

崔政武,王洋,于锐,等. 吉林省农田长期施用猪粪的土壤—玉米重金属含量特征及健康风险[J]. 土壤与作物,2022,11(4):470–481.
CUI Z W, WANG Y, YU R, et al. Concentration characteristics and health risk of heavy metals in soil and maize with long – term application of swine manures in farmland of Jilin Province[J]. Soils and Crops, 2022, 11(4) :470 – 481.

吉林省农田长期施用猪粪的土壤—玉米重金属含量特征及健康风险

崔政武^{1,2}, 王洋¹, 于锐¹, 王佳宁¹

(1. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 湿地生态与环境重点实验室, 吉林 长春 130102;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 畜禽粪便的农田施用可引起土壤和作物中重金属累积, 并通过生物链传递, 影响人群健康。以吉林省 7 家大型养猪场周边长期施用猪粪的玉米农田为研究对象, 研究了土壤和玉米籽粒中重金属的含量特征, 以阐明猪粪农田施用对土壤质量及人群健康的影响。研究结果表明, 土壤中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的平均含量分别为 9.430、0.128、31.21、28.15、0.021、19.60、26.00 和 71.76 mg·kg⁻¹, As、Cd、Cu、Pb 和 Zn 等平均含量高于吉林省土壤背景值; 运用地累积指数法和内梅罗综合污染指数法对土壤污染状况的评价表明, 土壤 Cu 和 As 处于轻–中污染水平, 综合污染水平处于安全等级。玉米籽粒中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 平均含量分别为 0.164、0.036、0.698、2.196、0.003 8、0.357、0.295 和 25.23 mg·kg⁻¹, Pb、Ni 和 As 含量不同程度超过国家食品卫生标准。不同重金属在玉米籽粒中的富集能力具有较大差异, Zn 富集程度最高, Pb 富集程度最低。不同重金属对成人的健康风险较小, As 对儿童的健康风险指数大于 1; 成人和儿童的综合健康风险均大于 1, 表明长期施用猪粪的玉米具有一定的健康风险。

关键词: 畜禽粪便; 土壤—玉米系统; 重金属; 含量特征; 健康风险

中图分类号: X53; X56 文献标识码: A 文章编号: 2095 – 2961 (2022) 04 – 470 – 12

Concentration characteristics and health risk of heavy metals in soil and maize with long – term application of swine manures in farmland of Jilin Province

CUI Zhengwu^{1,2}, WANG Yang¹, YU Rui¹, WANG Jianing¹

(1. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The application of livestock manure in farmland can cause the accumulation of heavy metals in soil and crops. The heavy metals can be transmitted through the biological chain, ultimately affecting the health of the populace. The maize fields with long – term swine manure application around seven large hog farms in Jilin Province were selected to study the concentration characteristics of heavy metals in soil and maize grains, and to clarify the effects of livestock manure application on soil quality and population health. The results showed that the average concentrations of As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn in soil were 9.430, 0.128, 31.21, 28.15, 0.021, 19.60, 26.00 and 71.76 mg·kg⁻¹, respectively. The average concentrations of As, Cd, Cu, Pb and Zn were higher than the soil background values in Jilin Province. Geo – accumulation index and Nemerow integrated pollution index were used to evaluate the pollution status of soil. The pollution levels of Cu and As in soil were with the highest values, reaching light – moderate pollution level, and the comprehensive pollution was at the safety level. The average concentrations of As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn in maize grains were 0.164, 0.036, 0.698, 2.196, 0.0038, 0.357, 0.295 and 25.23 mg·kg⁻¹, respectively, and the concentrations of Pb, Ni and Zn exceeded the National Food Hygiene Standards to varying degrees. The enrichment ability of different heavy met-

收稿日期: 2022 – 04 – 22; 修回日期: 2022 – 05 – 13.
基金项目: 吉林省科技发展规划项目 (20210203005SF); 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) 资助 (XDA23070502); 国家基础资源调查专项 (2021FY100402); 吉林省重大科技专项课题 (20200503001SF) .
第一作者简介: 崔政武 (1987 –), 男, 在读博士, 研究方向为环境生态与生物地球化学. E – mail: cuizhengwu@ iga. ac. cn.
通信作者: 王洋 (1970 –), 男, 研究员, 研究方向为环境生态与生物地球化学. E – mail: wangyangw@ iga. ac. cn.

als in maize grains had great diversity, the enrichment degree of Zn was with the highest value, and the enrichment degree of Pb was with the lowest value. The health risk of heavy metals to adults was small, the health risk index of As to children was greater than 1, while the comprehensive health risk of both adults and children was greater than 1, indicating that maize with long-term application of swine manure has certain health risks.

Key words: livestock manures; soil – maize system; heavy metals; concentration characteristics; health risk

0 引 言

随着我国畜禽养殖业迅速发展，养殖废弃物产生量逐年增加，畜禽粪便的农田肥料化利用已成为越来越普遍的资源化方式。重金属是畜禽养殖中应用最为广泛和使用量最大的一类添加剂，主要用于促进动物生长、提高饲料效率和治疗控制疾病等^[1]。我国畜禽饲料中普遍添加重金属，每年向饲料中添加的重金属元素约 150 万 t，重金属不能在动物体内完全吸收代谢，大部分会随粪便排出而进入环境中^[2]。随着畜禽粪便的农田施用，大量重金属在土壤中累积，并可通过食物链进入人体，对土壤质量和人群健康均构成潜在的危害。因此，研究长期施用畜禽粪便的农田系统中重金属含量水平有利于准确评价它们的生态效应和环境风险，并对此采取有效的阻控措施。

吉林省是我国重要的优质商品粮生产基地以及畜禽养殖大省，每年出产的粮食约占全国总产量的 5%，粮食商品率达 70% 以上^[3]。同时，畜禽养殖业已成为农村经济的主导产业，总产值占到农业总产值的 50.7%。2019 年，全省畜禽粪污产生量约 5 300 万 t，畜禽粪便的土地利用面临巨大压力^[4]。目前对于吉林省长期施用畜禽粪便农田系统中重金属污染特征研究较少，尤其是长期施用畜禽粪便的农田生态系统环境风险尚不明确。因此，本文选取吉林省有代表性的养猪场，采集周边长期施用猪粪的玉米农田土壤及对应的玉米籽粒样品，评价农田土壤污染水平和农产品安全性，探讨长期猪粪施用条件下重金属在土壤—农作物系统的累积富集特征，为农田生态环境保护、农产品质量安全监控提供科学依据。

1 材料与amp;方法

1.1 样品采集

以长期施用猪粪便的玉米农田为研究对象，选取吉林省典型黑土（德惠市、长春市和公主岭市）、黑钙土（扶余市和农安县）和白浆土（东丰县）分布区的 7 家大型养猪场（表 1），对养猪场周边长期施用猪粪的表层土壤（0~20 cm）以及相应的玉米样品进行采集。每个养猪场周边选 3 个采样点，每个点按蛇形分散式采集 5 个点并混合。玉米样品采集地点与土壤样品保持一致，取整穗玉米，脱粒后混匀，用四分法留取适量作为一个玉米样品。经调查，研究区施肥模式为猪粪直接还田，并配施少量化肥，复合肥施用量约为 1.0 t·hm⁻²，种植的玉米品种主要为京科 968 和先玉 335。在距离采样点 3 km 左右的范围内，采集未施用畜禽粪便的农田土壤样品作为对照样品。土壤样品经自然风干后，去除根系、残渣、石块等杂物并研磨过 100 目尼龙筛；玉米样品用清水洗去表面粘附的杂质，再用去离子水清洗 3~5 次，用滤纸吸掉表面水分后放入干燥箱中（80℃）烘干至恒重，取出后用植物粉碎机粉碎，过 20 目尼龙筛后装袋待分析。

1.2 分析方法与质量控制

土壤样品的 pH 采用玻璃电极测定（土水比为 1:2.5）。有机质采用 Walkley – Black 滴定法测定^[5]。土壤和作物中重金属参照茹淑华的方法进行测定^[6]：土壤样品（约 0.200 g）加入 5 mL HNO₃、5 mL HClO₄ 和 3 mL HF，玉米籽粒样品（约 0.500 g）加入 8 mL HNO₃和 2 mL HClO₄，分别经高温消解，消解液中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 等含量用电感耦合等离子体质谱仪（ICP – MS）测定。每一批样品均加入土壤标样（GBW07410）和植株标样（GBW08503C）进行质量控制，8 种重金属的回收率均在 90%~110% 之间，As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的检出限分别为 0.04、0.001、0.01、0.1、0.02、0.1、0.01 和 0.1 mg·kg⁻¹。

表 1 养猪场及周边农田基本信息

Table 1 General information of hog farm and surrounding farmland

编号 Number	所在地 Location	坐标 Coordinate		出栏量/头/年 Slaughter/per year	投产时间/年 Operation time/year
		经度	纬度		
		Longitude	Latitude		
XJ	扶余市肖家乡 Xiaojia town in Fuyu city	125. 8796	45. 0970	200	2014
HLH	农安县哈拉海镇 Halahai town in Nong'an	125. 1805	44. 5373	50	2012
BH	德惠市布海镇 Buhai town in Dehui city	125. 7262	44. 4561	400	2012
LJ	长春市兰家镇 Lanjia town in Changchun city	125. 2006	44. 0028	100	2016
DYS	公主岭市大榆树镇 Dayushu town in Gongzhuling city	124. 6876	43. 6530	300	2009
DF	东丰县东丰镇 Dongfeng town in Dongfeng city	125. 5297	42. 7228	250	2013
DX	东丰县大兴镇 Daxing town in Dongfeng city	125. 4834	42. 7647	300	2010

1.3 污染评价

采用地累积指数（Geo – accumulation index， I_{geo} ）和内梅罗综合污染指数（Nemerow integrated pollution index，NIPI）对土壤重金属的污染程度进行评价^[7-8]。地累积指数计算公式为：

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_{soil}}{1.5B_{soil}} \right)$$

(1)

式（1）中： I_{geo} 为地累积指数； C_{soil} 为实测的土壤重金属浓度， $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ； B_{soil} 为土壤重金属背景值， $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

内梅罗综合指数的计算公式为：

$$NIPI = \sqrt{\frac{PI_{imax}^2 + PI_{iave}^2}{2}}$$

(2)

$$PI = \frac{C_{soil}}{S_n}$$

(3)

式（2）和（3）中： $NIPI$ 为内梅罗综合污染指数值； PI 是每种重金属的污染指数； S_n 为某一重金属元素的标准限值。地累积指数和内梅罗综合污染指数的详细分级见文献^[7-8]。

1.4 重金属富集系数

采用富集系数（Bioconcentration factor，BCF）评估玉米籽粒对土壤重金属的吸收效率^[9]。公式如下：

$$BCF = \frac{C_{maize}}{C_{soil}}$$

(4)

式（4）中： C_{maize} 和 C_{soil} 分别为玉米籽粒和土壤中的重金属含量（ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ）。

1.5 人群健康风险评价

采用危害商（Hazard Quotient，HQ）评价重金属对不同年龄段的人群健康风险^[10]。由于成人和儿童每天摄入量不同，对污染物的耐受限度也不相同，因此，对成人和儿童摄入玉米的重金属健康风险分别进行评价。单个重金属的潜在健康风险计算公式（5）－（6）如下：

$$ADD = \frac{C_{\text{maize}} \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

(5)

$$HQ = \frac{ADD}{RfD}$$

(6)

式 (5) 和 (6) 中： ADD 为重金属经作物摄入的平均日摄取量 ($(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) \cdot \text{d}^{-1}$)； C_{maize} 为作物中重金属浓度 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)； IR 为摄入率 ($\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$)； EF 为暴露频率 ($\text{day} \cdot \text{year}^{-1}$)； ED 为暴露持续时间 (year)； BW 是平均体重 (kg)； AT 是平均剂量的时间段 (day)； RfD 是参考剂量 ($(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) \cdot \text{d}^{-1}$)。

多种重金属复合暴露的总 HQ 用 HI (Hazard index) 表示，其计算公式为式 (6)：

$$HI = \sum HQ_i$$

(7)

式 (7) 中： HQ 为重金属的危害商； HI 为不同重金属危害商的总和。当 HQ 或 $HI \leq 1$ ，表示健康风险较低或没有； HQ 或 $HI > 1$ ，表示可能发生健康风险，数值越大则健康风险越大； HQ 或 $HI > 10$ 时，则可能存在慢性毒性效应^[11]。健康风险评估参数的详细信息见表 2。

表 2 人群健康风险评估模型参数

Table 2 Parameters of human health risk assessment model

参数 Parameter	缩写 Symbol	单位 Unit	成人 Adults	儿童 Children	参考文献 Reference
摄入量 Ingestion rate	IR	kg·d ⁻¹	0.1	0.05	[12]
暴露时间 Exposure duration of crop	ED	a	30	10	
暴露频率 Exposure frequency	EF	day·a ⁻¹	350	350	[13]
平均体重 Average body weight	BW	kg	60	15	
平均接触时间 Average time	AT	d	ED×365		[14]
暴露剂量 Reference dose	RfD	(mg·kg ⁻¹)·d ⁻¹	Cd: 0.001, Cr: 0.003, As: 0.000 3 Pb: 0.003 5, Cu: 0.04, Zn: 0.3, Ni: 0.02, Hg: 0.000 3		
					[15]

2 结果与讨论

2.1 农田土壤重金属含量特征

土壤中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 含量的统计特征值见表 3。As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 平均含量分别为 9.43、0.13、31.21、28.15、0.021、19.60、26.00 和 71.76 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (以干重计)。不同类型土壤中重金属表现出不同的分布特征，As、Cr、Hg、Pb 和 Zn 含量在白浆土较高，Cd、Cu 和 Ni 在典型黑土中含量较高。不同类型土壤的理化性质差异明显，如 pH 值、有机质含量和黏粒含量等，是影响土壤重金属累积的重要因素。重金属在典型黑土和白浆土中的含量高于黑钙土，一方面是由于典型黑土及白浆土多为壤质黏土，黏粒含量高于黑钙土，高黏粒含量利于对重金属的固定^[16]；另一方面，典型黑土有机质含量高于白浆土和黑钙土，对重金属络合作用强，有利于重金属的固持；最后，黑钙土的 pH 值介于 7.36~8.85 之间，显著高于白浆土和典型黑土，一般认为，土壤 pH 值越高，表面电荷 OH^- 越多，有利于重金属难溶物质的形成，这与本研究中的规律不一致，可能是由于当土壤 pH 过高时 (>7.5)，重金属沉淀物与羟基络合而溶出，从而导致土壤金属含量降低^[17]。造成不同类型土壤中重金属含量差异的另一个重要原因是白浆土和典型黑土区的养殖时间普遍早于黑钙土区，施用猪粪的年限较长，导致了土壤中重金属含量较高。不同地区的猪饲料中重金属的添加量和种类不尽相同，这也可能是导致不同类型土壤重金属表现出不同分布特征的潜在原因^[18]。

表 3 养猪场周边农田土壤和作物重金属含量统计特征值

Table 3 Statistical characteristics of heavy metals in soil and crop around hog farms

土壤类型 Soil type	地点 Sites	重金属 Heavy metals/ (mg·kg ⁻¹)								SOM/ (g·kg ⁻¹)	pH	
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn			
黑钙土 Chernozem	XJ	1	8.50	0.061 8	41.23	25.11	0.014 2	18.95	18.55	64.01	20.01	7.58
		2	5.31	0.065 8	20.48	17.97	0.014 0	17.55	17.45	56.17	19.47	8.85
		3	7.44	0.138 8	20.85	23.70	0.018 8	18.43	21.06	61.41	20.69	7.59
		对照 Control	10.88	0.126 5	30.22	14.74	0.011 2	21.35	26.10	50.61	17.89	8.14
	HLH	1	9.39	0.123 6	19.83	27.54	0.016 4	20.05	20.64	59.22	26.32	7.59
		2	6.66	0.136 6	20.05	29.24	0.022 6	19.15	19.51	59.12	25.89	7.96
		3	8.79	0.128 2	31.51	38.58	0.018 3	19.76	20.04	69.06	25.54	7.36
		对照 Control	12.73	0.195 6	22.13	21.02	0.018 0	18.25	20.42	47.35	24.32	7.40
	平均值 Mean		7.68	0.109 1	25.66	27.02	0.017 4	18.98	19.54	61.50	22.99	7.82
典型黑土 Mollisols	BH	1	6.72	0.097 1	25.76	30.32	0.009 2	19.57	20.74	66.15	33.36	6.26
		2	8.04	0.108 1	34.96	29.82	0.020 2	19.41	21.52	67.57	31.92	6.34
		3	9.31	0.116 8	50.36	32.31	0.021 2	21.32	22.10	71.89	31.25	6.11
		对照 Control	13.33	0.146 9	47.03	18.61	0.160 0	20.56	20.53	54.15	26.38	6.25
	LJ	1	8.68	0.139 6	24.56	31.36	0.023 8	21.18	22.94	73.55	28.58	7.10
		2	10.47	0.117 7	40.42	36.81	0.024 6	23.37	24.22	76.18	28.02	6.97
		3	10.94	0.134 2	42.35	29.81	0.024 7	24.29	25.21	65.07	29.56	7.07
		对照 Control	10.89	0.178 7	46.07	17.54	0.112 5	24.67	29.76	51.96	26.9	7.02
	DYS	1	7.37	0.141 7	24.47	32.05	0.017 1	19.42	21.43	71.30	26.61	6.36
		2	6.30	0.274 8	22.57	40.59	0.018 2	19.26	20.88	73.42	25.82	6.42
		3	9.07	0.107 8	25.78	32.66	0.014 3	20.06	20.89	69.14	25.66	6.42
		对照 Control	13.16	0.162 2	40.41	23.46	0.101 6	23.07	19.68	59.27	23.31	6.52
	平均值 Mean		8.54	0.137 5	32.36	32.86	0.019 3	20.88	22.22	70.48	28.98	6.56
白浆土 Lesslve	DF	1	9.85	0.128 1	36.20	27.91	0.032 0	19.79	33.88	89.38	21.71	5.72
		2	8.94	0.188 1	31.16	17.80	0.019 6	17.07	28.49	128.3	20.85	5.49
		3	11.57	0.130 8	40.25	20.13	0.032 3	17.90	34.21	68.51	20.50	5.75
	DX	1	11.00	0.111 7	32.68	22.12	0.024 5	18.60	40.12	71.57	20.70	5.17
		2	20.80	0.145 8	35.24	24.20	0.028 3	18.04	53.70	72.32	22.19	5.49
		3	12.87	0.090 6	34.76	21.17	0.022 4	18.52	38.33	73.71	19.79	5.81
		对照 Control	9.70	0.045 8	47.09	17.20	0.106 3	21.38	31.00	67.90	17.10	5.21
	平均值 Mean		12.50	0.132 5	35.05	22.22	0.026 5	18.32	38.12	83.96	20.96	5.57
最小值 Min		5.31	0.06	19.83	17.80	0.01	17.07	17.45	56.17	17.10	5.17	
最大值 Max		20.8	0.28	50.36	40.59	0.03	24.29	53.70	128.27	33.36	8.85	
平均值 Mean		9.43	0.13	31.21	28.15	0.02	19.6	26.00	71.76	24.46	6.66	
标准差 Standard deviation		3.21	0.04	8.74	6.40	0.01	1.77	9.12	14.80	4.29	0.93	
变异系数% Coefficient of variation/%		34.04	30.77	28.00	22.74	50.00	9.03	35.08	20.62	17.54	13.96	
背景值 Background value (BV)		5.93	0.095	48.29	15.1	0.035	20.07	22.16	61.79			
超背景值 Proportion of exceeding the BV/%		95.24	85.71	4.76	100	0	19.05	42.86	80.95			
筛选值 * Threshold		40	0.3	150	50	1.8	70	90	200			

注：* 代表土壤环境质量标准—农用地土壤污染风险管控标准（GB 15618—2018）^[19]。
Note: * indicates Soil Environmental Quality Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land (GB 15618—2018)^[19].

与吉林省土壤背景值相比，除 Cr、Hg 和 Ni 平均含量低于土壤背景值外，As、Cd、Pb、Cu 和 Zn 的平均含量分别为背景值的 1.59、1.35、1.17、1.86 和 1.16 倍，超背景值的比例分别为 95.2%、85.7%、42.9%、100% 和 81.0%，表明研究区土壤已经受到 As、Cd、Cu、Pb 和 Zn 等重金属不同程度的累积。土壤中 As、Cd 和 Pb 变异系数大于 30%，受人类活动影响较大。化肥、农药的施用以及汽车尾气排放等是 As、Cd 和 Pb 在土壤中累积的重要原因^[14]。畜禽饲料中普遍添加一定剂量的 Cu 和 Zn 用于提高饲喂收益和饲料转化率^[20]，由于畜禽对金属元素吸收利用率较低，大部分随粪便排出，故畜禽粪便有机肥料还田已成为农田重金属主要污染源之一^[21]。对研究区土壤和对照土壤中重金属含量进行比较发现，Cr 和 Ni 含量相差不大，均未超过土壤环境背景值，说明土壤中 Cr 和 Ni 主要来源于成土母质，人类活动对这两种金属的干扰较小；对照土壤中 Cd 和 Hg 含量显著高于研究区土壤，可能是由于常年施用化肥及燃煤造成的；As 作为杀虫剂中普遍添加的金属元素^[17]，在研究区和对照土壤中含量均超过土壤背景值，表明农田土壤中施用农药的现象普遍存在，而对照土壤中 As 含量略高于研究区土壤，则可能与对照土壤的化肥施用有关，As 在化肥中尤其是磷肥中的含量较高^[22-23]；Pb 在局部点位有超过土壤背景值的情况，可能是由于距离道路较近，车辆尾气排放引起 Pb 富集；研究区土壤中 Cu 和 Zn 含量均高于对照土壤，表明长期畜禽粪便施用能够增加土壤中 Cu 和 Zn 的累积，前期的研究也证实了，长期施用畜禽粪便能够显著增加土壤 Cu 和 Zn 等重金属含量^[6]，而畜禽粪便中重金属含量是影响土壤中重金属污染程度的关键因素^[24]。

2.2 农田土壤中重金属污染评价

土壤中 8 种重金属的地累积指数和内梅罗综合污染指数的统计特征值列于表 4，地累积指数呈现为 Cu > As > Cd > Zn > Pb > Ni > Cr > Hg，Cu、As、Pb、Cd 和 Zn 分别有 76.2%，47.6%，23.8%、14.3% 和 4.76% 的样点处于轻—中污染水平，4.76% 的 As 处于中污染水平。Hg、Cr 和 Ni 均为无污染水平。土壤重金属 NIPI 的平均值为 0.46，处于安全的污染等级，NIPI 值的最大值为 0.69，接近于警戒线等级 ($0.7 < NIPI \leq 1$)，应引起重视。可见，长期施用畜禽粪便的农田土壤存在一定程度的重金属污染，其中 Cu、Zn、As、Cd、Pb 是主要污染物。重金属在不同类型土壤中的污染程度存在着一定的差异，白浆土中，As 和 Pb 处于轻—中污染水平，Cu (−0.04) 接近轻—中污染水平，并呈现为 As > Pb > Cu > Cd > Zn > Ni > Hg > Cr 的趋势；典型黑土和黑钙土中，除 Cu 处于轻—中污染水平外，其他 7 种重金属均处于无污染水平。NIPI 值表现为典型黑土 (0.51) > 白浆土 (0.42) = 黑钙土 (0.42)，均处于安全的污染等级。总体而言，长期施用猪粪便土壤中存在一定程度的 Cu、As、Pb、Cd 和 Zn 污染。对照土壤中重金属的地累积指数呈现 As > Hg > Cd > Cu > Pb > Ni > Zn > Cr 的顺序，As 和 Hg 的 I_{geo} 值介于 0~1 之间，处于轻—中污染水平，其他重金属的 I_{geo} 值均小于 0，处于无污染水平。对照土的 NIPI 平均值为 0.41，处于安全的污染等级。对照土壤 Hg、Cd 和 As 的 I_{geo} 值高于研究区土壤，可能是由于对照土壤长期施用化肥和农药，导致大量的 Hg、Cd 和 As 在土壤中累积富集，形成土壤污染；对于 Cu 和 Zn，研究区土壤的 I_{geo} 值均高于对照土壤，可能是由于猪粪便的长期施用，导致大量 Cu 和 Zn 在土壤中累积。长期施用猪粪便的农田土壤整体上处于清洁的水平，但 Cu、Zn、As、Cd、Pb 等重金属存在一定程度的污染。孙文静等^[25]对内蒙古自治区畜禽养殖场周边土壤的研究结果显示，Cd、Pb、Zn 和 Cu 达到轻度污染水平，As 接近于轻度污染水平，与本研究的结果相一致。随着猪粪便的农田施用，土壤出现了明显的重金属累积现象，尤其是 Cu 和 Zn 两种重金属，给农产品的安全生产带来了极大的潜在威胁，因此，应适当控制饲料中 Cu 和 Zn 的添加量以及猪粪有机肥的施用量，并在施用前进行无害化处理，以减少粪污施用带来的农田环境风险。

表 4 农田土壤中重金属污染指数评价

Table 4 Pollution index of heavy metals in soil

污染等级 Pollution degree	I _{geo}								NIPI
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	
最小值 Min	-0.74	-1.21	-1.87	-0.35	-2.51	-0.82	-0.93	-0.72	0.28
最大值 Max	1.23	0.95	-0.52	0.84	-0.70	-0.31	0.69	0.47	0.69
平均值 Mean	0.02	-0.23	-1.27	0.28	-1.39	-0.62	-0.42	-0.39	0.46
黑钙土 Chernozem	-0.24	-0.46	-1.56	0.22	-1.62	-0.67	-0.77	-0.59	0.42
典型黑土 Mollisols	-0.08	-0.12	-1.22	0.53	-1.50	-0.53	-0.58	-0.40	0.51
白浆土 Lesslve	0.43	-0.14	-1.05	-0.04	-1.01	-0.72	0.17	-0.18	0.42
对照 Control	0.40	-0.13	-0.95	-0.29	0.15	-0.49	-0.46	-0.76	0.41
污染土壤占总量的百分比/%									
Proportion of contaminated soil in the total									
无污染 Non contamination	47.62	85.71	100	23.81	100	100	76.19	95.24	
轻-中污染 Light-moderate	47.62	14.29	0	76.19	0	0	23.81	4.76	
中污染 Moderate	4.76	0	0	0	0	0	0	0	

2.3 玉米籽粒中重金属含量

表 5 为研究区玉米籽粒中重金属含量统计特征值。玉米籽粒中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的平均含量分别为 0.164、0.036、0.698、2.196、0.004、0.358、0.295 和 25.23 mg·kg⁻¹，含量分布依次为 Zn > Cu > Cr > Ni > Pb > As > Cd > Hg。与国家食品卫生标准^[26-29]相比，玉米籽粒中 Pb 平均含量为国家标准的 1.48 倍，超标率为 81%，其他 7 种重金属的平均含量总体上均低于国家标准，但其中，Ni 和 As 分别有 14.3% 和 4.76% 的样品超过国家标准。表明长期猪粪便施用对研究区玉米籽粒重金属含量的影响较小。

表 5 玉米籽粒中重金属含量

Table 5 Heavy metal concentrations in maize seed

重金属 Heavy metals	平均值 Mean/	最小值 Min/	最大值 Max/	标准偏差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation/%	标准值 Standard	引文 References
	(mg·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)				
As	0.164	0.074	0.526	0.098	59.54	0.5	[25]
Cd	0.036	0.005	0.057	0.123	346.5	0.1	[25]
Cr	0.698	0.590	0.803	0.047	6.750	1.0	[25]
Cu	2.196	1.398	3.760	0.503	22.92	10	[26]
Hg	0.004	0.002	0.005	0.001	23.42	0.02	[25]
Ni	0.357	0.295	0.590	0.060	16.68	0.4	[27]
Pb	0.295	0.154	0.570	0.101	34.22	0.2	[25]
Zn	25.23	20.98	34.18	3.383	13.41	50	[28]

关于重金属在作物籽粒中的含量特征，国内其他地区也做了相关研究。与吉林省不同区域玉米籽粒中重金属含量相比，8 种重金属含量显著高于松花江流域和辽河流域的玉米籽粒^[30]；与长春地区玉米籽粒中的重金属相比，研究区玉米籽粒中 As 和 Zn 含量较高，Cu 和 Hg 含量较低，Cd、Cr、Ni 和 Pb 含量相差

不大^[31]。不同地区玉米籽粒中重金属含量存在一定的差异，与陕西省西安市^[32]、山东省潍坊市^[9]以及安徽省亳州^[33]等地区玉米籽粒中的重金属含量相比，研究区玉米籽粒中的重金属含量整体处于较高的水平。

2.4 玉米籽粒的重金属累积富集

玉米籽粒的富集系数可表征重金属从土壤向农作物可食部分的累积富集能力^[34]。如图 1 所示，重金属在玉米籽粒中的富集系数大小依次为 Zn (36.12%) > Hg (20.13%) > Cd (9.94%) > Cu (8.12%) > Cr (2.43%) > As (1.92%) > Ni (1.84%) > Pb (1.22%)。也就是说，Zn、Hg、Cd 和 Cu 的富集程度较高，Pb 的富集程度最低。Zn 和 Cu 是玉米生长所必需的元素，对玉米生长具有促进作用，容易被玉米植株的各个部位吸收，且最易在籽粒中富集^[9]。在玉米籽粒及土壤中 Hg 和 Cd 的含量最低，但玉米对 Hg 和 Cd 的富集系数处于较高的水平，这可能与 Hg 和 Cd 的有效态含量密切相关^[35]。相比于其他重金属，Pb 进入土壤后易与土壤有机物和矿物质相结合形成稳定的络合物或螯合物，阻碍了其向植物地上部位的迁移转运^[36]。另一方面，玉米植株对 Pb 的吸收存在较大的分异特征，玉米根系和秸秆对 Pb 的吸收能力分别是籽粒的 100 ~ 1 000 倍和 20 倍左右，玉米根系和秸秆吸收了大部分 Pb，从而导致籽粒对 Pb 的富集系数较小^[34]。该结果与吴荣等对施用有机肥玉米籽粒中重金属元素富集能力的研究结果相一致^[37]。不同农作物中也发现了相似的结果，叶必熊等通过不同畜禽粪便农用区小麦对不同重金迁移累积情况发现，小麦对 Cu 和 Zn 的富集能力较高，而对 Pb 和 As 的富集能力则较低^[38]。因此，在长期施用畜禽粪便的农田系统中，应严格控制畜禽饲料中重金属元素的添加，以及强化重金属在土壤中钝化作用，降低作物累积富集作用。

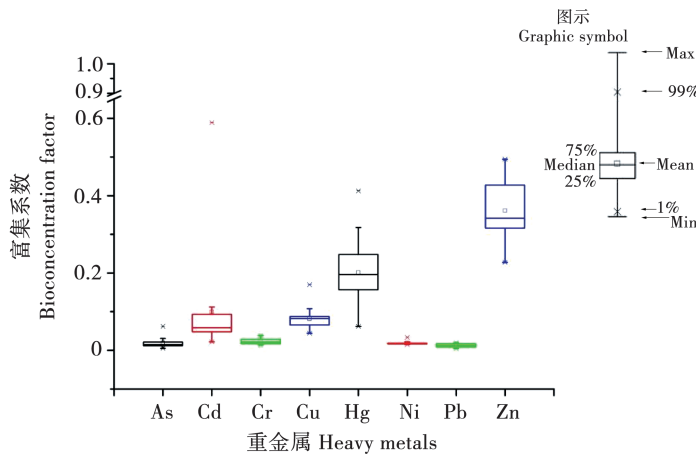


图 1 不同重金属的富集系数

Fig. 1 Bioconcentration factors of heavy metals

2.5 农作物摄入的健康风险评价

重金属通过摄食途径对成人和儿童产生的健康风险结果如表 6 所示，无论成人还是儿童，重金属通过玉米籽粒摄入造成的健康风险顺序均为：As > Cr > Pb > Zn > Cu > Ni > Hg > Cd。不同重金属成人的 HQ 平均值均小于 1，成人健康风险较低。As 的 HQ 平均值为 0.872，接近于 1，同时 As 的最大值达到了 2.801，并有 23.8% 的样点 HQ > 1，表明 As 对成人具有一定的健康风险。As 的儿童 HQ 平均值为 1.745，其余重金属 HQ 平均值均小于 1，表明 As 对儿童具有一定的健康风险。成人和儿童的 HI 平均值分别为 1.708 和 3.415，表明研究区的玉米对摄食人群具有一定的健康风险，其中 As 对 HI 的贡献最高，达到 51.1%。

8 种重金属中, As 对人体造成的健康风险最显著, 主要是因为 As 参考允许摄入量剂量为 $0.000\ 3\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 处于较低水平, 产生的健康风险较大。此外, 儿童的单一健康风险指数均高于成人, 表明重金属经玉米摄入对儿童造成的健康风险明显高于成人, 受重金属的危害更为强烈^[33]。Cu 和 Zn 的成人和儿童的健康 HQ 值显著小于 1, 不会对人群产生健康风险, 而且对 HI 的贡献率也较低, 仅为 5.14% 和 7.87%。因此, 畜禽粪便的长期施用对研究区玉米的摄食健康风险影响较小。

表 6 农田玉米籽粒对人群健康风险评估结果

Table 6 Results of health risk assessment of farmland corn kernels on population

重金属 Heavy metal	成人 Adults			儿童 Children			贡献率
	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	Contribution rate/%
As	0.397	2.801	0.872	0.793	5.603	1.745	51.1
Cd	0.008	0.091	0.018	0.015	0.183	0.035	1.03
Cr	0.314	0.428	0.372	0.629	0.856	0.744	21.8
Cu	0.056	0.150	0.088	0.112	0.300	0.176	5.14
Hg	0.009	0.027	0.020	0.019	0.054	0.040	1.18
Ni	0.024	0.047	0.029	0.047	0.094	0.057	1.67
Pb	0.070	0.937	0.175	0.141	1.875	0.350	10.24
Zn	0.112	0.182	0.134	0.223	0.364	0.269	7.87
HI			1.708			3.415	

3 结 论

- (1) 对于吉林省长期施用猪粪的玉米农田土壤中重金属的分布特征主要与土壤理化性质有关。研究区土壤整体上处于无污染水平, 但部分土壤样品中 As、Cd、Cu、Pb 和 Zn 等重金属处于轻 - 中度污染的水平, 且长期施用猪粪增加了土壤中 Cu 和 Zn 含量。
- (2) 长期施用猪粪下, 玉米籽粒中 Pb 平均含量超过国家食品卫生标准, Cu 和 Zn 平均含量远低于国家食品卫生标准, 表明长期畜禽粪便施用对研究区玉米籽粒的污染程度较小。玉米籽粒中 Zn、Hg、Cd 和 Cu 富集程度较高, Pb 富集程度最低。
- (3) 在猪粪施用下的玉米田上, 重金属通过摄食途径具有一定健康风险, As 是主要贡献者, 儿童的健康风险高于成人。Cu 和 Zn 健康风险指数较低, 表明畜禽粪便的长期施用对玉米的摄食健康风险影响较小。

参考文献 (References):

[1] ZHANG T, YANG Y H, XIE D T, Insights into the production potential and trends of China's rural biogas [J]. International Journal of Energy Research, 2015, 39 (8): 1068 - 1082.

[2] QIAN X, SUN W, GU J, et al. Variable effects of oxytetracycline on antibiotic resistance gene abundance and the bacterial community during aerobic composting of cow manure [J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 315: 61 - 69.

[3] 胡家晴, 王洋, 于锐, 等. 典型河源区畜禽粪便农田施用的环境承载力研究 [J]. 土壤与作物, 2021, 10 (1): 37 - 46.

HU J Q, WANG Y, YU R, et al. Environmental carrying capacity of livestock and poultry manure application to farmland in typical river source region [J]. Soils and Crops, 2021, 10 (1): 37 - 46.

[4] 中华人民共和国农业农村部. 吉林省畜禽养殖废弃物资源化利用成效显著 [EB/OL]. [2020 - 10 - 14]. http://www.moa.gov.cn/xw/qg/202010/t20201014_6354206.htm.
Ministry of Agricultural and Rural Affairs of the People's Republic of China. The resource utilization of livestock and poultry breeding waste in Ji-lin Province has achieved remarkable results [EB/OL]. [2020 - 10 - 14]. http://www.moa.gov.cn/xw/qg/202010/t20201014_6354206.htm.

[5] NELSON D W, SOMMERS L E. Total carbon, organic carbon, organic matter [M]. PAGE A L. Methods of soil analysis. Madison: American Society of Agronomy, 1982.

[6] 茹淑华, 徐万强, 侯利敏, 等. 连续施用有机肥后重金属在土壤 - 作物系统中的积累与迁移特征 [J]. 生态环境学报, 2019, 28 (10): 2070 - 2078.
RU S H, XU W Q, HOU L M, et al. Effects of continuous application of organic fertilizer on the accumulation and migration of heavy metals in soil - crop systems [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28 (10): 2070 - 2078.

[7] 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. Heavy metal pollution and cumulative effect of soil - crop systems around typical enterprises in Xiongan new district [J]. Environmental Science, 2021, 42 (12): 5977 - 5987.

[8] 李武江, 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.

[9] 姜冰, 董红志, 高宗军, 等. 土壤 - 玉米重金属富集迁移特征及秸秆还田 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (18): 7797 - 7805.
JIANG B, DONG H Z, GAO Z J, et al. Enrichment and migration characteristics of heavy metal in soil - maize system and discussion on straw returning [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21 (18): 7797 - 7805.

[10] 麻冰涓, 王海邻, 李小超, 等. 豫北典型农田作物中重金属污染状况及健康风险评价 [J]. 生态环境学报, 2014, 23 (8): 1351 - 1358.
MA B J, WANG H L, LI X C, et al. Pollution of heavy metals in typical crops of northern Henan Province and health risk assessment [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23 (8): 1351 - 1358.

[11] LI H H, CHEN L J, YU L, et al. Pollution characteristics and risk assessment of human exposure to oral bioaccessibility of heavy metals via urban street dusts from different functional areas in Chengdu, China [J]. Science of the Total Environment, 2017, 586: 1076 - 1084.

[12] 王世玉, 吴文勇, 刘菲, 等. 典型污灌区土壤与作物中重金属健康风险评估 [J]. 中国环境科学, 2018, 38 (4): 1550 - 1560.
WANG S Y, WU W Y, LIU F, et al. Assessment of human health risks of heavy metals in the typical sewage irrigation areas [J]. China Environmental Science, 2018, 38 (4): 1550 - 1560.

[13] MAN Y B, SUN X L, ZHAO Y G, et al. Health risk assessment of abandoned agricultural soils based on heavy metal contents in Hong Kong, the world's most populated city [J]. Environment International, 2010, 36 (6): 570 - 576.

[14] CUI Z W, WANG Y, ZHAO N, et al. Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in paddy soils of Yongshuyi irrigation area from Songhua River Basin, northeast China [J]. Chinese Geographical Science, 2018, 28 (5): 797 - 809.

[15] LI Z Y, MA Z W, VAN DER KUIJP T J, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2014, 468/469: 843 - 853.

[16] 吴曼, 徐明岗, 张文菊, 等. 土壤性质对单一及复合污染下外源镉稳定化过程的影响 [J]. 环境科学, 2012, 33 (7): 2503 - 2509.
WU M, XU M G, ZHANG W J, et al. Effects of soil properties on the stabilization process of cadmium in Cd alone and Cd - Pb contaminated soils [J]. Environmental Science, 2012, 33 (7): 2503 - 2509.

- [17] 岳建华. 长株潭城市群土壤 pH 与重金属污染的研究 [J]. 中国农学通报, 2012, 28 (2): 267–272.
- YUE J H. The correlation of heavy metal with pH in soils from Changsha – Zhuzhou – Xiangtan urban agglomeration [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28 (2): 267–272.
- [18] 王瑞, 魏源送. 畜禽粪便中残留四环素类抗生素和重金属的污染特征及其控制 [J]. 农业环境科学学报, 2013, 32 (9): 1705–1719.
- WANG R, WEI Y S. Pollution and control of tetracyclines and heavy metals residues in animal manure [J]. Journal of Agro – Environment Science, 2013, 32 (9): 1705–1719.
- [19] 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): GB 15618–2018 [S/OL]. (2018–08–01) [2022–04–18]. <https://www.doc88.com/p-98047366070279.html>.
- Ministry of Ecological Environment, State Administration for Market Regulation. Soil environmental quality – Risk control standard for soil contamination of agricultural land; GB 15618–2018 [S/OL]. (2018–08–01) [2022–04–18]. <https://www.doc88.com/p-98047366070279.html>.
- [20] 王飞, 邱凌, 沈玉君, 等. 华北地区饲料和畜禽粪便中重金属质量分数调查分析 [J]. 农业工程学报, 2015, 31 (5): 261–267.
- WANG F, QIU L, SHEN Y J, et al. Investigation and analysis of heavy metal contents from livestock feed and manure in North China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31 (5): 261–267.
- [21] 姜萍, 金盛杨, 郝秀珍, 等. 重金属在猪饲料 – 粪便 – 土壤 – 蔬菜中的分布特征研究 [J]. 农业环境科学学报, 2010, 29 (5): 942–947.
- JIANG P, JIN S Y, HAO X Z, et al. Distribution characteristics of heavy metals in feeds, pig manures, soils and vegetables [J]. Journal of Agro – Environment Science, 2010, 29 (5): 942–947.
- [22] 王美, 李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20 (2): 466–480.
- WANG M, LI S T. Heavy metals in fertilizers and effect of the fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20 (2): 466–480.
- [23] 陈景春, 易廷辉, 陈丽. 重庆市市售化肥重金属含量调查分析 [J]. 湖南农业科学, 2017 (6): 41–44.
- CHEN J C, YI T H, CHEN L. Investigation of heavy metal concentrations of commercial fertilizers in Chongqing [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2017 (6): 41–44.
- [24] 孙国峰, 盛婧, 张丽萍, 等. 基于稻麦轮作农田土壤锌累积的猪粪安全施用量 [J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23 (1): 174–180.
- SUN G F, SHENG J, ZHANG L P, et al. Safety dosage of pig manure based on zinc accumulation in rice and wheat rotated farmland [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23 (1): 174–180.
- [25] 孙文静. 内蒙古畜禽养殖场周边土壤重金属污染特征及评价 [J]. 环境监控与预警, 2020, 12 (4): 45–50.
- SUN W J. Characteristic and evaluation of soil pollution by heavy metal adjacent to the livestock and poultry feedlots in Inner Mongolia Autonomous Region [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2020, 12 (4): 45–50.
- [26] 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中污染物限量: GB 2762—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, China's Food and Drug Administration. National food safety standard – Limit of pollutants in food: GB 2762—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [27] 中华人民共和国卫生部. 食品中铜限量卫生标准: GB 15199–1994 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- Ministry of Health of the People's Republic of China. Tolerance limit of copper in foods: GB 15199–1994 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1994.
- [28] 杨惠芬. 食品卫生理化检验标准手册 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1998.

YANG H F. Manual of physical and chemical inspection standards for food hygiene [M]. Beijing: Standards Press of China, 1998.

[29] 中华人民共和国卫生部. 食品中锌限量卫生标准: GB 13106 – 1991 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1991.

Ministry of Health of the People's Republic of China. Tolerance limit of zinc in foods; GB 13106 – 1991 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1991.

[30] 余丹. 吉林黑土区耕地土壤重金属元素转化富集效率及其对耕地利用的制约 [D]. 长春: 吉林大学, 2019.

YU D. Biotransformation and bioaccumulation of soil heavy metals and their constraints on the cultivated land use in the black soil region of Jilin Province [D]. Changchun: Jilin University, 2019.

[31] 王宇, 李业东, 曹国军, 等. 长春地区土壤中重金属含量及其在玉米子粒中的积累规律 [J]. 玉米科学, 2008, 16 (2): 80 – 82 + 87.

WANG Y, LI Y D, CAO G J, et al. Content of heavy metals in soil and accumulation rule on maize grain in Changchun area [J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16 (2): 80 – 82 + 87.

[32] 费勇山, 刘佳, 安建博, 等. 西安市周边河流沿岸种植玉米中重金属污染调查 [J]. 职业与健康, 2018, 34 (12): 1643 – 1646.

FEI Y S, LIU J, AN J B, et al. Investigation of heavy metal pollution in maize growing along the surrounding rivers of Xi'an [J]. Occupation and Health, 2018, 34 (12): 1643 – 1646.

[33] 陈亚婷, 李家莹, 何情, 等. 涡北煤矿外围农田玉米重金属污染特征及健康风险评估 [J]. 环境化学, 2022, 41 (2): 526 – 535.

CHEN Y T, LI J Y, HE Q, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals from maize in the surrounding farmland of Guobei Coal Mine [J]. Environmental Chemistry, 2022, 41 (2): 526 – 535.

[34] 杜彩艳, 余小芬, 杜建磊, 等. 不同玉米品种对 Cd、Pb、As 积累与转运的差异研究 [J]. 生态环境学报, 2019, 28 (9): 1867 – 1875.

DU C Y, YU X F, DU J L, et al. Variety difference of Cd, Pb and As accumulation and translocation in different varieties of *Zea mays* [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28 (9): 1867 – 1875.

[35] 刘书江, 王敏, 高宗军, 等. 滕州矿区土壤与玉米籽粒重金属富集特征 [J]. 安徽农业科学, 2018, 46 (17): 137 – 140.

LIU S J, WANG M, GAO Z J, et al. Enrichment characteristics of soil and maize heavy metals in Tengzhou mining area [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018, 46 (17): 137 – 140.

[36] 王成尘, 田稳, 向萍, 等. 土壤 – 水稻/小麦重金属吸收机制与安全调控 [J]. 中国环境科学, 2022, 42 (2): 794 – 807.

WANG C C, TIAN W, XIANG P, et al. Mechanism of heavy metal uptake and transport in soil – rice/wheat system and regulation measures for safe production [J]. China Environmental Science, 2022, 42 (2): 794 – 807.

[37] 吴荣, 刘善江, 孙昊, 等. 长期化肥配施不同有机肥对土壤和玉米中重金属累积的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (11): 2010 – 2019.

WU R, LIU S J, SUN H, et al. Effects of long – term chemical fertilizer application with different organic fertilizers on accumulation of heavy metals in soil and maize [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26 (11): 2010 – 2019.

[38] 叶必雄, 刘圆, 虞江萍, 等. 畜禽粪便农用户土壤—小麦系统中重金属污染及迁移 [J]. 地理研究, 2013, 32 (4): 645 – 652.

YE B X, LIU Y, YU J P, et al. Heavy metal pollution and migration in soil – wheat system of different livestock manures agricultural areas [J]. Geographical Research, 2013, 32 (4): 645 – 652.