料袋内保存。

采用混合酸消解-原子吸收分光光度计法测量样品中 Cd、Cr、Pb、Cu、Zn、Ni 全量。在聚四氟乙烯坩埚中称入处理后的土壤样品 0.5 g,加水润湿后再

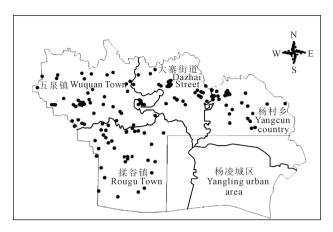


图 1 研究区域及采样点分布图

Fig.1 Sketch map of study area and sampling sites

加入优级纯浓盐酸 10 mL。在通风橱内用电沙浴低温加热,初步分解样品。待消解液蒸发至剩余约 3 mL时,加入9 mL硝酸,再加热 30 min。如果产生棕黄色烟,需要反复补加适量的硝酸,加热直至不再产生棕黄色烟。稍冷后加入5 mL 氢氟酸使样品中的硅化物挥发。取下冷却后加入5 mL 优级纯高氯酸,蒸发至近干。继续加入2 mL 高氯酸并再次蒸发至近干(不能干涸),样品剩余物变为灰白色。冷却后加入25 mL 2%的硝酸溶解残渣,将溶液转移至50 mL 容量瓶,定容备用。

采用王水消解-原子荧光法测定土壤样品中 As 和 Hg 的全量。在 100 mL 消解管中称取 0.5 g 左右处理好的土壤样品,先加入浓盐酸 9 mL,再加入浓硝酸 3 mL。在上方加个小漏斗,静置过夜后在消解炉中 100 摄氏度加热消解 2 h,至样品残渣为灰白色。用 5%的盐酸定容至 100 ml 的消解管中,摇勾静置。取 5 mL 溶液,加入含 1.02%重铬酸钾的 5%盐酸溶液,用原子荧光仪测 Hg。取 1 mL 溶液,加入含 2%硫脲和 1%抗坏血酸的 5%盐酸溶液 9 mL,用原子荧光仪测 As。

1.3 农作物样品的采集与重金属含量测定

2017年8—10月在杨凌全区采集6个葡萄样品,15个猕猴桃样品,9个番茄样品和58个小麦样品。小麦样品用去离子水清洗后,再于65℃烘箱内烘干至恒重,然后用球磨机粉碎,在常温下储存于聚乙烯塑料袋中备用。用去离子水冲洗水果样品,自然风干后用打浆机打碎,贮存于自封袋内在4℃的冰箱内保存。

经 $HNO_3-H_2O_2$ 微波消解样品后用 ICP-MS 测量样品中 Cd、Cr、Pb、Cu、Zn、Ni 的全量。准确称取样品 0.5000 g 于清洁并用酸浸泡过的消解罐中,加入 4 mL 浓硝酸和 2 mL H, O_2 ,密封后在微波消解炉

上于 160℃消解。消解结束后,转移至 25 mL 的容量瓶中,用稀硝酸洗涤容器并定容。

As、Hg 的全量测定。用上述相同的方法消解样品,消解温度为 100℃。使用冷原子荧光光谱法测定 Hg 和 As。测定前加入稳定元素价态的试剂与土壤样品相同。

测定植物样品中重金属元素时使用 GBW10011 (GSB-2)植物标准样品作为对照,所有重金属测定结果的误差均在标准物质含量误差范围内。

1.4 土壤污染评价方法

1.4.1 单因子指数法 是指当前测定的重金属浓度与土壤重金属评价标准的比值。常被用于评价测定区域内重金属的累积水平。单因子指数的计算公式为:

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

式中, P_i 为某个重金属的单因子评价指数; C_i 为待测重金属i的含量 $(mg \cdot kg^{-1})$; S_i 是重金属i的评价标准 $(mg \cdot kg^{-1})$ 。 $P_i \leq 1$ 表示研究区域内的土壤中该金属不存在污染现象; $P_i \geq 1$ 表示该重金属出现了累积污染现象。

1.4.2 内梅罗指数法 内梅罗指数法^[7] 是一种综合评价研究区域内重金属污染状况的评价方法。该方法突出了影响最大的重金属对于环境综合污染结果的影响。计算公式为:

$$P_{\text{GR}} = \sqrt{\frac{(\bar{P}_i)^2 + P_{i(\text{max})}^2}{2}}$$
 (2)

式中, \bar{P}_i 是所有待评价重金属单因子指数的平均值 $(mg \cdot kg^{-1})$; $P_{i(max)}$ 是待评价重金属中单因子指数 最大值; P_{g_i} 表示所有待评价重金属污染状况的内梅罗指数。 $P_{g_i} \leq 0.7$ 则表示此区域内不存在重金属的综合污染; $0.7 < P_{g_i} < 1$ 表示污染水平已达到警戒范围; $1 < P_{g_i} < 2$ 表示达到轻度污染; $2 < P_{g_i} < 3$ 表示达到中度污染水平; $P_{g_i} > 3$ 表示重度污染。

1.4.3 地质累积指数法 地质累积指数 I_{geo} 用于定量评价土壤中人为活动对某个重金属污染情况的影响。计算公式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2(C_i/1.5B_i)$$
 (3)

式中, C_i 表示土壤重金属浓度的测定值($mg \cdot kg^{-1}$); B_i 表示土壤重金属浓度的背景($mg \cdot kg^{-1}$)。 Förstner 等^[8] 将地质累积指数分为 7 个级别。

1.4.4 潜在生态危害指数法 Hakanson 潜在生态 危害指数法包括描述某一元素污染程度的潜在生 态危害指数 *E'*, 和描述多个元素污染状况的潜在生 态危害指数综合值 *RI*。二者的计算公式如下:

$$E_r^i = T_r^i P_i \tag{4}$$

$$RI = \sum_{i=1}^{n} E_{r}^{i} = \sum_{i=1}^{n} T_{r}^{i} P_{i}$$
 (5)

式中,T, 是动植物对重金属i的毒性响应系数; P_i 是重金属i的单因子污染评价指数(公式 1)。 Hakanson 潜在生态危害分级如表 1 所示。

1.4.5 重金属污染指数 Sharma 等^[9]提出的重金属污染指数(*MPI*)是反映农作物中重金属污染情况的一种指标,用来评价区域内农作物重金属的综合污染情况。*MPI*的计算公式如下:

$$MPI = (Cf_1 \times Cf_2 \cdots Cf_n)^{1/n}$$
 (6)

式中, Cf_n 是第 n 种重金属的浓度($mg \cdot kg^{-1}$)。

1.4.6 ArcGIS 分析 ArcGIS 是美国环境系统研究 所(Esri)开发的集数字制图和数据管理为一体的空间信息系统软件,可以对土壤和作物中重金属含量和各种指数分析结果进行二维和三维空间分析。本文运用 ArcGIS 10.1 软件对杨陵区土壤重金属的空间分布进行了二维地统计分析,分析结果用于直观评价研究区域内重金属的分布情况和污染源。

2 结果与分析

2.1 杨凌示范区土壤重金属含量分析

2.1.1 杨凌示范区农田土壤重金属含量统计分析 调查区域内土壤的 pH 值为 7.41~7.81,均值为 7.54±0.13。8 种重金属的含量(mg·kg⁻¹)范围分别为 Hg: 0.00~0.40, As: 3.80~23.61, Cr: 0.00~347.00, Cd: 0.00~0.98, Cu: 14.82~54.06, Pb: 17.61~47.13, Ni: 20.77~117.56(表 2)。其中变异系数较高的元素为 Hg、Cd、Cr,表明土壤中 Hg、Cd、Cr 的含量分布变异较大,而 Cu、Pb、Zn、As 和 Ni 在杨凌本地土壤中分布相对较为均匀。

以薛澄泽等[10] 1986 年报道的陕西关中塿土中重金属含量为背景值,除了 Hg 和 Cr 的均值低于背景值外,As、Cd、Pb、Ni、Cu 和 Zn 的平均值分别为背景值的 1.23、1.52、1.68、1.42、1.19 和 1.21 倍,与雷凌明等[11] 对陕西泾惠渠灌区土壤重金属含量的研究结果相一致,这 8 种重金属都存在一定程度的累积。根据《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB15618-2018)[12],8 种重金属含量的平均值均未超过风险筛选值,但是 Cd 含量有 18 个土壤样品、Cr 含量有 5 个土壤样品超过风险筛选值,点位超标率分别为 10.98%和 3.05%,全部土壤样品中的重金属含量均未超过风险管制值。

2.1.2 杨凌示范区农田土壤重金属的空间分布利用 AreGIS 软件对 8 种重金属的含量进行空间分布分析,结果如图 2。由图 2 可见,土壤中 As 在大寨街道东北部、五泉镇、杨村乡含量较高,最高值出现在杨村乡,最低值在揉谷镇,其含量均未超过土壤污染风险筛选值。Cr 在大寨街道、揉谷镇和五泉镇的分布非常不均匀,变异系数分别为 92.11%、97.07%和 106.05%。Cr 含量最高值(347.48 mg·kg⁻¹)出现在五泉镇,且五泉镇的 46 个土壤样品中有 5 个 Cr 含量超过土壤污染风险筛选值。此 5 点样品位于 S104 省道附近,受道路交通和人为活动影响较大。

表 1 Hakanson 潜在生态危害分级表

Table 1 Hakanson classification of potential ecological risk

			-		
指标 Index	轻度 Light	中等 Moderate	强 Heavy	很强 Very heavy	极强 Extremely heavy
E_r^i	<40	40~80	80~100	100~320	>320
RI	<150	150~300	300~600	600~1200	>1200

表 2 杨凌示范区农田土壤重金属含量/(mg·kg⁻¹)

Table 2 Concentrations of heavy metals in soils from Yangling Demonstration Area

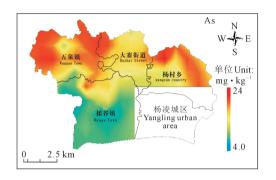
元素 Element	最小值 Min.	最大值 Max.	平均值 Mean	变异系数/% CV	关中塿土均值 Average value of Lou soil in Guanzhong	农用地土壤污染 风险筛选值 Risk screen values for soil pollution of agricultural land	点位超标率/% Point exceeding rate	农用地土壤污染 风险管制值 Risk intervention values for soil pollution of agricultural land
As	3.80	23.61	15.67	32.36	12.70	25.0	0.00	100.0
Cd	0.00	0.98	0.18	148.33	0.12	0.6	10.98	4.0
Hg	0.00	0.40	0.08	99.59	0.01	3.4	0.00	6.0
Cr	0.00	347.48	51.40	110.46	65.70	250.0	3.05	1300.0
Pb	17.61	47.13	27.34	23.91	16.30	170.0	0.00	1000.0
Ni	20.77	117.56	43.25	44.67	30.50	190.0	0.00	
Cu	14.82	54.06	28.08	19.24	23.50	100.0	0.00	
Zn	20.77	150.07	79.32	24.08	65.80	300.0	0.00	

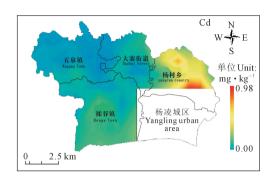
注:点位超标率=(重金属含量超过风险筛选值的样品个数/土壤样品总数)×100%。

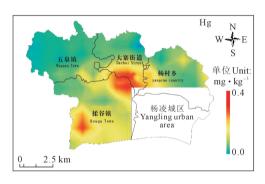
Note: Point exceeding rate = (Sample numbers of exceeding risk screen values/Total sample numbers)×100%.

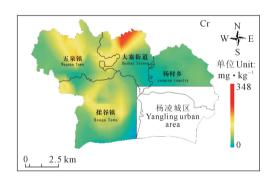
Hg 含量最高值出现在大寨街道,土壤中 Hg 含量分布最不均匀(分布范围分别为 $0 \sim 0.18$ mg· kg^{-1} ,变异系数 = 116.32%)。Cd 主要分布在杨村乡,范围为 $0.05 \sim 0.98$ mg· kg^{-1} ,有 18 个样品超过风险筛选值,其位于受人类活动和道路交通影响很大的东灵路北环线附近。4 个村镇内 Pb 的分布比较均匀。以杨村乡 Pb 含量最高,含量为 $20.77 \sim$

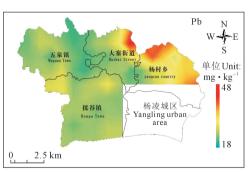
 $47.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。Ni 主要分布在揉谷镇、大寨街道和杨村乡,含量分别为 $27.70 \sim 117.56$ 、 $30.64 \sim 79.97$ 、 $20.77 \sim 72.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。Cu 和 Zn 的分布规律相似,均以五泉镇(Cu:30.23±4.91 mg · kg⁻¹; Zn:77.12±13.89 mg · kg⁻¹)和大寨街道(Cu:30.22±3.18 mg · kg⁻¹; Zn:95.47±22.10 mg · kg⁻¹)的含量最高。Cu、Zn 在揉谷镇和杨村乡相对较低。

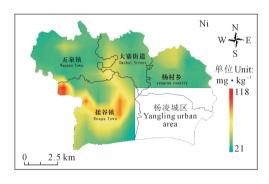


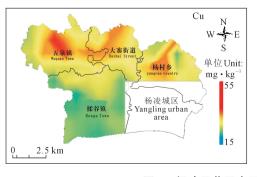












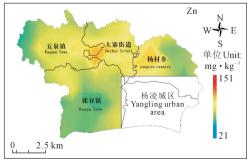


图 2 杨凌示范区农田土壤重金属含量空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of heavy metals in soils from Yangling Demonstration Area

2.2 土壤重金属污染评价

2.2.1 单因子指数评价 以农田土壤环境质量标准中的风险筛选值(见表 2)作为公式 1 中的 S_i 值,根据公式(1)可以计算得到杨凌示范区土壤 8 种重金属的单因子评价指数(表 3)。表 3 中的数据表明,所有土壤样品中 As、Hg、Pb、Ni、Cu、Zn 含量均低于风险筛选值,即土壤处于清洁水平。10 个土壤样品(6.10%)中 Cd 的含量和 5 个土壤样品(3.05%)中Cr 的含量达到轻度污染水平。因此杨凌示范区农田土壤整体处于清洁水平,属于应优先保护类土地。

根据公式(2)计算得到杨凌示范区农田土壤污染的内梅罗指数 P_{s} =0.89,重金属综合污染水平已经达到了轻度污染。

2.2.2 地质累积指数评价 根据公式 3 计算杨凌示范区农田土壤重金属的地质累积指数 I_{geo} 。 I_{geo} 的样品点数分布和数值分布分别表示在表 4 和图 3 中。Cr 的平均地质累积指数(-1.39)最小,范围处于-5.95~1.82 之间,但分别有 6.10%和 4.27%的样品属于 I 级和 II 级污染水平。As、Pb、Cu 和 Zn 的污染水平相似,所有样品的污染水平均在 I 级以下。Ni 的污染程度略高于 As、Pb、Cu、Zn 和 Cr,其地质累积指数范围处于-1.14~1.36 之间,平均值为-0.004,其中有 4.88%的样品属于 II 级污染水平。

Hg 的地质累积指数范围处于 $-6.26 \sim 1.63$ 之间,平均值为-0.91,9.15%的样品属于 II 级污染水平。Cd 的污染最为严重, I_{geo} 的平均值高达 0.947,最高值为 2.47, $I\sim III$ 级污染水平样品数占比分别为 5.49%、7.93%和 12.80%。

8 种重金属中 Hg 和 Cd 的污染相对严重。这与 已有的一些研究结果相一致,杨静等[5]对杨凌11个 果园土壤中重金属地质累积指数测定发现 Cd 有 II 级污染样品 1 个, Hg 分别有 II 和 III 级污染样品 2 个和1个。胡世玮等[6]测定了19个蔬菜地土壤的 地质累积指数,Hg达到II级和III级污染的样点个 数分别为1个和3个。郭志娟和周亚龙等[13-14]对 雄安新区农田土壤重金属污染的研究、周皎等[15]对 重庆(江津)现代农业园区的研究、柴世伟等[16]对广 州市郊区农业土壤重金属的研究,以及韩志轩等[17] 对珠江三角洲冲积平原土壤重金属元素含量的研究 都发现 Hg 和 Cd 的污染相对严重,潜在生态危害较 大。此外,韩伟等[18]对川南山区土壤重金属特征的 研究、杜昊霖等[19]对青藏高原典型流域土壤重金属 分布特征的研究,以及贾丽等[20]对我国设施菜田土 壤重金属含量特征的研究表明土壤中的 Cd 存在显著 累积。因此.我国农田土壤中毒性较大的 Hg 和 Cd 存 在相对较为严重的污染状况具有一定的普遍性。

表 3 农田土壤重金属单项指数 P,及其分布

Table 3 Single pollution factor indexes of heavy metals in soil and their distribution

			O	1		,					
元素	最大值	直 最小值	平均值	标准差 Standard — deviation	样点分布频数(样品总数为 164) Distribution frequency of samples (total number of samples is 164)						
Element M	Max.	Min.	Mean		P _i ≤1.0 (清洁 Clean)	1.0≤P _i ≤2.0 (轻污染 Light pollution)	2.0≤P _i ≤3.0 (中汚染 Pollution)	P_i >3.0 (重污染 Heavy pollution)			
As	0.94	0.15	0.43	0.12	164	0	0	0			
Cd	1.63	0.00	0.80	0.52	154	10	0	0			
Hg	0.12	0.00	0.07	0.05	164	0	0	0			
Cr	1.39	0.00	0.68	0.33	159	5	0	0			
Pb	0.28	0.10	0.18	0.15	164	0	0	0			
Ni	0.62	0.11	0.32	0.21	164	0	0	0			
Cu	0.54	0.15	0.39	0.24	164	0	0	0			
Zn	0.50	0.07	0.31	0.16	164	0	0	0			

表 4 地质累积指数的样点分布频数

Table 4 I_{geo} distribution of samples

			800	•			
元素	0 级	I级	II 级	III 级	IV 级	V 级	VI 级
Element	$I_{\mathrm{geo}} \leq 0$	0≤I _{geo} <1.0	$1.0 \le I_{\text{geo}} < 2.0$	2.0≤I _{geo} <3.0	3.0≤I _{geo} <4.0	4.0≤I _{geo} <5.0	I _{geo} >5.0
As	130	34	0	0	0	0	0
Cd	121	9	13	21	0	0	0
Hg	120	29	15	0	0	0	0
Cr	147	10	7	0	0	0	0
Pb	153	11	0	0	0	0	0
Ni	103	53	8	0	0	0	0
Cu	146	18	0	0	0	0	0
Zn	154	10	0	0	0	0	0

2.2.3 潜在生态风险评价 根据公式(4)和(5)计算重金属潜在生态危害指数,结果列于表 5 中。所有土壤样品中 As、Hg、Cr、Pb、Ni、Cu 和 Zn 的潜在生态危害指数均低于 40,即为轻度风险。Cd 的潜在生态危害指数范围为 0.00~49.00,平均值为 22.76±7.6。其中有 6 个(3.66%)土壤样品中 Cd 的潜在生态危害指数在 40~80 之间,即达到了中度生态风险。综

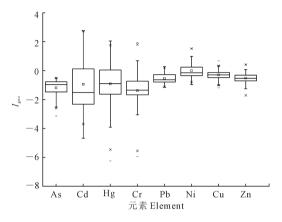


图 3 重金属地质累积指数 I_{eo} 的统计图

Fig.3 Statistical distribution of I_{geo} values of heavy metals

合潜在生态风险指数(RI)的计算值为36.5,根据表1可知,本区土壤中的重金属潜在生态危害风险为轻度。

2.3 作物中重金属的含量

谷物、蔬菜和水果内的重金属含量分析结果如表6所示。根据干质量计算小麦中的重金属含量,根据各自的鲜质量计算番茄、猕猴桃及葡萄中的重金属含量。计算结果表明,同一种重金属在不同类型作物中的含量无明显差别。植物生长必需的营养元素 Cu 和 Zn 在所有作物中的含量最高。Cu 的含量为 2.566~9.838 mg·kg⁻¹, Zn 的含量为 109.921~60.745 mg·kg⁻¹, 根据相关规定 As、Cd、Hg、Cr、Pb、Ni、Cu、Zn 的污染物限值分别为 0.5、0.1、0.02、1.0、0.2、1.0、10、50 mg·kg^{-1[17]},因此所研究的 3 种类型作物中的重金属平均含量均低于中国粮食卫生标准。

通过公式(6) 计算得到的 MPI 值为 0.11, 低于雷凌明等[11] 对陕西的高陵(MPI=0.137)、临潼(MPI=0.132)、阎良(MPI=0.125)、三原(MPI=0.137)和泾阳(MPI=0.152)所测定的小麦重金属污染指数,说明本区作物重金属污染指数较低。

表 5 重金属潜在生态危害指数 E^i

Table 5 Potential ecological risk E_r^i of heavy metals in soil samples

					* W.m.	土壤样品潜在生态风险指数 E_r^i 频数表 Distribution frequency of samples E_r^i						
	E_r^i	\mathbf{r}^{i}	E_r^i	标准差	毒性响应 系数 -							
元素	最大值	E_r^i 最小值	- E, 平均值	你准定 Standard	T_r^i .	$E_r^i \leq 40$	$40 \leqslant E_r^i \leqslant 80$	$80 \le E_r^i \le 100$	$100 \leqslant E_r^i \leqslant 320$	$E_r^i > 320$		
Element	Max. Min. Mean deviation Toxic response	Toxic response coefficient	轻度 Light	中度 Moderate	强 Heavy	很强 Very heavy	极强 Extremely heavy					
As	9.44	1.52	5.34	1.22	10	164	0	0	0	0		
Cd	49.00	0.00	22.76	7.60	30	158	6	0	0	0		
Hg	4.71	0.00	2.17	1.60	40	164	0	0	0	0		
Cr	2.78	0.00	1.56	0.86	2	164	0	0	0	0		
Pb	1.39	0.52	0.89	0.56	5	164	0	0	0	0		
Ni	3.09	0.55	1.90	1.27	5	164	0	0	0	0		
Cu	2.70	0.74	1.57	0.80	5	164	0	0	0	0		
Zn	0.50	0.07	0.31	0.16	1	164	0	0	0	0		

表 6 杨凌示范区农田中谷物、蔬菜、水果中重金属含量/(mg·kg⁻¹)

Table 6 Concentration of heavy metals in grain, vegetable, and fruit in Yangling Demonstration Area

	谷物 Grain				蔬菜 Vegetable				水果 Fruit			
元素 Element 最小值 Min.	最小值		几何平均值 Geometric average	标准差 Standard	Standard 取小但 Min	最大值	几何平均值 Geometric	标准差 Standard	最小值	最大值 Max.	几何平均值 Geometric	标准差 Standard
	Min.			deviation		Max.	average	deviation	Min.		average	deviation
As	0.002	0.043	0.014	0.008	0.002	0.043	0.014	0.012	0.006	0.043	0.019	0.013
Hg	0.001	0.019	0.003	0.003	0.004	0.015	0.008	0.003	0.001	0.008	0.003	0.002
Cr	0.001	0.316	0.088	0.068	0.015	0.344	0.137	0.094	0.015	0.215	0.099	0.054
Cd	0.005	0.032	0.013	0.007	0.007	0.032	0.015	0.007	0.008	0.030	0.013	0.007
Pb	0.012	0.068	0.032	0.012	0.019	0.068	0.038	0.014	0.019	0.056	0.030	0.010
Ni	0.012	0.261	0.089	0.059	0.020	0.261	0.095	0.073	0.027	0.261	0.086	0.063
Cu	1.389	9.838	4.783	1.389	2.566	6.552	4.626	1.332	2.873	9.838	5.247	1.577
Zn	9.351	60.745	25.134	9.351	21.988	51.491	34.587	8.971	18.168	42.876	28.095	7.317

3 结 论

- 1) 杨凌示范区土壤中 As、Cd、Hg、Cr、Pb、Ni、Cu、Zn 的平均含量分别为 15.67、0.18、0.08、51.40、27.34、43.25、28.08、79.32 mg·kg⁻¹。除 Hg 和 Cr 之外的其他 6 种重金属均存在一定程度的累积,且以Cd、Pb 和 Ni 的累积较高。8 种金属含量均值均低于《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB15618-2018)^[12]规定的筛选值标准,但部分土壤样品 Cd、Cr 的含量超过风险筛选值。对农田土壤中重金属来源调查发现,其中 Pb、Cu 和 Ni 是主要通过道路交通的途径进入到土壤中进而累积的,而 Cd、Hg 的主要污染源是有机肥和工业排废。化肥和农药的过量投入也会导致 Cd、Hg、As、Cr 和 Ni 的累积。
- 2)单因子指数评价、地质累积指数评价和潜在生态危害指数评价表明,土壤总体处于清洁水平,仅有10个土壤样品(6.10%)中Cd的含量和5个土壤样品(3.05%)中Cr的含量达到轻度污染水平。内梅罗指数评价(P_{ss} =0.89)表明重金属综合污染水平已经达到轻度污染。潜在生态风险综合值RI=36.5,表明杨凌农田土壤的潜在生态风险为轻度。
- 3) 杨凌示范区农田中的谷物、蔬菜和水果中的 8 种金属含量均低于国家粮食卫生标准限值。每种 重金属在 3 种类型作物中的含量无明显差别。说明 杨凌示范区的农田土壤整体仍处于清洁安全水平,属于应予优先保护类土地。

参考文献:

- [1] 康军,孙西宁.杨凌城市污泥重金属环境风险评价及合理施用量研究[J].安徽农业科学,2014,42(28):9903-9905.
 - KANG J, SUN X N. Environmental risk assessment of heavy metals and rational application rate of sewage sludge in Yangling[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(28); 9903-9905.
- [2] 彭丽,孙勃岩,王权,等陕西杨凌规模化养殖场饲料及粪便中养分和重金属含量分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017,45(5):123-129,138.
 PENG L, SUN B Y, WANG Q, et al. Contents of nutrients and heavy
 - metals in feeds and manure at intensive livestock farms in Yangling, Shaanxi[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2017, 45(5): 123-129, 138.
- [3] 周博,朱振国,周建斌,等.杨凌地区不同畜禽有机肥养分及重金属含量研究[J].土壤通报,2013,44(3):714-718.

 ZHOU B, ZHU Z G, ZHOU J B, et al. Contents of nutrients and heavy metals in the different livestock and poultry manure[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(3):714-718.

- [4] 马文哲,王文光,吴春霞,等.杨凌示范区蔬菜中重金属污染分析与评价[J].北方园艺,2012(17):46-48.
 - MA W Z, WANG W G, WU C X, et al. Analysis and evaluation on heavy metal pollution of vegetables in Yangling demonstration zone [J]. Northern Horticulture, 2012(17): 46-48.
- [5] 杨静,胡世玮,王欢,等.杨凌果园土壤重金属累积现状与风险评价 [J].陕西农业科学,2015,61(10):71-74.
 - YANG J, HU S W, WANG H, et al. Accumulation status and risk assessment of heavy metals in soil of Yangling orchard [J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2015, 61(10): 71-74.
- [6] 胡世玮,杨静,谢伟强,等.杨凌蔬菜产地土壤重金属污染风险评价 [J].西北农业学报,2015,24(8):175-180. HUSW, YANGJ, XIEWQ, et al. Assessment of heavy metal pollution in Yangling vegetable field[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2015, 24(8):175-180.
- [7] NEMEROW N L. Scientific stream pollution analysis (McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering) [M]. New York; McGraw-Hill Book Company, Inc., 1974;1-358.
- [8] FÖRSTNER U, WITTMANN G T W. Metal Pollution in the Aquatic Environment[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1981; 110-196.
- [9] SHARMA R K, AGRAWAL M, MARSHALL F M. Heavy metal (Cu, Zn, Cd and Pb) contamination of vegetables in urban India; a case study in Varanasi[J]. Environmental Pollution, 2008, 154(2): 254-263.
- [10] 薛澄泽,肖玲,吴乾丰,等.陕西省主要农业土壤中十种元素背景值研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),1986,14(3):30-53.
 - XUE C Z, XIAO L, WU Q F, et al. Studies of background values of ten chemical elements in major agricultural soils in Snaanxi Province [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 1986, 14(3):30-53.
- [11] 雷凌明,喻大松,陈玉鹏,等.陕西泾惠渠灌区土壤重金属空间分布 特征及来源[J].农业工程学报,2014,30(6):88-96. LEI L M, YU D S, CHEN Y P, et al. Spatial distribution and sources of heavy metals in soils of Jinghui Irrigated Area of Shaanxi, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(6): 88-96.
- [12] 生态环境部,国家市场监督管理总局.土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行):GB15618-2018[S].北京:中国标准出版社,2018.

 Ministry of Ecological Environment, State Administration for Market Regulation. Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land; GB15618-2018[S]. Beijing; China
- [13] 郭志娟,周亚龙,王乔林,等.雄安新区土壤重金属污染特征及健康 风险[J].中国环境科学,2021,41(1):431-441. GUO Z J, ZHOU Y L, WANG Q L, et al. Characteristics of soil

Standards Press, 2018.

heavy metal pollution and health risk in Xiong'an New District [J]. China Environmental Science, 2021, 41(1): 431-441.

(下转第276页)