

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.01.12

引用格式: 康鹏宇,张勇,肖丙建,等. 山东沂南东部土壤-玉米系统重金属元素与其他元素间相互作用及其生物有效性研究[J]. 中国地质调查,2024,11(1): 105-113. (Kang P Y,Zhang Y,Xiao B J,et al. Study on the interaction between heavy metal elements and other elements and bioavailability in the soil-maize system in Eastern Yinan of Shandong Province [J]. Geological Survey of China,2024,11(1): 105-113.)

# 山东沂南东部土壤-玉米系统重金属元素与其他元素间相互作用及其生物有效性研究

康鹏宇<sup>1</sup>, 张勇<sup>1</sup>, 肖丙建<sup>1,2,3</sup>, 梁成<sup>1\*</sup>, 焦永鑫<sup>1</sup>, 王凯凯<sup>1</sup>

(1. 山东省第七地质矿产勘查院, 山东 临沂 276006; 2. 山东省金刚石成矿机理与探测重点实验室, 山东 临沂 276006; 3. “山东省金刚石成矿机理与探测”院士工作站, 山东 临沂 276006)

**摘要:** 在沂南县东部地区重金属元素高的背景状态下,为研究土壤-玉米系统中重金属元素和与人体健康关系密切的微量元素间的相互作用及其生物有效性,在研究区采集了50件玉米籽实及其根系土土壤样品。通过样品中重金属元素和微量元素含量分析,统计其含量及富集特征,探讨了玉米籽实及其根系土土壤中各元素间的相互关系。通过玉米根、茎、叶、籽实中重金属元素含量及根系土土壤中重金属元素形态分析,总结了玉米根、茎、叶、籽实以及根系土土壤中重金属元素的分布规律并对玉米籽实进行了安全性评价。结果显示:①各元素含量在玉米根系土土壤和玉米籽实中差异明显,玉米籽实中元素富集系数间多呈显著-极显著正相关;②玉米籽实中As、Ni、Se含量与土壤中元素含量多呈拮抗作用,玉米籽实中元素含量间多呈协同作用;③Cu、Zn、Cd、Hg主要富集于叶中,Cr、Pb、Ni、As主要富集于根中,除1件玉米籽实样品外,其他样品均符合绿色、无公害等相关标准,研究区玉米籽实安全性较好。研究成果可为农业高质量发展、土壤污染综合治理提供支撑。

**关键词:** 土壤-玉米系统; 重金属; 相互作用; 生物有效性; 山东沂南

**中图分类号:** P595; P632 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8706(2024)01-0105-09

## 0 引言

伴随着工业化和城市化的发展,土壤重金属污染问题也随之受到广泛关注<sup>[1-5]</sup>。重金属元素的分布、分配规律及其生物有效性研究已成为重金属污染研究的热点之一<sup>[6-9]</sup>。土壤-植物系统中土壤元素的化学形态、赋存状态和土壤环境决定其迁移性,反映土壤重金属污染程度以及对生态环境、人类健康的危害程度<sup>[10]</sup>。相关研究主要针对章丘大葱、沾化冬枣、黔产玄参等地理标志农产品<sup>[11-15]</sup>,针对大宗农产品(玉米、水稻、小麦)的研

究相对偏少。目前,部分学者针对水稻、小麦在相关方面做了基础性研究工作:冯海燕等<sup>[16]</sup>通过对水稻籽实进行分析研究,发现水稻籽实中重金属等元素富集系数差异较大,水稻籽实中重金属元素含量与土壤中部分元素含量之间存在着显著的相关关系;赵秀芳等<sup>[17]</sup>通过对小麦籽实进行分析研究,发现小麦籽实中重金属等元素富集系数之间多数表现为协同作用,小麦籽实中重金属等元素含量之间表现为协同或拮抗作用。

山东省沂南县为长三角地区重要的粮食供应基地,沂南县东部地区作为沂南县大宗农作物的主产区发挥着重要作用。同时,沂南县东部地区

收稿日期: 2023-04-26; 修订日期: 2023-10-20。

基金项目: 山东省财政基金项目山东省自然资源厅“山东省沂南县东部地区1:5万土地质量地球化学调查与评价(编号:鲁勘字(2019)42号)”与山东省第七地质矿产勘查院“山东省沂南县双堪镇耕地土地质量档案建设(编号:QDKY202205)”项目联合资助。

第一作者简介: 康鹏宇(1988—),男,高级工程师,主要从事农业地质调查与区域地质调查工作。Email: 1003967169@qq.com。

通信作者简介: 梁成(1982—),男,高级工程师,主要从事农业地质调查与区域地质调查工作。Email: 65416925@qq.com。

工矿业较为发达,土壤中 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn 重金属元素呈现不同程度的积累,土壤中 Hg 污染较严重,处于中污染或重污染状态,As、Cd 总体呈轻污染状态,Hg、Cd 为主要生态危害元素<sup>[18]</sup>。本文以研究区 50 套玉米根、茎、叶、籽实及其配套根系土土壤数据为基础,研究分析土壤-玉米系统中 As、Pb、Hg 等重金属元素和 B、F、Ge 等与人体健康关系密切的微量元素的含量特征、形态特征、富集规律和元素间相关关系,以期了解研究区大宗农产品重金属等元素的富集程度,对粮食产生安全威胁的程度,为当地政府部门粮食产业结构布局调整,食品安全监管提供基础数据,助力绿色农业发展。

# 1 材料与方 法

## 1.1 研究区概况

研究区位于山东省沂南县东部(铜井镇、沂南县城、大庄镇和砖埠镇及以东),面积约 785 km<sup>2</sup>。研究区处于暖温带季风区,属于半湿润大陆性气候。研究区地貌为低山丘陵,土壤类型包括棕壤、褐土、潮土等(图 1),成土母质为残坡积物母质、洪冲积物母质和冲积物母质,土地利用方式以耕地为主<sup>[19]</sup>。研究区农田土壤中 8 种重金属元素呈现不同程度的积累,Cd、Hg 含量明显超出国家农用地土壤污染风险筛选值<sup>[20]</sup>,超标率分别为 75.2% 和 44.6%<sup>[18]</sup>。

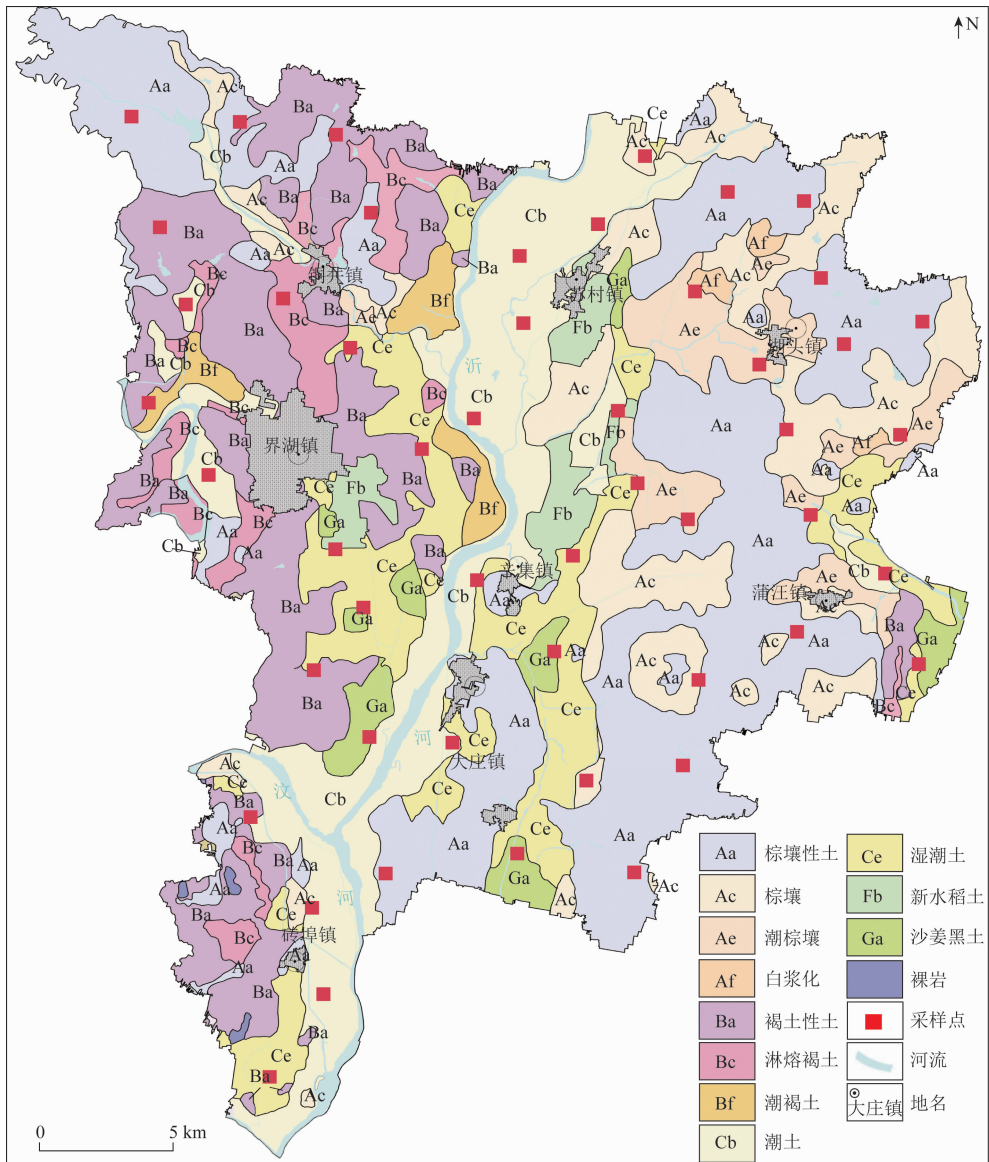


图 1 研究区玉米样品及其根系土采样点位

Fig. 1 Sampling points for maize and its root soil in the study area

### 1.2 实验材料

采集 50 套玉米根、茎、叶、籽实样品及配套的 0~20 cm 表层根系土土壤样品,采样密度为 1 套/15.7 km<sup>2</sup>,采样位置见图 1。

### 1.3 实验方法

本研究中土壤和植物样品采集时间为玉米成熟期。土壤样品采集耕作层土壤,去除地表杂物,自地表垂直向下 20 cm 连续均匀采集样品,5 点组合取样。植物样品在采样地块内随机选取多个植株,每株采集了其籽粒、茎叶、根系和根系土样品。土壤及植物样品经风干、磨碎、过筛后称其干重待分析测试。

本研究中土壤、植物样品分析测试均由山东省物化探勘查院岩矿测试中心完成。检测指标包括与环境质量评价相关的 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn 8 种重金属元素,以及与人体健康关系密切的微量元素 F、Ge、I、Se、B 和 Mo。对土壤样品开展了 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn 8 项重金属元素形态(残渣态、强有机结合态、铁锰氧化物结合态、碳酸盐结合态、腐殖酸结合态、离子交换态、水溶态 7 种形态)分析。样品分析测试方法: Cr、Ni、Cu、

Zn、Pb 采用 X-射线荧光光谱法; B 采用垂直电极交流电弧-发射光谱法; As、Se、Hg 采用氢化物发生-原子荧光光谱法; Mo、I、Ge、Cd 采用电感耦合等离子体质谱法; F 采用离子选择电极法。样品分析按照《DZ/T 0295—2016 土地质量地球化学评价规范》<sup>[21]</sup>技术规范测定。重复样合格率均大于 85%,外部标准控制样合格率均大于 90%,数据报出率为 100%,重复性检验样品合格率均高于 90%。

## 2 结果与讨论

### 2.1 元素含量及富集特征

通过 GeoIPASV3.1 化探专业版,统计玉米根系土土壤和玉米籽实中微量元素、重金属元素含量(表 1),各元素含量在玉米根系土土壤和玉米籽实中差异明显:根系土土壤中 Cr、Hg、I 变异系数较大,属于中等变异强度,说明 Cr、Hg、I 在根系土土壤中含量变化较大;玉米籽实中 I、Mo、B 变异系数较大,属于中等变异强度,说明 I、Mo、B 在玉米籽实中含量变化较大。

表 1 研究区玉米根系土土壤和玉米籽实中元素含量特征参数

Tab.1 Characteristic parameters for element content in maize root soil and seed in the study area

元素	玉米根系土土壤						玉米籽实					
	最大值	最小值	中位值	平均值	标准差	变异系数	最大值	最小值	中位值	平均值	标准差	变异系数
As	30.720	3.190	8.145	9.062	4.372	0.482	0.134	0.030	0.048	0.061	0.027	0.445
B	62.700	16.010	34.185	35.005	12.916	0.369	6.449	0.683	1.478	1.741	1.009	0.579
Cd	0.260	0.030	0.110	0.105	0.050	0.475	0.023	0.004	0.007	0.008	0.003	0.433
Cr	276.400	23.400	69.100	74.684	38.484	0.515	0.975	0.395	0.786	0.782	0.088	0.112
Cu	48.100	8.100	23.950	24.880	9.370	0.377	3.429	1.188	1.800	1.922	0.487	0.253
F	1 033.100	298.500	514.550	522.510	154.680	0.296	0.923	0.673	0.772	0.778	0.070	0.090
Ge	1.780	0.830	1.285	1.323	0.245	0.185	0.016	0.002	0.007	0.007	0.003	0.396
Hg	152.850	17.270	40.035	45.863	25.769	0.562	6.882	3.626	5.039	5.093	0.735	0.144
I	4.900	0.510	1.375	1.592	0.830	0.521	0.121	0.010	0.022	0.033	0.028	0.863
Mo	2.380	0.570	0.865	0.902	0.292	0.324	0.446	0.034	0.103	0.138	0.095	0.687
Ni	91.200	9.200	26.850	31.030	15.519	0.500	1.726	0.374	0.780	0.838	0.254	0.303
Pb	96.100	13.300	26.900	28.798	12.633	0.439	0.233	0.030	0.072	0.081	0.031	0.388
Se	0.410	0.090	0.160	0.171	0.056	0.329	0.063	0.018	0.031	0.030	0.008	0.276
Zn	103.600	17.500	58.650	56.000	19.255	0.344	28.507	9.572	17.490	17.883	4.045	0.226

注: Hg 单位为 10<sup>-9</sup>,其他元素单位为 10<sup>-6</sup>,变异系数为无量纲。

元素生物富集系数为元素在植物体中的含量与在植物生长环境中该元素含量之比<sup>[22-23]</sup>,表示

农作物从土壤中吸收元素的能力。从表 2 可以看出,在玉米籽实中各元素间富集系数差异明显,其

表 2 研究区玉米籽实中重金属元素和微量元素的富集系数  
 Tab.2 Enrichment coefficient of heavy metal elements and trace elements in maize seed in the study area

重金属元素	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
富集系数/%	0.84	9.69	1.23	8.94	13.75	3.22	0.31	38.07
微量元素	B	F	Ge	I	Mo	Se		
富集系数/%	5.55	0.16	0.56	2.63	15.97	19.13		

中 Zn 富集系数最大(38.07%),F 的富集系数最小(0.16%)。除了 Zn 富集系数大于 20% 外,B、I、Mo 等富集系数多介于 1% ~ 20% 之间,个别元素富集系数小于 1%。说明正常情况下玉米籽实从土壤中吸收元素的能力是有限的。

玉米籽实中重金属元素和微量元素的富集系数间呈显著-极显著正相关(表 3)。根据玉米籽实中

表 3 研究区玉米籽实中重元素元素和微量金属元素富集系数相关性统计

Tab.3 Correlation statistics for enrichment coefficients of heavy metal elements and trace elements in maize seed in the study area

元素	As	B	Cd	Cr	Cu	F	Ge	Hg	I	Mo	Ni	Pb	Se
B	0.375 **	1.000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cd	0.500 **	—	1.000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cr	0.438 **	0.407 **	0.473 **	1.000	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cu	0.359 *	0.480 **	0.610 **	0.757 **	1.000	—	—	—	—	—	—	—	—
F	0.586 **	—	0.712 **	0.516 **	0.622 **	1.000	—	—	—	—	—	—	—
Ge	—	0.359 *	0.317 *	0.678 **	0.561 **	0.334 *	1.000	—	—	—	—	—	—
Hg	0.452 **	0.374 **	0.474 **	—	0.422 **	0.387 **	0.380 **	1.000	—	—	—	—	—
I	0.443 **	—	—	—	—	0.328 *	—	—	1.000	—	—	—	—
Ni	0.564 **	0.414 **	0.688 **	0.728 **	0.781 **	0.854 **	0.470 **	0.368 **	0.331 *	—	1.000	—	—
Pb	—	0.500 **	0.339 *	0.535 **	0.446 **	0.312 *	0.501 **	—	—	0.314 *	0.368 **	1.000	—
Se	0.483 **	0.513 **	—	0.400 **	0.346 *	0.411 **	0.350 *	0.493 **	—	—	0.399 **	0.302 *	1.000
Zn	0.539 **	0.553 **	0.573 **	0.805 **	0.840 **	0.572 **	0.703 **	0.500 **	—	—	0.679 **	0.514 **	0.399 **

注：“\*\*”表示在 0.01 水平上显著相关；“\*”表示在 0.05 水平上显著相关；“—”表示未达到显著相关,未列出。

元素间富集系数相关性分析可知:玉米籽实中,As 与 F、Ni、Zn 呈极显著正相关,与 B、Cd、Cr、Cu、Hg、I、Se 呈显著正相关;玉米籽实中,Cd 与 Cu、F、Ni、Zn 极显著正相关,与 Cr、Ge、Hg、Pb 呈显著正相关。说明玉米籽实中重金属元素富集过程多伴随其他重金属元素和微量元素的富集,且表现为协同作用。

2.2 元素间相互作用

2.2.1 玉米籽实中元素与土壤中元素相关性

玉米籽实中的重金属元素和微量元素与土壤

中元素含量的相互作用研究结果<sup>[24-27]</sup>(表 4)表明,玉米籽实中 As、Ni、Se 含量与土壤中元素含量之间的关系多数表现为显著负相关,呈拮抗作用。玉米籽实中 As 与土壤中 As、B、F、I 呈显著负相关;玉米籽实中 Ni 与土壤中 Cr、Ni 呈显著正相关,与土壤中 B 呈显著负相关;玉米籽实中 Se 与土壤中 Cr、Ge 呈显著负相关。土壤中 As、B、F、I 可抑制玉米籽实中 As 的吸收,表现为拮抗作用,提高土壤中相应元素的含量可减轻重金属元素 As 对玉米籽实

表 4 研究区玉米籽实中元素含量与土壤中元素含量的相关性统计

Tab.4 Correlation statistics between element content in maize seed and element content in root soil in the study area

籽实中元素	土壤中元素						
	As	B	Cr	F	I	Ni	Ge
As	-0.327 *	-0.351 *	—	-0.338 *	-0.385 **	—	—
Ni	—	-0.363 **	0.451 **	—	—	0.364 **	—
Se	—	—	-0.326 *	—	—	—	-0.303 *

注：“\*\*”表示在 0.01 水平上显著相关；“\*”表示在 0.05 水平上显著相关；“—”为未达到显著性水平,未列出。

的影响;土壤中 Cr、Ni 可促进玉米籽实对 Ni 的吸收,表现为协同作用,土壤中 Cr、Ni 含量较高时可加重重金属元素 Ni 对玉米籽实的影响,而土壤中 B 含量较高时可减轻重金属元素 Ni 对玉米籽实的影响;土壤中 Cr、Ge 可抑制玉米籽实对 Se 的吸收,表现为拮抗作用,不利于玉米籽实富硒。

2.2.2 玉米籽实中元素含量间相关性

植物是一个复杂的有机整体,其中某一元素的改变会影响其他元素的吸收,最终影响植物生长发育和质量<sup>[28]</sup>。玉米籽实中元素含量间相关性分析

(表 5)表明,玉米籽实中部分元素含量之间的关系多数表现为显著正相关,呈协同作用。如: Cr 与 Cu 共存时,籽实中 Cu 含量增大,将促进 Cr 的吸收; Cu、F 与 Ge 共存时,籽实中 Ge 含量增大,将促进 Cu 的吸收,抑制 F 的吸收; Ge 与 Mo 共存时,籽实中 Mo 含量增大,将促进 Ge 的吸收; Mo 与 Ni 共存时,籽实中 Ni 含量增大,将抑制 Mo 的吸收; B、Cu 与 Pb 共存时,籽实中 Pb 含量增大,将促进 B、Cu 的吸收; Cu、Ge、Mo、Pb 与 Zn 共存时,籽实中 Zn 含量增大,将促进 Cu、Ge、Mo、Pb 的吸收。

表 5 研究区玉米籽实中元素含量间相关性统计

Tab.5 Correlation statistics among element content in maize seed in the study area

元素	B	Cr	Cu	F	Ge	Mo	Pb
Cu	—	0.385 **	1.000	—	—	—	—
Ge	—	—	0.328 *	-0.353 *	1.000	—	—
Mo	—	—	—	—	0.358 *	1.000	—
Ni	—	—	—	—	—	-0.450 **	—
Pb	0.357 *	—	0.318 *	—	—	—	1.000
Zn	—	—	0.510 **	—	0.480 **	0.398 **	0.341 *

注:“\*\*\*”表示在 0.01 水平上显著相关;“\*”表示在 0.05 水平上显著相关;“—”表示未达到显著相关,未列出。

2.3 重金属元素形态特征、分布特征及安全性评价

2.3.1 根系土壤中重金属形态特征

对研究区根系土壤中重金属元素赋存形态以及对生物影响程度进行探讨(图 2),结果表明研究区不同种类重金属元素多以稳定态(残渣态、强有机结合态、铁锰氧化物结合态、腐殖酸结合态、碳酸盐结合态)赋存于土壤中。Cr、As、Ni 以稳定态为主,一般不易被植物吸收;Hg、Cd、Cu 重金属元素迁移能力(活化态,包括离子交换态、水溶态)相对较强。

研究区根系土壤中 Hg、Cd 活化态相对偏高,这与研究区存在 Hg、Cd 污染的特征较为一致。活化态的重金属元素对土壤环境变化最敏感,最易被植物所吸收,对生物危害最大。由于土壤中 Hg 活化态含量最高,将土壤中 Hg 水溶态含量、离子交换态含量与土壤中元素全量进行相关分析,表明大部分土壤中元素全量与土壤中 Hg 水溶态含量和离子交换态含量呈负相关,土壤中 Mo 可促进土壤中 Hg 水溶态活化,土壤中 I 和有机质可促进土壤中 Hg 离子交换态活化。因此,在满足玉米对 Mo、I 和有机质等摄入的前提下,适量降低土壤中 Mo、I 和有机质的含量,可降低土壤中 Hg、Cd 重金属元素

的生物有效性。

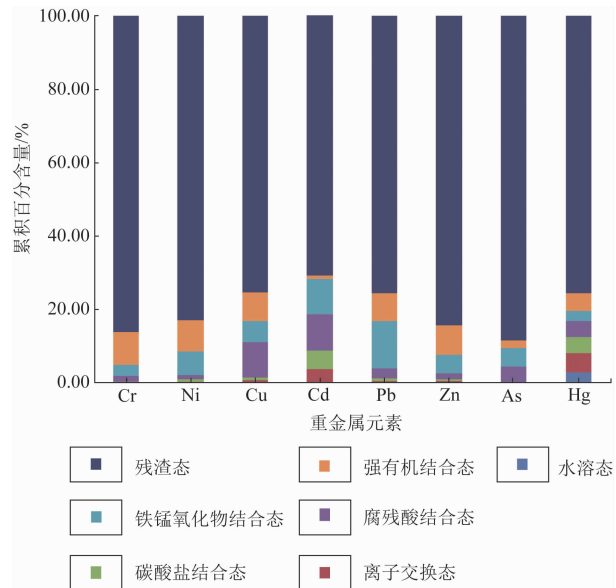


图 2 研究区根系土壤中重金属元素赋存形态所占比例  
Fig.2 Occurrence forms proportion of heavy metal elements in the root soil of the study area

2.3.2 玉米根、茎、叶、籽实中重金属元素分布特征

对本次研究中 50 套玉米样品分析结果进行统计(图 3),可以看出,8 项重金属元素在玉米根、茎、叶及籽实分配中略有差异。



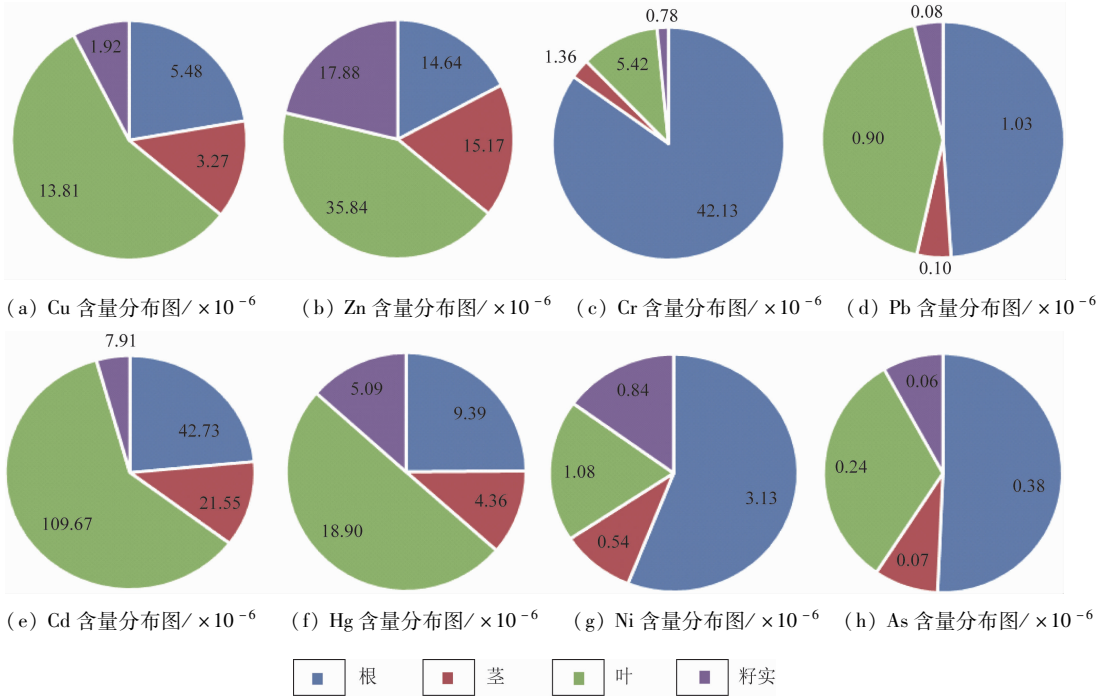


图 3 研究区玉米重金属元素含量分布

Fig. 3 Distribution of heavy metal element content in maize in the study area

研究区玉米中重金属元素 Cu 和 Cd 的分布、分配规律相似, Cr、Pb、As 的分布、分配规律相似。重金属元素 Cu、Zn、Cd、Hg 易在玉米叶中富集, 重金属元素 Cr、Pb、Ni、As 易在玉米根中富集。研究区重金属元素主要富集于玉米叶或根中, 在籽实中富集程度偏低。

陈飞对矿业废弃地复垦土壤-作物中镉的迁移规律的研究<sup>[29]</sup>与本研究相似, 玉米的不同器官中 Cd 浓度由大到小为叶、根、茎、籽实, 玉米把重金属元素 Cd 都迁移到叶片中, 而真正可食用的部分含量相对较低, 降低了对生物的伤害。玉米把重金属元素都富集在根或迁移到叶中, 同样降低了重金属元素在籽实中的含量, 有利于玉米籽实的成长发育, 同时降低了人类对重金属元素的吸收。

### 2.3.3 玉米质量等级及安全性评价

由于研究区土壤中 Hg、Cd 为主要生态危害元素, 在局部形成高风险区, 本次对玉米安全性进行了评价, 查明土壤中重金属元素对农产品的影响。参照《GB 2762—2022 食品安全国家标准食品中污染物限量》<sup>[30]</sup>以及《NY/T 418—2014 绿色食品 玉米及玉米粉》<sup>[31]</sup>(表 6)进行评价, 根据统计结果, 除 1 件玉米籽实中 Pb 含量为  $0.233 \times 10^{-6}$  外, 其他样品均符合绿色、无公害等相关标准, 研究区玉米籽实安全性

较好, 土壤中 Hg、Cd 未向玉米籽实中明显迁移。

表 6 玉米安全性评价标准

Tab. 6 Maize safety evaluation standard

元素	As/ $\times 10^{-6}$	Pb/ $\times 10^{-6}$	Cd/ $\times 10^{-6}$	Cr/ $\times 10^{-6}$	Hg/ $\times 10^{-6}$	参考标准
玉米	0.5	0.2	0.1	1	0.02	参考文献[30]
玉米及玉米粉	$\leq 0.5$	$\leq 0.2$	$\leq 0.1$	/	$\leq 0.01$	参考文献[31]

## 3 结论

(1) 沂南县东部地区各元素含量在玉米根系土壤和玉米籽实中差异明显, 根系土土壤中 Cr、Hg、I 含量变化较大, 玉米籽实中 I、Mo、B 含量变化较大。玉米籽实中重金属元素和微量元素的富集系数间多数呈显著-极显著正相关。

(2) 沂南县东部地区土壤-玉米系统中重金属元素和微量元素之间存在协同或拮抗作用: 玉米籽实中 As、Ni、Se 含量与土壤中元素含量多呈拮抗作用(玉米籽实中 As 含量分别与土壤中 As、B、F、I 含量呈拮抗作用, 玉米籽实中 Ni 含量分别与土壤中 Cr、Ni 含量呈协同作用、与土壤中 B 含量呈拮抗作用, 玉米籽实中 Se 含量分别与土壤中 Cr、Ge 含量呈

拮抗作用);玉米籽实中元素含量间多呈协同作用。

(3)重金属元素在玉米根、茎、叶、籽实中富集程度不同且呈现一定规律。Cu、Zn、Cd、Hg 主要富集于叶中,Cr、Pb、Ni、As 主要富集于根中。研究区玉米重金属元素主要集中于叶或根中,在籽实中富集程度较低。对玉米籽实进行质量等级及安全性评价,除 1 件玉米籽实中 Pb 超标外,其他样品均符合绿色、无公害等相关标准,表明虽然沂南县东部局部土壤中 Hg、Cd 等重金属污染较严重,但玉米籽实安全性较好,土壤重金属元素未向农作物中明显迁移。研究可为研究区绿色农业发展提供理论支撑,助力地区现代农业经济发展。

(4)由于土壤-玉米系统中元素间相关性不仅受元素间的相互作用影响还受元素含量、有效性等多因素影响,本文仅针对研究区内土壤-玉米系统中元素间表现的相关性进行论述,具体机理尚需进一步研究。

## 参考文献 (References):

- [1] 李福燕,李许明,吴鹏飞,等. 海南省农用地土壤重金属含量与土壤有机质及 pH 的相关性[J]. 土壤,2009,41(1):49-53.  
Li F Y, Li X M, Wu P F, et al. Correlation between heavy metal pollution and basic properties of agricultural soils in Hainan Province[J]. Soils, 2009, 41(1): 49-53.
- [2] 马骁,陈智贤,林联桂,等. 福建浦城县耕地土壤元素地球化学评价[J]. 中国地质调查,2020,7(2):89-94.  
Ma X, Chen Z X, Lin L G, et al. Geochemical evaluation of cultivated soil elements in Pucheng County of Fujian Province[J]. Geological Survey of China, 2020, 7(2): 89-94.
- [3] 张晓磊,杨源祯,阎琨,等. 广西珍珠湾红树林湿地沉积物重金属分布及评价[J]. 中国地质调查,2022,9(5):104-110.  
Zhang X L, Yang Y Z, Yan K, et al. Distribution and evaluation of heavy metals in sediments of Zhenzhu Bay mangrove wetland in Guangxi[J]. Geological Survey of China, 2022, 9(5): 104-110.
- [4] 胡文. 土壤-植物系统中重金属的生物有效性及其影响因素的研究[D]. 北京:北京林业大学,2008.  
Hu W. Heavy Metal Bio-Availability and its Affecting Factors in Soil-Plant System[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008.
- [5] 李甜田. 湿地理化性质对土壤中 Pb、Cd 生物有效性的影响研究[D]. 长春:东北师范大学,2019.  
Li T T. Study on the Effects of Wetland Physical and Chemical Properties on the Bioavailability of Pb and Cd in Soil[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2019.
- [6] 赵云杰,马智杰,张晓霞,等. 土壤-植物系统中重金属迁移性的影响因素及其生物有效性评价方法[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2015,13(3):177-183.  
Zhao Y J, Ma Z J, Zhang X X, et al. Influencing factors of heavy metal mobility and evaluating methods of heavy metal bioavailability in soil-plant system[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015, 13(3): 177-183.
- [7] 许海钊. 广西硒镉高背景区土壤-稻米系统中硒镉相互关系及其生物有效性研究[D]. 南宁:广西大学,2021.  
Xu H Z. Evaluation of the Relationship and Bioavailability of Selenium and Cadmium in Soil-Rice System in High Geochemical Background Area in Guangxi[D]. Nanning: Guangxi University, 2021.
- [8] Hao Y P, Miao X Y, Liu H W, et al. The variation of heavy metals bioavailability in sediments of Liujiang River Basin, SW China associated to their speciations and environmental fluctuations, a field study in typical karstic river[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(8): 3986.
- [9] 章明奎,方利平,周翠. 污染土壤重金属的生物有效性和移动性评价:四种方法比较[J]. 应用生态学报,2006,17(8):1501-1504.  
Zhang M K, Fang L P, Zhou C. Evaluation of heavy metals bioavailability and mobility in polluted soils: A comparison of four methods[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(8): 1501-1504.
- [10] 余飞,贾中民,李武斌,等. 镉在土壤-水稻系统的迁移累积及其影响因素[J]. 三峡生态环境监测,2018,3(1):66-74.  
Yu F, Jia Z M, Li W B, et al. Translocation and accumulation of germanium in paddy soil-rice plant system[J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2018, 3(1): 66-74.
- [11] 丁薪. 黄精品质与产地土壤环境质量的相关性研究[D]. 北京:北京化工大学,2021.  
Ding X. Studies on the Correlation Between the Qualities of Polygonatum Sibiricum and the Soil Environment[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2021.
- [12] 高宗军,王敏,庞绪贵,等. 章丘大葱品质与微量元素的关系[J]. 安徽农业科学,2011,39(3):1336-1338.  
Gao Z J, Wang M, Pang X G, et al. Relationship between the quality of Zhangqiu onion and trace elements[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(3): 1336-1338.
- [13] 王敏,高宗军,庞绪贵,等. 沾化冬枣品质与微量元素的关系[J]. 安徽农业科学,2010,38(36):20674-20676,20679.  
Wang M, Gao Z J, Pang X G, et al. Relationship between quality of Zizyphus jujuba mill and trace element[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(36): 20674-20676, 20679.
- [14] 张家春,张珍明,刘盈盈,等. 黔产玄参土壤微量元素及与玄参品质相关性研究[J]. 江苏农业科学,2018,46(20):157-160.  
Zhang J C, Zhang Z M, Liu Y Y, et al. Study on trace elements in soil and correlation with quality of Scrophularia ningpoensis in Guizhou Province [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(20): 157-160.

- [15] Fadel D, Assaad N, Hachem A, et al. Heavy metals interaction in soil – plant system of Carmagnola cannabis strain[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2020, 12(7): 163 – 171.
- [16] 冯海艳, 杨忠芳, 杨志斌. 土壤 – 水稻系统中重金属元素与其他元素之间的相互作用[J]. *地质通报*, 2007, 26(11): 1429 – 1434.
- Feng H Y, Yang Z F, Yang Z B. Interaction among heavy metals and other elements in the soil – paddy rice system[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(11): 1429 – 1434.
- [17] 赵秀芳, 王艺璇, 张永帅, 等. 山东安丘地区土壤 – 小麦系统重金属等元素间的相互作用[J]. *现代地质*, 2020, 34(5): 936 – 944.
- Zhao X F, Wang Y X, Zhang Y S, et al. Interaction of heavy metals and other elements in soil – wheat system in Anqiu area, Shandong Province[J]. *Geoscience*, 2020, 34(5): 936 – 944.
- [18] 刘同, 刘传朋, 邓俊, 等. 山东省沂南县东部土壤重金属生态健康风险评价[J]. *中国地质*, 2022, 49(5): 1497 – 1508.
- Liu T, Liu C P, Deng J, et al. Ecological health risk assessment of soil heavy metals in Eastern Yinan County, Shandong Province[J]. *Geology in China*, 2022, 49(5): 1497 – 1508.
- [19] 康鹏宇, 刘传朋, 梁成, 等. 山东省沂南县东部地区 1:5 万土地质量地球化学调查与评价报告[R]. 临沂: 山东省地质矿产勘查开发局第七地质大队, 2021: 27 – 30.
- Kang P Y, Liu C P, Liang C, et al. 1:50 000 Geochemical Survey and Evaluation Report on Land Quality in the Eastern Area of Yinan County, Shandong Province [R]. Linyi: The 7th Geological Brigade of Shandong Provincial Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, 2021: 27 – 30.
- [20] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 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]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, State Administration of Market Supervision and Administration of the People's Republic of China. GB 15618—2018 Soil Environmental Quality Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land (Trial Implementation) [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [21] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0295—2016 土地质量地球化学评价规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0295—2016 Determination of land Quality Geochemical Evaluation [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [22] 齐国亮, 苏雪玲, 王俊, 等. 宁夏枸杞主产区土壤和果实中稀土元素含量及其相关性[J]. *南方农业学报*, 2014, 45(7): 1206 – 1210.
- Qi G L, Su X L, Wang J, et al. Contents of rare earth elements in soils and fruits of *Lycium barbarum* main producing area in Ningxia and their relationship[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2014, 45(7): 1206 – 1210.
- [23] 胡家琴, 张珍明, 张清海, 等. 贵州乌王茶产地土壤与茶叶中微量元素含量的相关性[J]. *贵州农业科学*, 2014, 42(12): 79 – 83.
- Hu J Q, Zhang Z M, Zhang Q H, et al. Correlation between soil and microelement content in Niaowang tea producing area in Guizhou [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2014, 42(12): 79 – 83.
- [24] 刘海燕, 黄彩梅, 周盛勇, 等. 茶园土壤及与茶叶中微量元素锌硒含量相关性的研究[J]. *广西植物*, 2015, 35(6): 868 – 874, 941.
- Liu H Y, Huang C M, Zhou S Y, et al. Correlation of zinc and selenium contents in tea and the planting soil [J]. *Guihaia*, 2015, 35(6): 868 – 874, 941.
- [25] 袁得清, 高鹏锦, 阮毅男, 等. 麦冬及其土壤中微量元素含量的相关性分析[J]. *乐山师范学院学报*, 2020, 35(4): 33 – 39.
- Yuan D Q, Gao P J, Ruan Y N, et al. Correlation analysis of trace elements in ophiopogon japonicus and its growing soil [J]. *Journal of Leshan Normal University*, 2020, 35(4): 33 – 39.
- [26] 李晓, 潘孝忠, 李博颀, 等. 澄迈县水稻土养分特征及其相关性研究[J]. *热带农业科学*, 2020, 40(1): 21 – 27.
- Li X, Pan X Z, Li B Z, et al. Characteristics and correlation of paddy soil nutrients in Chengmai county [J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2020, 40(1): 21 – 27.
- [27] 于建军, 叶贤文, 董高峰, 等. 土壤与烤烟中微量元素含量的相关性[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(6): 1127 – 1134.
- Yu J J, Ye X W, Dong G F, et al. Relationships of medium and micro elements contents between soil and flue – cured tobacco [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(6): 1127 – 1134.
- [28] Shalaby A M. Responses of arbuscular mycorrhizal fungal spores isolated from heavy metal – polluted and unpolluted soil to Zn, Cd, Pb and their interactions in vitro [J]. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 2003, 6(16): 1416 – 1422.
- [29] 陈飞. 矿业废弃地复垦土壤 – 作物中镉迁移和演变特征[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.
- Chen F. Migration and Evolution Characteristics of Cadmium in Soil Crop of Mining Wasteland Reclamation [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2020.
- [30] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 2762—2022 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration of Market Supervision and Administration of the People's Republic of China. GB 2762—2022 National Food Safety Standards – Limits for Pollutants in Food [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [31] 中华人民共和国农业部. NY/T 418—2014 绿色食品 玉米及玉米粉[S]. 北京: 中国农业出版社, 2015. —Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. NY/T 418—2014 Green Food – Maize and Maize Flour [S]. Beijing: China Agriculture Press, 2015.



## Study on the interaction between heavy metal elements and other elements and bioavailability in the soil – maize system in Eastern Yinan of Shandong Province

KANG Pengyu<sup>1</sup>, ZHANG Yong<sup>1</sup>, XIAO Bingjian<sup>1,2,3</sup>, LIANG Cheng<sup>1</sup>, JIAO Yongxin<sup>1</sup>, WANG Kaikai<sup>1</sup>  
(1. No. 7 Geological and Mineral Exploration Institute, Shandong Linyi 276006, China; 2. Shandong Key Laboratory of Diamond Metallogenesis and Exploration, Shandong Linyi 276006, China; 3. Academician Workstation of “Shandong Diamond Metallogenesis and Exploration”, Shandong Linyi 276006, China)

**Abstract:** In the background of high levels of heavy metal elements in Eastern Yinan, the authors collected 50 maize seed and root soil samples to investigate the interaction and bioavailability of heavy metal elements and trace elements closely related to human health in the soil – maize system. The content and enrichment characteristics of heavy metal elements and trace elements in the samples were statistically analyzed, and the interrelationship among the elements in maize seed and the root soil was explored through content analysis. The distribution patterns of heavy metal elements in maize roots, stems, leaves, seeds, and root soil were summarized and the safety of maize seeds was evaluated, by analyzing the content of heavy metal elements in corn roots, stems, leaves, seeds, and the forms of heavy metal elements in root soil. The results show that a significant difference of element content exists between maize root soil and maize seeds, and the enrichment coefficients of elements in maize seeds show significant – extremely significant positive correlation. As, Ni, Se in maize seeds have an antagonistic effect on the element content in the soil, while there is a synergistic effect among the elements in maize seeds. Cu, Zn, Cd, and Hg are mainly enriched in leaves, while heavy metals Cr, Pb, Ni, and As are mainly enriched in roots. All the samples meet the relevant standards of green and pollution – free except one maize seed sample, indicating the good safety level of maize seeds in the study area. This study could provide geological support for high – quality agricultural development and comprehensive soil pollution control.

**Keywords:** soil – maize system; heavy metal; interaction; bioavailability; Yinan of Shandong Province  
(责任编辑: 刘丹)