

doi: 10.11720/wtyht.2023.1159

包凤琴,成杭新,永胜,等.包头南郊农田土壤环境质量特征及农作物健康风险评价[J].物探与化探,2023,47(3):816-825. http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1159

Bao F Q, Cheng H X, Yong S, et al. Environmental quality characteristics of soil and health risk assessment of crops of farmlands in the southern suburb of Baotou [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(3): 816-825. http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1159

包头南郊农田土壤环境质量特征 及农作物健康风险评价

包凤琴^{1,2},成杭新²,永胜³,周立军⁴,杨宇亮¹

(1. 内蒙古自治区地质调查研究院 内蒙古自治区岩浆活动成矿与找矿重点实验室,内蒙古 呼和浩特 010020;2. 中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所,河北 廊坊 065000;3. 内蒙古警察职业学院,内蒙古 呼和浩特 010051;4. 内蒙古地质矿产(集团)有限责任公司,内蒙古 呼和浩特 010024)

摘要:为调查与评价包头市南部旧工业区周边农田土壤和农作物的镉、铅和锌元素特征,分析测试了土壤及农作物根系土和籽实重金属含量,参照相应标准进行了污染评价,运用污染指数法、生物富集系数和人体健康风险指数等方法开展了重金属元素风险评估及来源解析。结果表明:区内土壤环境质量以清洁土壤为主,污染土壤主要分布于旧排污渠两侧;根系土超标点位也主要分布在旧排污渠周边;重金属元素形态中碳酸盐结合态、铁锰结合态和残渣态占比较高,可交换态(水溶态、离子交换态)占比较低,大部分农作物籽实样品呈正常和低富集特征;与其他农作物比较,向日葵籽实对镉、铅和锌具有超强吸附性,对儿童和成人均存在明显的非致癌和致癌健康风险。

关键词:农田土壤;农作物;环境质量;健康风险评价;包头

中图分类号: X142;X825

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2023)03-0816-10

0 引言

随着我国经济的快速发展以及工业化和城市化进程的不断加快,工矿企业所排放的废水、废气和废渣等各类含重金属的污染物对土壤环境造成了不同程度的污染,导致了严重的生态环境问题^[1-3]。土壤质量与农业生产、食品安全、人类健康以及生态安全息息相关^[4-5]。土壤重金属具有生物积累性、持久性、遗传毒性及难降解性等特点^[6-8]。植物从土壤中吸收必需元素和有益元素,同时也吸收富集的有毒、有害重金属元素。重金属元素被植物吸收进入农作物籽实内,进而流入食物链,可能直接危及食品安全和人类健康,对生态系统的可持续发展造成极其不利的影响,因而受到了国内外学者的广泛关注与研究^[9-11]。

包头市是内蒙古自治区最大的重工业城市,其南郊老工业基地历史上有钢铁厂、稀土厂和铝厂等工矿企业。工业生产活动所产生的废弃污染物可能随大气干湿沉降和污水灌溉等方式影响着周边农田,造成土壤和农作物的重金属潜在生态风险^[12-13]。近年来,大部分工矿已经搬迁或关闭停产,但遗留的重金属污染问题在短时间内难以解决,仍存在一定的潜在风险^[14-15]。前人的研究证实,包头市南郊老工业区周边农田存在一定程度的重金属污染^[16]。

为此,本文选择包头南郊老工业基地排污渠周边农田土壤、农作物根系土及籽实为研究对象,通过系统分析重金属污染物的空间分布特征及其成因解析,客观评价土壤—作物系统的重金属潜在生态风险及健康风险,以期为研究区农田土壤的风险管控

收稿日期: 2022-04-01;修回日期: 2022-10-20

基金项目: 内蒙古自治区国土资源厅土地专项资金项目;内蒙古自治区自然科学基金项目(2022MS04020)

第一作者: 包凤琴(1979-),女,博士后,高级工程师,研究方向为环境地球化学。Email: 541206780@qq.com

通讯作者: 成杭新(1964-),男,博士,研究员,研究方向为地球化学。Email: hangxin@vip.sina.com

和保证农产品安全生产提供科学依据^[17~18]。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区隶属包头市九原区,属于山南平原区,地势平坦,植被发育;区南2 km有黄河,东500 m有昆都仑河;地处中温带,为大陆性气候,日照时间长,温差变化大,四季分明;具有悠久的农业生产历史,粮食作物以玉米为主,其次有小麦、高粱、谷子等,经济作物主要有甜瓜、向日葵和蔬菜等。

1.2 样品采集与分析测试

按每平方千米为一个采样大格进行编号,样品在小格内均匀布置,采样密度为8个点/km²。用不锈钢铲挖掘20 cm深方形坑,采集0~20 cm表层土壤。用木铲将与不锈钢铲接触部分的土壤去掉,选择未接触不锈钢铲的部分装入布样袋中,样品质量1 kg。回到驻地后,过-20目粒级尼龙筛混匀后保存。

于2019年10月上旬农作物收获盛期,按不同农作物种类,系统采集根系土及农作物样品。在采样点地块内采用梅花点法进行了多点取样,等量混匀组成1个混合样品,均匀连续采集0~20 cm土壤样品,全粒级,采样质量1.0~1.5 kg。玉米、向日葵籽实样由5个植株混合成样,样重500 g(干重样);蔬菜样在采样单元内选取5个植株,小型植株的叶菜类去根整株采集,大型植株的叶菜类可用辐射形切割法采样,即从每株表层叶至心叶切成八小瓣为该植株分样,蔬菜样质量为1.5 kg(鲜重样)。新鲜样品采集后,立即装入聚乙烯塑料袋,扎紧袋口,防止水分蒸发。

本次土壤、农作物籽实和根系土样品均由地质科学院地球物理地球化学研究所实验室分析测试,镉和铅全量及形态分析采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测试,锌全量和形态分析用粉末压片-X射线荧光光谱法(XRF)测试。本次分析测试方法的检出限、报出率、精密度和准确度均符合地质矿产行业标准《土壤质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)分析质量要求(表1),分析质量可

表1 土壤样品分析测试报出率、准确度和精密度统计

Table 1 Statistical of reporting rate, accuracy and precision of soil sample analysis and testing

元素	检出限/ 10 ⁻⁶	报出 率/%	ΔlgC 平 均值	ΔlgC 合 格率/%	λ 合格 率/%	RSD/%
Cd	0.02	100	0.021	100	100	3.07
Pb	2	100	0.04	100	100	5.37
Zn	2	100	0.01	100	100	1.38

靠,所报出的分析数据可供地质调查工作使用。

1.3 评价标准与评价方法

1.3.1 评价标准

研究区均为旱地,土壤pH值在8.86~10.28,土壤环境质量类别划分参照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中规定的pH>7.5时的风险筛选值和风险管控值^[19]。

农作物籽实重金属超标标准参考《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)^[20]标准。因目前无锌元素的限量标准,所以此次锌不参与评价。

1.3.2 土壤环境质量地球化学等级划分

根据土壤污染调查结果,按照《土壤质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016),以污染指数法对土壤环境地球化学等级进行评价。污染指数法可以全面反映各污染物对土壤的不同作用,并突出高浓度污染物对环境质量的影响。土壤中污染物指标*i*的单项污染指数*P_i*计算公式为:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}, \quad (1)$$

式中:*C_i*为土壤中污染物指标*i*的实测值;*S_i*为土壤中污染物指标*i*在GB 15618—2018中给出的风险筛选值。按照土壤单项污染指数环境地球化学等级划分界限值(见表2)。

表2 土壤环境地球化学等级划分

Table 2 Classification of soil environmental geochemistry

等级	一等	二等	三等	四等	五等
土壤环境	<i>P_i</i> ≤1	1< <i>P_i</i> ≤2	2< <i>P_i</i> ≤3	3< <i>P_i</i> ≤5	<i>P_i</i> ≥5
	清洁	轻微污染	轻度污染	中度污染	重度污染

1.3.3 生物富集系数

为了表征农作物对土壤重金属元素的吸附累积效应,本文采用农作物生物富集系数(*BCF*)进行讨论,计算公式如下:

$$BCF = C_p / C_s, \quad (2)$$

式中:*C_p*为籽实实测重金属含量;*C_s*为根系土实测重金属含量。依据生物富集系数的大小,划分了<0.5%、0.5%~1.5%、1.5%~4.5%和>4.5%的低、正常、中和强富集等级。富集系数越大,农作物重金属富集能力越强,对人体健康带来的潜在危害也就越大^[21~22]。

1.3.4 人体健康风险指数

本次研究的镉、铅和锌对人体均具有慢性非致癌风险,镉同时还具有致癌风险^[23~26]。非致癌风险暴露剂量(*ADD*)计算公式如下:

$$ADD = \frac{C_i \cdot IR \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AT}, \quad (3)$$

式中: C_i 代表籽实中某种重金属元素的实测值; IR 代表农作物日摄入量; EF 代表暴露频率; ED 代表暴露年限; BW 代表受体体重; AT 代表重金属平均作用时间。详见表 3。

表 3 健康风险评价暴露参数

Table 3 Health risk assessment exposure parameters

暴露评价参数	成人参考值	儿童参考值
IR	玉米 0.15 kg/d	0.10 g/d
	向日葵 0.10 g/d	0.03 g/d
	蔬菜 0.35 g/d	0.23 g/d
ED	24 a	6 a
BW	67 kg	15 kg
EF	350 d/a	
AT	非致癌物 $ED \times 365$ d	
	致癌物 70×365 d	

风险表征是健康风险评价的最后步骤,本文中对于非致癌风险使用危害商(HQ)来计算,即:

$$HQ_i = \sum_{j=1}^3 \frac{ADD_{ij}}{RfD_{ij}}, \quad (4)$$

对于多污染物多暴露途径情况,非致癌总风险(HI)则表示为:

$$HI = \sum_{i=1}^3 HQ_i, \quad (5)$$

式中: RfD 表示污染物参考剂量,即单位时间内单位体重摄入的不会引起人体不良反应的污染物最大剂量,Cd、Pb、Zn 的 RfD 值分别为 0.001、0.0035、0.3 mg/(kg·d)。如果 $HQ < 1$ 或 $HI < 1$, 则认为风险比较小或可以忽略;当 $HQ \geq 1$ 或 $HI \geq 1$ 时, 表示存在非致癌健康风险。

致癌风险(CR)模型为:

$$CR_i = \sum_{j=1}^3 ADD_{ij} \times SF_{ij}, \quad (6)$$

式中:斜率系数(SF)代表人体暴露在一定剂量某污染物下而产生致癌效应的最大概率,Cd 斜率系数(SF)为 6.1 kg·d/mg。一般情况下致癌风险在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 时为可接受范围内^[27-29]。

2 结果与分析

本次研究共采集土壤单点样品 661 件,农作物根系土 4 种和籽实样品 90 件,其中玉米根系土和籽实样品各 9 件,向日葵根系土和籽实样品各 9 件,葱根系土和籽实样品各 14 件,圆白菜根系土和籽实样品各 13 件,具体点位分布情况详见图 1。

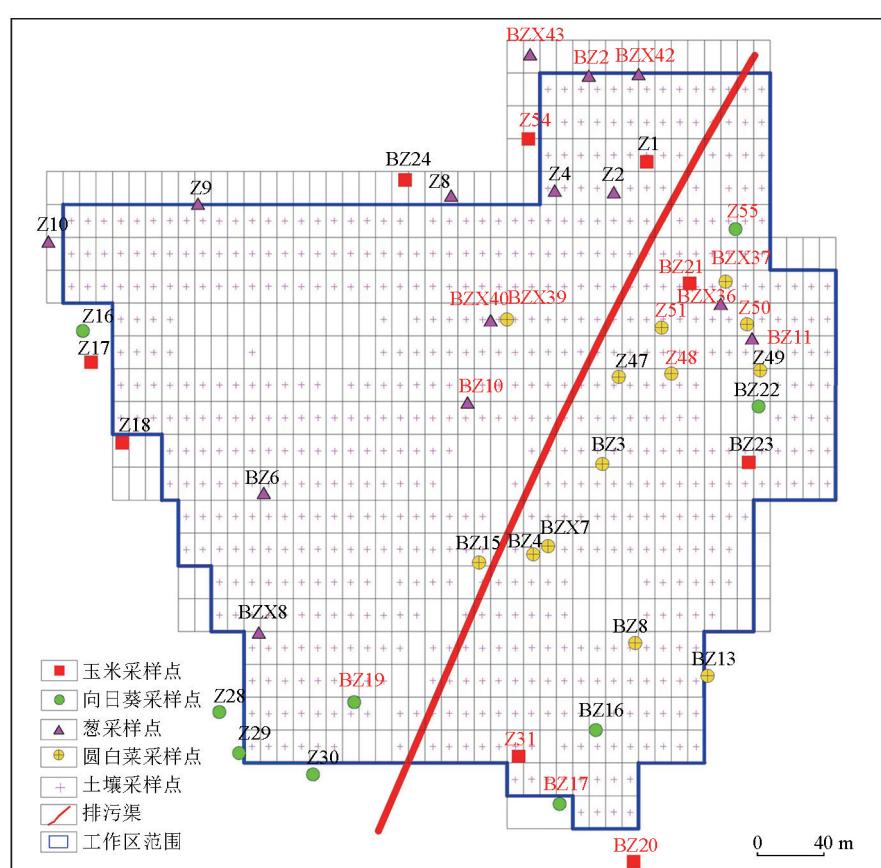


图 1 包头南郊采样点位分布

Fig. 1 Distribution of sampling points in the southern suburbs of Baotou

2.1 土壤环境质量地球化学等级划分

通过土壤镉、铅和锌分析统计结果可知(表4),研究区土壤镉含量范围为 $(0.1\sim 2.1)\times 10^{-6}$,平均值为 0.4×10^{-6} ,超过全国土壤背景值 0.097×10^{-6} 的3

倍以上;土壤铅含量范围为 $(15.6\sim 889.0)\times 10^{-6}$,平均值为 146.0×10^{-6} ,超过全国土壤背景值 26.0×10^{-6} 的5倍以上;土壤锌含量范围为 $(46.7\sim 1516.0)\times 10^{-6}$,平均值为 312.0×10^{-6} ,超过全国土壤背景值

表4 包头南郊土壤镉、铅和锌特征值及环境质量等级划分

Table 4 Characteristic values of cadmium, lead and zinc in soil and classification of environmental quality in the southern suburbs of Baotou

元素	特征值			环境地球化学质量等级划分							
	最大值/ 10^{-6}	最小值/ 10^{-6}	平均值/ 10^{-6}	清洁		轻微污染		轻度污染		中度污染	
				样品数	比例/%	样品数	比例/%	样品数	比例/%	样品数	比例/%
Cd	2.1	0.1	0.4	570	86.2	73	11.0	17	2.57	1	0.15
Pb	889.0	15.6	146.0	470	71.1	146	22.1	35	5.30	9	1.36
Zn	1516.0	46.7	312.0	407	61.6	173	26.2	65	9.83	15	2.27

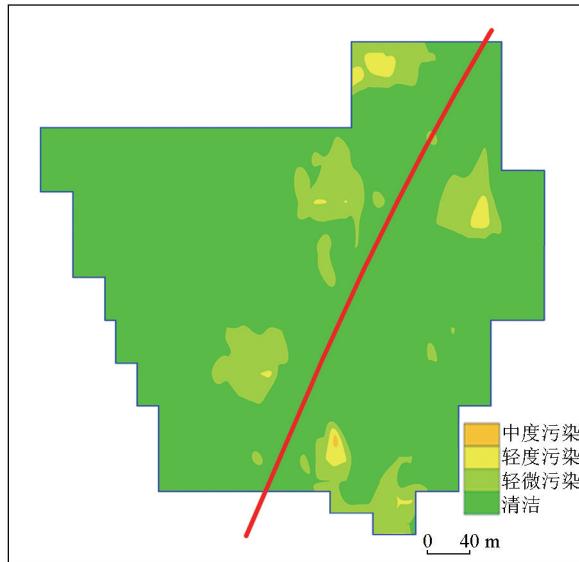


图2 包头南郊土壤镉环境质量地球化学分级

Fig. 2 Geochemical grading diagram of cadmium environmental quality in the southern suburbs of Baotou

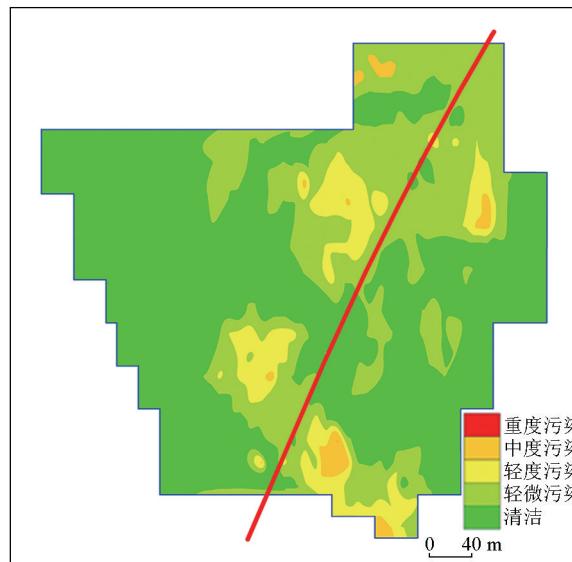


图4 包头南郊土壤锌环境质量地球化学分级

Fig. 4 Geochemical grading diagram of zinc environmental quality in the southern suburbs of Baotou

74.2×10^{-6} 的4倍以上。从以上分析看出,研究区内镉、铅和锌存在明显的富集现象。

根据1.3.2小节的评价方法对研究区土壤中镉、铅和锌重金属元素进行土壤环境质量地球化学等级划分。从表4可知,铅和锌达到重度污染的采样点位均占研究区总样品数的0.15%,区内未发现镉重度污染土壤;镉、铅和锌达中度污染的点位分别占0.15%、1.36%、2.27%,轻度污染点位分别占2.57%、5.3%、9.83%,轻微污染点位分别占11.0%、22.1%、26.2%。从镉、铅和锌环境质量地球化学分级(图2~图4)看出,研究区以清洁土壤为主,污染土壤主要分布于旧排污渠两侧。

2.2 土壤重金属元素形态分布特征

对研究区的镉、铅、锌重金属元素形态(水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态、腐殖酸结合态、铁锰氧化物结合态、强有机结合态、残渣态)特征分别进

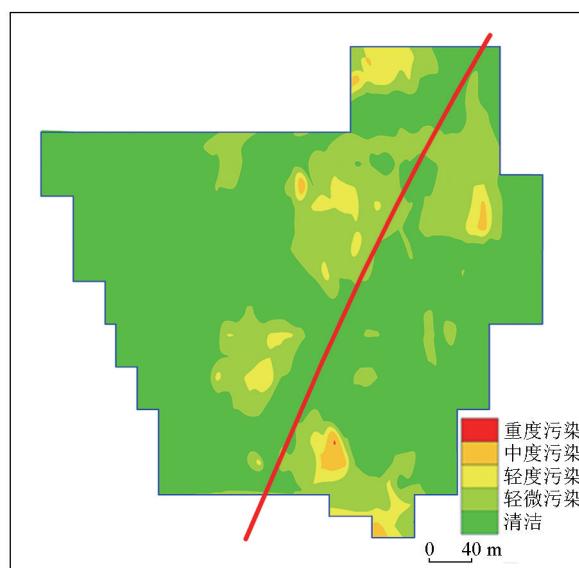


图3 包头南郊土壤铅环境质量地球化学分级

Fig. 3 Geochemical grading diagram of lead environmental quality in the southern suburbs of Baotou

行了统计,见图 5,可得出如下结论:

在镉全量中,碳酸盐结合态占比最多,达到 44.1%,铁锰氧化物结合态和离子交换态占比分别为 15.5% 和 10.6%,其他几种形态的镉占比均小于 10%。

在铅全量中,铁锰氧化物结合态占比 34.9%,碳酸盐结合态、腐殖酸结合态和残渣态占比分别为 28.3%、14.6% 和 10.4%,其他几种形态的铅占比均小于 10%。

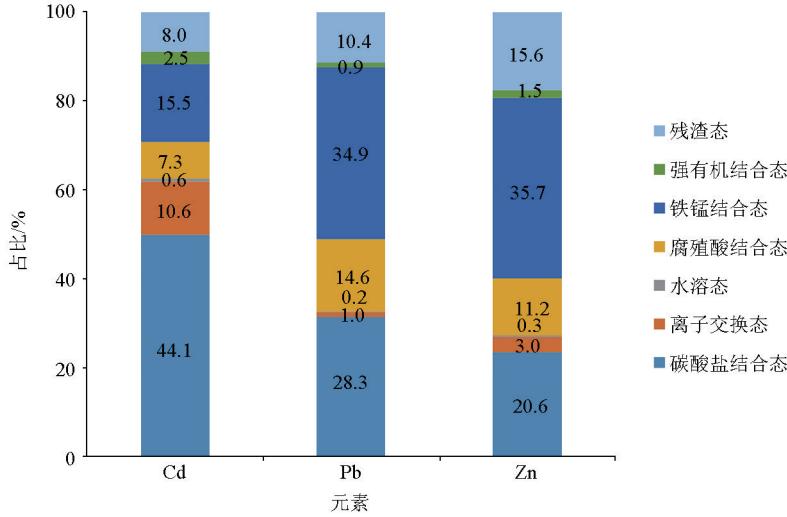


图 5 重金属元素形态分布

Fig. 5 Speciation distribution of heavy metals

2.3 根系土重金属元素含量特征与点位分布规律

根系土重金属含量特征值及对比农用地土壤污染风险筛选值和管控值结果详见表 5 和表 6。

从表 5 和表 6 可知,玉米根系土中镉、铅和锌含量变化范围分别在 $(0.141 \sim 1.167) \times 10^{-6}$ 、 $(41 \sim 380) \times 10^{-6}$ 和 $(92 \sim 688) \times 10^{-6}$ 之间,平均值分别为 0.454×10^{-6} 、 176×10^{-6} 和 321×10^{-6} ,其中 Z54、Z31、BZ20 和 BZ21 样品镉、铅、锌含量均超过农用地土壤污染风险筛选值,未超过风险管控值。

向日葵根系土中镉、铅和锌含量变化范围分别在 $(0.089 \sim 0.656) \times 10^{-6}$ 、 $(23 \sim 325) \times 10^{-6}$ 、 $(55 \sim 585) \times 10^{-6}$,平均值分别为 0.330×10^{-6} 、 141×10^{-6} 、 260×10^{-6} ,其中 Z55 和 BZ19 样品铅和锌含量超过农

用地土壤污染风险筛选值,BZ19 样品镉、铅、锌含量均超过农用地土壤污染风险筛选值,所有样品含量均未超过风险管控值。

通过图 5 可以看出,研究区 3 种重金属元素碳酸盐结合态、铁锰结合态和残渣态占比较高,而可交换态(水溶态、离子交换态)占比较低,研究区重金属元素活性相对低。

用地土壤污染风险筛选值,BZ19 样品镉、铅、锌含量均超过农用地土壤污染风险筛选值,所有样品含量均未超过风险管控值。

葱根系土中镉、铅和锌含量变化范围分别在 $(0.113 \sim 1.566) \times 10^{-6}$ 、 $(29 \sim 592) \times 10^{-6}$ 和 $(69 \sim 960) \times 10^{-6}$,平均值分别为 0.583×10^{-6} 、 228×10^{-6} 和 397×10^{-6} ,其中 Z44、Z45 和 BZ10 样品铅和锌含量均超过风险筛选值,BZ02、BZ11、BZX36、BZX40、BZX42 和 BZX43 样品镉、铅、锌含量均超过风险筛选值,所有样品含量均未超过风险管控值。

圆白菜根系土中镉、铅和锌含量变化范围分别在 $(0.204 \sim 1.042) \times 10^{-6}$ 、 $(72 \sim 506) \times 10^{-6}$ 和 $(143 \sim 866) \times 10^{-6}$,平均值分别为 0.503×10^{-6} 、 208×10^{-6} 和

表 5 包头南郊农作物根系土重金属元素含量特征值

Table 5 Characteristic value of heavy metal content in crop root soil in the southern suburbs of Baotou

农作物	特征值	镉	铅	锌	农作物	特征值	镉	铅	锌
玉米	最大值/ 10^{-6}	1.167	380	688	葱	最大值/ 10^{-6}	1.566	592	960
	最小值/ 10^{-6}	0.141	41	92		最小值/ 10^{-6}	0.113	29	69
	均值/ 10^{-6}	0.454	176	321		均值/ 10^{-6}	0.583	228	397
向日葵	最大值/ 10^{-6}	0.656	325	585	圆白菜	最大值/ 10^{-6}	1.042	506	866
	最小值/ 10^{-6}	0.089	23	55		最小值/ 10^{-6}	0.204	72	143
	均值/ 10^{-6}	0.330	141	260		均值/ 10^{-6}	0.503	208	381

表 6 包头南郊农作物根系土超标样品及含量统计

Table 6 Samples and content statistics of crop root soil exceeding the standard in the southern suburbs of Baotou

农作物	超标样品	超标元素(含量/ 10^{-6})	农作物	超标样品	超标元素(含量/ 10^{-6})
玉米	Z54	镉(1.167)、铅(380)、锌(688)	葱	Z45	铅(324)、锌(620)
	Z31	镉(0.606)、铅(348)、锌(624)		Z44	铅(253)、锌(454)
	BZ20	镉(0.821)、铅(364)、锌(617)		BZ02	镉(1.566)、铅(592)、锌(947)
	BZ21	镉(0.726)、铅(274)、锌(487)		BZ10	铅(301)、锌(548)
圆白菜	Z51	铅(217)、锌(422)	BZ11	镉(1.259)、铅(586)、锌(960)	
	Z50	镉(1.042)、铅(506)、锌(866)		BZX36	镉(0.715)、铅(288)、锌(505)
	Z48	镉(0.822)、铅(327)、锌(610)		BZX40	镉(0.977)、铅(421)、锌(711)
	BZX37	镉(0.718)、铅(309)、锌(564)		BZX42	镉(0.853)、铅(334)、锌(541)
向日葵	BZX39	镉(1.028)、铅(451)、锌(769)	BZX43	镉(0.902)、铅(328)、锌(547)	
	Z55	铅(294)、锌(542)			
	BZ17	镉(0.656)、铅(325)、锌(585)			
	BZ19	铅(174)、锌(305)			

381×10^{-6} , 其中 Z51 样品铅和锌含量超过风险筛选值, Z48、Z50、BZ37 和 BZ39 样品镉、铅、锌含量均超过风险筛选值, 所有样品含量均未超过风险管控值。

从以上分析可知, 研究区内 4 种根系土样品中镉、铅和锌含量都有不同程度的超标现象。其中 15 件样品镉含量超过风险筛选值, 超标率为 10.6%; 有 21 件样品铅和锌含量超过风险筛选值, 超标率均为 44.7%。

从点位分布及超标情况可以看出, 根系土中重金属元素含量的高低与采样点位和排污渠之间的距离有一定的关系, 随着采样点位与排污渠距离的增加, 根系土中重金属元素含量有降低的现象, 即距排污渠越近, 土壤受到各类重金属元素的污染越重。

2.4 粒实重金属含量特征与评价

区内 4 种农作物籽实重金属元素含量特征见表

表 7 包头南郊农作物籽实重金属含量特征值

Table 7 Characteristic value of heavy metal content in crop seeds in the southern suburbs of Baotou

农作物	特征值	镉	铅	锌	农作物	特征值	镉	铅	锌
玉米	最大值/ 10^{-6}	0.009	0.71	21.8	葱	最大值/ 10^{-6}	0.016	0.19	5.87
	最小值/ 10^{-6}	0.002	0.07	12.2		最小值/ 10^{-6}	0.002	0.01	2.41
	均值/ 10^{-6}	0.005	0.33	17.9		均值/ 10^{-6}	0.007	0.07	3.58
向日葵	最大值/ 10^{-6}	0.303	19.70	128.0	圆白菜	最大值/ 10^{-6}	0.013	0.25	4.73
	最小值/ 10^{-6}	0.066	0.01	74.8		最小值/ 10^{-6}	0.001	0.01	0.96
	均值/ 10^{-6}	0.168	2.38	95.1		均值/ 10^{-6}	0.002	0.05	2.04

表 8 包头南郊农作物籽实超标样品及含量统计

Table 8 Statistical of elements and contents exceeding the standard in crop seeds in the southern suburbs of Baotou

农作物	超标样品	超标元素(含量/ 10^{-6})	农作物	超标样品	超标元素(含量/ 10^{-6})
玉米	Z54	铅(0.40)	向日葵	Z55	铅(0.61)
	Z31	铅(0.51)		Z30	铅(0.22)
	BZ20	铅(0.71)		Z29	铅(0.33)
	BZ21	铅(0.32)		Z28	铅(0.35)
	BZ23	铅(0.40)		Z16	铅(19.7)
	BZ25	铅(0.49)		圆白菜	BZ13

7, 与食品中污染物限量标准对比结果见表 8。

从表 7 和表 8 看出, 玉米籽实中镉、铅和锌含量变化范围分别在 $(0.002 \sim 0.009) \times 10^{-6}$ 、 $(0.07 \sim 0.71) \times 10^{-6}$ 和 $(12.2 \sim 21.8) \times 10^{-6}$, 平均值分别为 0.005×10^{-6} 、 0.33×10^{-6} 和 17.9×10^{-6} , 其中 Z31、Z54、BZ20、BZ21、BZ23 和 BZ25 样品铅含量超标, 除 BZ23 和 BZ25 以外, 其余样品对应的根系土铅含量也均超标。

向日葵籽实中镉、铅和锌含量变化范围分别在 $(0.066 \sim 0.303) \times 10^{-6}$ 、 $(0.01 \sim 19.7) \times 10^{-6}$ 和 $(74.8 \sim 128.0) \times 10^{-6}$, 平均值分别为 0.168×10^{-6} 、 2.38×10^{-6} 和 95.1×10^{-6} 。向日葵籽实 Z16、Z28、Z29、Z30 和 Z55 样品铅含量超标, 但仅 Z55 样品对应根系土铅含量超标, 其余 4 件样品根系土重金属均未超标。

葱可食部分中镉、铅和锌含量变化范围分别在

$(0.002 \sim 0.016) \times 10^{-6}$ 、 $(0.01 \sim 0.19) \times 10^{-6}$ 和 $(2.41 \sim 5.87) \times 10^{-6}$, 平均值分别为 0.007×10^{-6} 、 0.07×10^{-6} 和 3.58×10^{-6} , 所有样品均未超标。

圆白菜可食部分中镉、铅和锌含量变化范围分别在 $(0.001 \sim 0.013) \times 10^{-6}$ 、 $(0.01 \sim 0.25) \times 10^{-6}$ 和 $(0.96 \sim 4.73) \times 10^{-6}$, 平均值分别为 0.002×10^{-6} 、 0.05×10^{-6} 和 2.04×10^{-6} , 其中 BZ13 样品铅含量超标。

从以上分析可知, 研究区内 4 种农作物籽实样品中, 向日葵、玉米和圆白菜共有 12 件样品铅超标,

对应的根系土中铅仅有 5 件样品超标,其余均未超标。

2.5 农作物籽实生物富集特征

从表 9 统计结果可知,玉米籽实中锌富集系数为 9.23%,呈强富集特征,镉和铅分别呈正常和低富集特征。向日葵籽实中镉、铅和锌的富集系数分别为 59.26%、4.70%、56.56%,均呈强富集特征,并且镉和锌的富集系数分别是强富集划分标准($BCF > 4.5\%$)的 13.2 倍和 12.6 倍,说明向日葵超强吸附镉和铅。葱可食部分镉和锌富集系数分别为 1.66% 和 1.64%,呈中等富集特征,铅呈低富集特征。圆

表 9 包头南郊农作物籽实生物富集系数统计

Table 9 Statistical of crop seed bioconcentration factors in the southern suburbs of Baotou

农作物	BCF_{Cd}			BCF_{Pb}			BCF_{Zn}		
玉米	1.68	0.28	9.23						
向日葵	59.26	4.70	56.56						

农作物	BCF_{Cd}			BCF_{Pb}			BCF_{Zn}		
葱		1.66	0.05		1.64				
圆白菜		0.60	0.04		0.65				

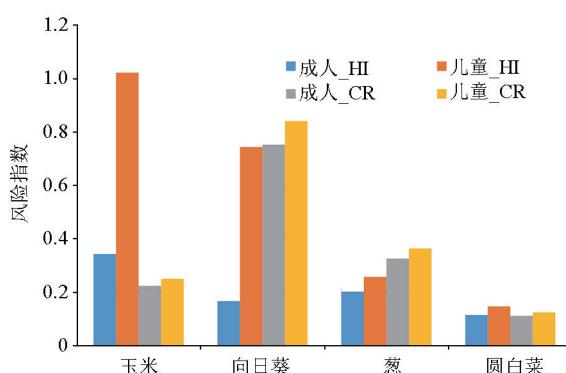
表 10 成人和儿童非致癌和致癌风险指数统计

Table 10 Statistical of non-carcinogenic and carcinogenic risk index for adults and children

农作物	成人			HI	$CR/10^{-4}$	儿童			HI	$CR/10^{-4}$
	HQ_{Cd}	HQ_{Pb}	HQ_{Zn}			HQ_{Cd}	HQ_{Pb}	HQ_{Zn}		
玉米	0.011	0.205	0.128	0.344	0.22	0.032	0.610	0.381	1.023	0.25
向日葵	0.240	0.972	0.454	1.666	7.53	1.072	4.342	2.026	7.441	8.41
葱	0.036	0.106	0.060	0.202	0.33	0.046	0.135	0.076	0.258	0.36
圆白菜	0.012	0.069	0.034	0.115	0.11	0.016	0.088	0.043	0.147	0.12

向日葵籽实中镉对儿童和成人的致癌风险值均超过 1×10^{-4} , 致癌风险已经达到一定的水平,应当引起关注。从图 1 可知,向日葵的 Z28、Z29、Z30 和 Z55 较高风险点均分布在排污渠较近的地方。

从图 6 看出,儿童与成人相比,非致癌和致癌健康风险均高于成人。



注:向日葵值=实测值/10

图 6 成人与儿童非致癌和致癌健康风险指数对比

Fig. 6 Comparison of non-carcinogenic and carcinogenic

health risk indices between adults and children

白菜可食部分中镉和锌富集系数分别为 0.60% 和 0.65%,呈正常富集特征,铅呈低富集特征。

根据以上分析可知,向日葵籽实中镉、铅和锌,玉米籽实中锌均呈强富集特征,其余农作物籽实中重金属元素呈中等以下富集特征。不同的农作物籽实对重金属元素具有比较明显的吸附专属性,对有害元素吸附过量会造成有害元素累积和超标,对人类健康会产生影响^[29-31]。

2.6 籽实重金属的人体健康风险评价

按照非致癌风险模型计算,分别得到成人和儿童农作物重金属单项非致癌健康风险指数(HQ)和非致癌风险总指数(HI),详见表 10。

通过表 10 可知,成人的向日葵风险指数大于 1,儿童的玉米和向日葵风险指数均大于 1,表明研究区内生长的向日葵和玉米对人体存在非致癌健康风险。成人和儿童非致癌总风险中,铅健康风险指数在总指数中占比最高,由此可见,重金属铅是非致癌风险的最大贡献因子。

通过上述分析可知,该研究区向日葵对儿童和成人均存在明显的非致癌和致癌健康风险。儿童非致癌和致癌风险均比成人的高,这与前人的研究结果相似。这是由于儿童体重较轻,且摄入暴露的风险更大,故儿童的健康风险更大,应加强关注重金属健康风险对儿童的危害^[32-33]。

3 结论

1) 研究区土壤中镉、铅和锌含量与全国土壤背景值对比有明显的富集现象。区内土壤环境质量以清洁土壤为主,污染土壤主要分布于旧排污渠两侧,根系土超标点位也主要分布在旧排污渠周边。虽然旧排污渠现已硬化,但是对周边土壤已经遗留了具大生态风险隐患。

2) 3 种重金属元素形态中碳酸盐结合态、铁锰结合态和残渣态占比较高,可交换态(水溶态、离子交换态)占比较低,研究区重金属元素活性相对低,因此大部分籽实样品呈正常和低富集特征,说明研究区农作物籽实重金属超标成因较为复杂,重金属

含量可能受大气、水质环境、土壤理化性质和施肥灌溉等多种环境因素综合影响,土壤重金属只是来源之一。

3)与其他农作物相比,向日葵籽实5个样品铅超标,并且镉、铅和锌均呈强富集特征,说明向日葵籽实对镉、铅和锌具有超强吸附性,区内重金属高值区不适宜种植向日葵。重金属含量对儿童和成人均存在明显非致癌和致癌健康风险,应引起重视。

参考文献(References):

- [1] 王蕊,陈楠,张二喜.基于总量与形态的矿区周边土壤重金属生态风险与健康风险评估[J].环境科学,2022,43(3):1546-1557.
Wang R, Chen N, Zhang E X. Ecological and health risks assessment based on the total amount and speciation of heavy metals in soils around mining areas [J]. Environmental Science, 2022, 43 (3): 1546-1557.
- [2] 兰玉书,石楷岐,杨刚,等.磷石膏堆场周边水稻土重金属污染特征及稻米的人体健康风险分析[J].地球环境学报,2021,12(2):224-231.
Lan Y S, Shi G Q, Yang G, et al. Status of heavy metal pollution in paddy soil and human health risk assessment of rice around phosphogypsum yard [J]. Journal of Earth Environment, 2021, 12 (2) : 224-231.
- [3] 张云,胡正生,王艳,等.某氧化铜矿尾矿区重金属污染特征及农作物健康风险评价[J].有色金属工程,2021,11(4):125-132.
Zhang Y, Hu Z S, Wang Y, et al. Heavy metals pollution characteristics and crop health risk assessment around a copper oxide tailings pond [J]. Nonferrous Metals Engineer, 2021, 11 (4) : 125 -132.
- [4] 陈晓鸿,李强,喇优抓.南盘江流域曲靖段土壤及农作物中重金属污染特征与生态风险评价[J].安徽农学通报,2020,26(15):126-132.
Chen X H, Li Q, La Y Z, et al. The pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the crops and soils from the Qujing section of the Nanpan River [J]. Anhui Agronomy Bulletin, 2020, 26(15) : 126-132.
- [5] 袁余洋,刘属灵,刘永林,等.重庆江津区自产大米和玉米中重金属的健康风险评价[J].湖南农业大学学报:自然科学版,2021,47(6):677-683.
Yuan Y Y, Liu S L, Liu Y L, et al. The heavy metal content characteristic and human health risk assessment of rice and corn in Jiangjin District, Chongqing [J]. Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences, 2021, 47(6) : 677-683.
- [6] 黄钟霆,易盛炜,陈贝贝,等.典型锰矿区周边农田土壤—农作物重金属污染特征及生态风险评价[J].环境科学,2022,43(2):975-984.
Huang Z T, Yi S W, Chen B B, et al. Pollution properties and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils and crops around a typical manganese mining area [J]. Environmental Sci-ence, 2022, 43(2) : 975-984.
- [7] 肖作义,赵鑫,孟庆学,等.内蒙古某尾矿库土壤重金属污染健康风险评价与来源解析[J].有色金属工程,2020,10(12):135-142.
Xiao Z Y, Zhao X, Meng Q X, et al. Health risk assessment and source analysis of heavy metal pollution in the soil of a tailings dam in Inner Mongolia [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10 (12) : 135-142.
- [8] 张璐瑶,赵科理,傅伟军.电子垃圾拆解区土壤—农作物系统中镉元素的空间分布特征及其风险评价[J].环境科学,2021,42(9):4432-4440.
Zhang L Y, Zhao K L, Fu W J. Spatial distribution characteristics and risk assessment of cadmium pollution in soil-crops system of an e-waste dismantling area [J]. Environmental Science, 2021, 42 (9) : 4432-4440.
- [9] 王晓睿,高秉婷,吴永贵,等.粉煤灰堆场基质—农作物系统中重金属生态风险及健康风险评价[J].有色金属:矿山部分,2021,73(6):116-124.
Wang X R, Gao B T, Wu Y G, et al. Ecological risk and health risk assessment of heavy metals in fly ash yard matrix-crop system [J]. Nonferrous Metals: Mine Part, 2021, 73(6) : 116-124.
- [10] 杨剑洲,王振亮,高健翁,等.海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险[J].环境科学,2021,42(10):4916-4924.
Yang J Z, Wang Z L, Gao J W, et al. Accumulation and health risk of heavy metals in cereals, vegetables, and fruits of intensive plantations in Hainan Province [J]. Environmental Science, 2021, 42 (10) : 4916-4924.
- [11] 黄阳,陈倩,邓明,等.重金属污染和健康风险评估农业土壤在东南沿海典型区域[J].环境管理,2018,207:159-168.
Huang Y, Chen Q, Deng M, et al. Heavy metal pollution and health risk assessment of agricultural soils in a typical periurban area in southeast China [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 207: 159-168.
- [12] 张庆辉,王贵,朱晋,等.包头南郊灌区农田表层土壤重金属潜在生态风险综合评价[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2012,40(7):181-192.
Zhang Q H, Wang G, Zhu J, et al. Comprehensive evaluation of potential ecological risk of heavy metals in the surface irrigation area of southern suburbs in Baotou [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2012, 40(7) : 181-192.
- [13] 王沛东,段海龙,谢燕,等.内蒙古河套平原小麦产区土壤元素生物有效性研究[J].安全与环境工程,2015,22(6):72-78.
Wang P D, Duan H L, Xie Y, et al. Research on biological availability of soil elements in wheat-growing regions in Hetao Plain, Inner Mongolia [J]. Safety and Environmental Engineering, 2015, 22 (6) : 72-78.
- [14] 刘菊梅,栗利曼,沈渭寿,等.黄河包头段灌区玉米重金属污染及人群健康风险评价[J].南方农业学报,2015,46(9):1591-1595.
Liu J M, Li L M, Shen W S, et al. Heavy metal pollution of corn and human health risk assessment in Baotou section of the Yellow River [J]. Journal of Southern Agriculture, 2015, 46 (9) : 1591 -1595.
- [15] 栗利曼,刘菊梅,沈渭寿,等.包头工业区蔬菜重金属富集及人

- 群健康评价[J]. 中国蔬菜, 2016(1):54-59.
- Li L M, Liu J M, Shen W S, et al. Heavy metal enrichment and population health risk assessment of vegetables in Baotou industrial district[J]. China Vegetables, 2016(1):54-59.
- [16] 黄哲, 曲世华, 白岚, 等. 包头城区土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境工程, 2017, 35(5):149-153.
- Huang Z, Qu S H, Bai L, et al. Spatial distribution characteristics and pollution assessment of heavy metal soils in urban areas of Baotou[J]. Environmental Engineering, 2017, 35(5):149-153.
- [17] 赵颖, 王飞, 乔鹏明. 污灌区农田土壤—作物体系重金属复合污染及健康风险评价[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(23):270-274.
- Zhao Y, Wang F, Qiao P M, et al. Heavy metal compound pollution and health risk assessment of farmland soil-crop system in sewage irrigation area [J]. Jiangsu Agricultural Department, 2020, 48(23):270-274.
- [18] 李武汉, 朱四喜, 王众, 等. 西南山地煤矿区耕地土壤—农作物重金属富集及健康风险评价[J]. 中国无机分析化学, 2021, 11(5):22-30.
- Li W J, Zhu S X, Wang Z, et al. Heavy metals enrichment and health risk assessment of cultivated soil-crops in mountainous coal mining areas of southwest China[J]. Chinese Journal of Inorganic analytical Chemistry, 2021, 11(5):22-30.
- [19] 中华人民共和国生态环境部. GB 15618—2018 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S]. 2018.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. GB 15618—2018 Soil environmental quality. Agricultural land soil pollution risk control standard(Trial) [S]. 2018.
- [20] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 2762—2017 食品安全国家标准 食品中污染物限量标准[S]. 2017.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, China food and drug administration. GB 2762—2017 National standard for food safety[S]. 2017.
- [21] 胡永兴, 宿虎, 张斌, 等. 土壤重金属污染及其评价方法概述[J]. 江苏农业科学 2020, 48(17):33-39.
- Hu Y X, Su H, Zhang B, et al. Overview of soil heavy metal pollution and its evaluation methods[J]. Jiangsu Agricultural Sciences 2020, 48(17):33-39.
- [22] 周亚龙, 王乔林, 王成文, 等. 雄安新区企业周边农田土壤—作物系统重金属污染风险及累积效应[J]. 环境科学, 2021, 42(12):5977-5987.
- Zhou Y L, Wang Q L, Wang C W, et al. Risk and cumulative effect of heavy metal pollution in farmland soil-crop system around enterprises in Xiong'an New Area [J]. Environmental Science, 2021, 42(12):5977-5987.
- [23] 许佳霖, 武帅, 梁鹏, 等. 高虹镇稻米中重金属污染状况及健康风险评价[J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34(6):983-990.
- Xu J L, Wu S, Liang P, et al. Heavy metal pollution and health risk assessment of rice in Gaozhong Town[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2017, 34(6):983-990.
- [24] 陈丹, 周于杰, 章佳文, 等. 基于什邡市农田土壤中铅、锌的人体健康风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(12):2687-2693.
- Chen D, Zhou Y J, Zhang J W, et al. Human health risk assessment based on lead and zinc in farmland soil of Shifang City[J]. Journal of Agricultural Environmental Sciences, 2018, 37(12):2687-2693.
- [25] 陈凤, 董泽琴, 王程程, 等. 锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价[J]. 环境科学, 2017, 38(10):4360-4369.
- Chen F, Dong Z Q, Wang C C, et al. Heavy metal pollution status and risk assessment of cultivated soil and crops in zinc smelting area[J]. Environmental Science, 2017, 38(10):4360-4369.
- [26] 郭展翅, 周葆华, 赵宽, 等. 长江中下游某地区农田镉形态特征及污染评价[J]. 安庆师范大学学报: 自然科学版, 2021, 27(1):96-101.
- Guo Z C, Zhou B H, Zhao K, et al. Speciation characteristics and pollution assessment of cadmium in farmland in a certain area in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Anqing Normal University: Natural Science Edition, 2021, 27(1):96-101.
- [27] 李如忠, 潘成荣, 陈婧, 等. 基于盲数理论的城市表土与灰尘重金属污染健康风险评价模型[J]. 环境科学学报, 2013, 33(1):276-285.
- Li R Z, Pan C R, Chen J, et al. Health risk assessment model of heavy metal pollution in urban topsoil and dust based on blind number theory [J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 33(1):276-285.
- [28] 段小丽. 中国人群暴露参数手册[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013:262.
- Duan X L. Manual of exposure parameters of Chinese population [M]. Beijing: China Environment Press, 2013:262.
- [29] 李良忠, 张丽娟, 胡国成, 等. 西南某矿区家庭灰尘中重金属的暴露及其健康风险评价[J]. 生态毒理学报, 2017, 12(5):235-242.
- Li L Z, Zhang L J, Hu G C, et al. Exposure of heavy metals in household dust in a mining area in southwest China and its health risk assessment[J]. Acta Ecotoxicologica Sinica, 2017, 12(5):235-242.
- [30] 强瑀, 李英菊, 罗谦, 等. 典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价[J]. 环境科学, 2021, 42(12):5967-5976.
- Qiang J, Li Y J, Luo Q, et al. Relationship characteristics and risk assessment of heavy metal contents in soil aggregates and in crops around a typical Pb-Zn mining area [J]. Environmental Science, 2021, 42(12):5967-5976.
- [31] 陈继平, 钱中东, 任蕊, 等. 陕西关中富硒土壤区农作物重金属含量相关性及安全性评价[J]. 西北地质, 2021, 54(2):273-281.
- Chen J P, Chao Z D, Ren R, et al. Correlation and safety evaluation of heavy metals in crops in selenium-rich soil area of Guanzhong, Shaanxi Province[J]. Northwest Geology, 2021, 54(2):273-281.
- [32] 郑堃, 任宗玲, 覃小泉, 等. 韶关工矿区水稻土和稻米中重金属污染状况及风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(5):915-925.

- Zheng K, Ren Z L, Qin X Q, et al. Pollution status and risk assessment of heavy metals in paddy soil and rice in Shaoguan industrial and mining area [J]. Journal of Agricultural Environmental Sciences, 2018, 37(5): 915–925.
- [33] 周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 等. 雄安新区农田土壤—农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析[J]. 环境科学, 2021, 42(4): 2002–2015.

Environmental quality characteristics of soil and health risk assessment of crops of farmlands in the southern suburb of Baotou

Bao Feng-Qin^{1,2}, Cheng Hang-Xin², Yong Sheng³, Zhou Li-Jun⁴, Yang Yu-Liang¹

(1. Key Laboratory of Magmatic Activity, Mineralization and Prospecting in Inner Mongolia Autonomous Region, Inner Mongolia Autonomous Region Institute of Geological Survey, Hohhot 010020, China; 2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China; 3. Inner Mongolia Police Professional College, Hohhot 010051, China; 4. Inner Mongolia Geology and Mineral Resources (Group) Co., Ltd., Hohhot 010024, China)

Abstract: To investigate and assess the characteristics of cadmium, lead, and zinc in the soil and crops in the farmland around the old industrial area in the south of Baotou City, this study analyzed and tested the heavy metal content in soil, crop root soil, and seeds, assess the pollution according to relevant standards, and conducted the risk assessment and source analysis of heavy metals using the pollution index, the bioconcentration factor, and human health risk index. The results are as follows: Regarding the soil environmental quality, the soils in the study area are dominated by clean soils, with the polluted soils distributed primarily on both sides of the old sewage canals. The sites of over-limit root soils are also primarily distributed around the old sewage canals. Among the heavy metal morphologies, carbonate-bound, Fe-Mn-bound, and residue heavy metals account for relatively high proportions, while exchangeable heavy metals (water-soluble and ion-exchange) account for relatively low proportions. Most of the seed samples exhibited normal and low enrichment of heavy metals. Compared with other crops, sunflower seeds showed super adsorptivity of cadmium, lead, and zinc, posing significant non-carcinogenic and carcinogenic health risks to children and adults.

Key words: farmland soil; crop; environmental quality; health risk assessment; Baotou

(本文编辑:蒋实)