

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240930014

引用格式: 王丽萍, 甄国强, 姚振, 等. 青海地区低镉积累作物品种筛选研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(2): 309-317.

WANG LP, ZHEN GQ, YAO Z, *et al.* Screening research on low cadmium accumulating crop varieties in Qinghai Region [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(2): 309-317. (in Chinese with English abstract).

## 青海地区低镉积累作物品种筛选研究

王丽萍<sup>1</sup>, 甄国强<sup>2</sup>, 姚振<sup>3</sup>, 谢园君<sup>1</sup>, 肖明<sup>4\*</sup>

(1. 青海大学农牧学院, 西宁 810016; 2. 西宁市湟中区农产品质量安全检查中心, 西宁 811600;  
3. 青海省第五地质勘查院, 西宁 810003; 4. 青海省农林科学院农业农村部农产品质量安全风险评估实验室, 西宁 810016)

**摘要:** **目的** 筛选出适合青海地区种植的重金属 Cd 低积累作物品种并评价其农产品安全性。**方法** 通过田间实验, 在重金属污染耕地种植青稞、油菜和蚕豆等 9 种作物, 分析不同作物根部、植株、籽粒及相对应土壤中 Cd 元素含量。不同作物样品经石墨炉消解后用电感耦合等离子体发射光谱(inductively coupled plasma atomic emission spectrometer, ICP-OES)测定 Cd 含量。通过富集系数法对作物各组织器官的富集能力进行分析, 利用标靶危险系数法(target hazard quotient, THQ)对作物籽粒 Cd 元素的非致癌健康风险进行评价。**结果** 青稞和小麦土壤 Cd 含量超标, 所有作物籽粒 Cd 含量符合国家标准; 小麦根部与植株的 Cd 富集能力均低于其余作物, 作物籽粒对土壤 Cd 的富集能力最低的是燕麦和小麦; 成人因摄入 6 种作物可食部位中 Cd 不存在健康风险, 而儿童因摄入青稞和马铃薯可食部位中 Cd 存在健康风险。**结论** 油菜和燕麦是适合当地种植的一种 Cd 低积累型作物, 可以保证当地农田的安全利用。因此, 本研究可为青海地区筛选低 Cd 积累的作物品种并将其大规模应用于受污染耕地提供科学依据。

**关键词:** 土壤; 低 Cd 积累; 品种筛选; 污染评价

### Screening research on low cadmium accumulating crop varieties in Qinghai Region

WANG Li-Ping<sup>1</sup>, ZHEN Guo-Qiang<sup>2</sup>, YAO Zhen<sup>3</sup>, XIE Yuan-Jun<sup>1</sup>, XIAO Ming<sup>4\*</sup>

(1. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Huangzhong District Agricultural Machinery Extension Station, Xining 811600, China; 3. Qinghai Fifth Geological Survey Institute, Xining 810003, China; 4. Laboratory of Agricultural Product Quality and Safety Risk Assessment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Qinghai Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Xining 810016, China)

**ABSTRACT: Objective** To screen the crop varieties with low accumulation of heavy metal Cd suitable for cultivation in Qinghai and evaluate of their agricultural product safety. **Methods** Through field experiments, 9 crops, including barley, oilseed rape and broad bean, were planted in heavy metal-contaminated arable land in a field trial to analyze the Cd content in the roots, plants, seeds and corresponding soils of different crops. Cd content of

收稿日期: 2024-09-30

基金项目: 西宁市湟中区受污染耕地安全利用示范项目(2022-04)

第一作者: 王丽萍(1998—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农产品质量与安全。E-mail: 1012681899@qq.com

\*通信作者: 肖明(1971—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量安全风险评估。E-mail: mhmdxia@163.com

different crop samples was measured by inductively coupled plasma atomic emission spectrometer (ICP-OES) after digestion in a graphite furnace. The enrichment capacity of each tissue and organ of the crop was analyzed by the enrichment coefficient method, and the non-carcinogenic health risk of Cd in crop seeds was evaluated by the target hazard quotient (THQ) method. **Results** The soil Cd content of barley and wheat exceeded the standard, but the seed Cd content of all crops met the national standard; the Cd enrichment capacity of wheat roots and plants was lower than that of the other crops, and the lowest soil Cd enrichment capacity of crop seeds was found in oats and wheat; there was no health risk for adults due to the intake of Cd from the edible parts of the 6 kinds of crops, and there was a health risk for children due to the intake of Cd from the edible parts of barley and potatoes. **Conclusion** Oilseed rape and oats is a kind of Cd low-accumulating crop suitable for local cultivation, which can ensure the safe utilization of local farmland. Therefore, this study can provide a scientific basis for screening crop varieties with low Cd accumulation and applying them on a large scale to polluted croplands in Qinghai.

**KEY WORDS:** soil; low Cd accumulation; variety screening; contamination evaluation

## 0 引言

粮食是人们日常饮食的重要组成部分,也是我国重要的经济作物,粮食作物是谷类、豆类和薯类的统称,其富含营养物质主要包括蛋白质、维生素、膳食纤维、脂肪、淀粉等,而农田污染造成的粮食安全问题是当今世界面临的重要挑战之一。工业化和人类活动导致大量有害物质释放并积累在环境和土壤中<sup>[1]</sup>,最终富集到粮食中对人类健康造成不可逆转的危害<sup>[2-4]</sup>。Cd 是国际公认的全球性环境污染物质,国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)将其认定为 I 类致癌物<sup>[5]</sup>。Cd 具有毒性较大和难降解的特点,其流入农田会导致作物光合性能下降、代谢紊乱、营养品质下降等<sup>[6-7]</sup>。研究表明,因土壤 Cd 含量过高而导致作物籽粒中 Cd 超标时,将直接降低作物籽粒中蛋白质含量<sup>[8]</sup>。赖灯妮等<sup>[9]</sup>研究发现,食用受重金属污染的果蔬可能引起慢性中毒,导致出现呼吸系统疾病、肾功能障碍、心脏疾病、红细胞增多症、骨折、记忆力衰退、哮喘和癌症等健康问题。赵丽娟<sup>[10]</sup>发现,Cd 作用下,作物的能量代谢会发生变化,不仅会使乳酸含量显著增加,还会导致氮代谢、有机酸和氨基酸代谢异常及叶绿素合成受阻,从而降低农作物的产量和品质。包成龙等<sup>[11]</sup>通过研究重金属对枸杞营养品质影响,发现重金属会使枸杞的花青素、多糖和甜菜碱合成受阻。由此可见,重金属会对作物生长、生理代谢和营养品质等产生不良影响。相关研究者已经通过水稻<sup>[12]</sup>、小麦<sup>[13]</sup>、玉米<sup>[14]</sup>等作物开展了大量重金属低累积品种筛选研究。例如,利用转基因技术开发谷物中 Cd 积累量低的水稻品种;从 72 个小麦品种中筛选出稳定的低 Cd 中高微量营养元素小麦品种;通过不同玉米品种籽粒对 Cd 吸收能力的差异,筛选出籽粒低富集的玉米品种。

为保障粮食安全生产,种植重金属低积累作物品种并实现“边生产边修复”已成为迫切任务<sup>[15]</sup>。低积累作物品

种的筛选是一个复杂而关键的过程,需要考虑作物对污染物的吸收能力和积累能力等因素。当下,研究人员正在积极探索重金属低积累作物品种筛选技术,以提高农产品安全生产的可行性<sup>[16]</sup>。其中作物对重金属富集能力的相关研究备受关注<sup>[17]</sup>,艾金华等<sup>[18]</sup>在 Cd 污染耕地种植不同品种小麦,筛选出低 Cd 累富集品种西农 979。张彦威等<sup>[19]</sup>针对滨州和济南 120 个不同品种大豆进行田间实验,首次筛选出适合受 Cd、Cr 和 Pb 等重金属污染耕地上安全种植的大豆品种。针对不同作物对重金属富集特性的研究较多<sup>[20-21]</sup>,但对不同作物各组织器官对 Cd 的低积累筛选研究还相对较少。作物不同组织器官之间重金属积累量可能有很大不同,一些组织可以充当储存场所,而另一些组织则作为吸收屏障。评估作物可食部位中重金属污染风险的关键是了解重金属积累中这些组织特异性差异<sup>[22]</sup>。王秋红等<sup>[23]</sup>对多个品种小麦 Cd 吸收差异进行比较,并初步筛选出对 Cd 富集能力低的小麦品种,大田研究结果也证实,部分低积累品种小麦可食部位中 Cd 含量均远低于国家限量标准,具有较高的推广价值<sup>[24-25]</sup>。此外,陈小华等<sup>[26]</sup>认为,不同品种作物对生态适栽区域也有不同的需求,这让许多重金属富集能力低的作物品种具有很强的地域性。因此,为保障耕地安全利用和农产品安全生产有必要在特定污染区域筛选出适宜的重金属低积累型作物品种。

青海省湟中区境内气候适宜,土壤肥沃,适合种植油菜、春小麦等粮食作物,是青海地区重要的粮食种植区和粮食贸易基地。本研究结合该地区气候条件和土壤性质以及区域农牧业发展的实际性,通过重金属低积累作物筛选技术,筛选出区域重金属低积累的田间实验作物类型和品种,并对所有作物根、植株、籽粒及其相对应的土壤进行重金属测定,并通过富集系数法(bio-concentration factor, BCF)分析作物不同组织器官对重金属 Cd 的富集情况及农产品安全性,为解决 Cd 污染问题及保障国家粮食安全生产提供实践依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试剂与仪器

#### 1.1.1 试剂

高氯酸、氢氟酸、硝酸、过氧化氢(优级纯, 国药集团化学试剂有限公司); 7种重金属(As、Cd、Cr、Ni、Pb、Cu和Zn)混合标准溶液(1000 g/mL, 国家有色金属及电子材料分析测试中心); 土壤成分分析标准物质 GBW07551 (GSS-60)(纯度 99.99%, 地球物理地球化学勘察研究所)。

#### 1.1.2 仪器与设备

Dena-Mini 石墨消解仪(美国 Thomas Cain 公司); ICPE-9000 电感耦合等离子体发射光谱仪(日本岛津公司); WDP-450 振荡培养箱(上海安亭科学仪器有限公司); F4 消解管(深圳市白鳍豚生物科技有限公司); H1850R 离心机(长沙高新技术产业开发区湘仪离心机仪器有限公司), ZG-TP203 分析天平(感量: 0.0001 g, 武义朱恒电子有限公司)。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 样品采集

以青海某工业园区及其附近耕地为样本, 根据 NY/T 789—2004《农药残留分析样品的采样方法》和 NY/T 395—2012《农用地土壤环境质量监测技术规范》, 采用对角线采样法采集耕层(深度为 20 cm)土壤, 并协同采集每个采样点相对应的植株样品。每种作物共采集 9 个样品, 9 种作物加空白样品共 90 件样品, 记录装袋, 与此同时做好采样记录并带回实验室测定分析。

#### 1.2.2 样品预处理

##### (1) 土壤样品预处理

采集到的土壤样本被送往实验室自然晾干, 利用四分法取样, 然后用研钵研磨, 粗磨用 20 目尼龙筛, 细磨分别过 60 目筛和 100 目筛, 并储存在贴有标签的自封袋中。60 目用于检测土壤理化指标, 100 目用于测定土壤中重金属<sup>[27]</sup>。

##### (2) 作物样品预处理

作物样品处理中避免金属用具, 挑出发绿、腐烂、破损的样品后, 用自来水冲洗干净, 再用蒸馏水润洗 3~5 次, 用吸水纸擦干称重, 记录鲜重。用陶瓷刀将作物按根、植株、可食用部位切片后装入网袋中, 在 105 °C 下杀青 30 min, 然后在 75 °C 下干燥至恒重。9 种作物和空白按部位分割后共 400 个样品, 研磨过 100 目筛并储存在贴有标签的自封袋中<sup>[28]</sup>。

#### 1.2.3 样品消解

##### (1) 土壤样品消解

称 0.1 g(精确到 0.0001 g)土样于消解管, 加 1 mL 蒸馏水, 再加 8 mL 硝酸、2 mL 氢氟酸、1.5 mL 高氯酸, 置于石墨炉后加盖消解(初始温度 130 °C, 30 min; 升温后 180 °C, 180 min), 未消解完全时需再加 1~2 mL 硝酸。待样

品溶液变为淡黄色时, 开盖赶酸至淡黄色胶状物时取出消解管, 消解完成。冷却定容至 25 mL<sup>[29]</sup>, 实验重复 3 次。

##### (2) 作物样品消解

分别称取不同作物的根、植株、籽粒样品各 0.2 g(精确到 0.0001 g)于消解管中, 加入 8 mL 硝酸和 2 mL 过氧化氢, 置于石墨炉后加盖消解(初始温度 30 °C, 30 min; 升温后 180 °C, 120 min)<sup>[30]</sup>, 未消解完全时需再加 1~2 mL 过氧化氢。待样品溶液颜色变为白色或浅黄色时胶状物时消解完成。冷却定容至 25 mL, 同时做 3 组平行另加空白实验。

#### 1.2.4 重金属含量测定

##### (1) 重金属标准系列溶液的配制

用 1% 硝酸溶液将混合标准溶液稀释到质量浓度为 0、0.001、0.002、0.005、0.010、0.025、0.050、0.075、0.100、0.200、0.400、0.600、0.800 和 1.000 mg/L 的标准系列。

##### (2) 样品重金属含量的测定

将已消解好的 9 种作物各组织器官(根、植株、籽粒)及其相对应的土壤样品消解液在电感耦合等离子体发射光谱仪上进行 Cd 元素的测定。根据标准曲线计算样品中 Cd 含量。

#### 1.2.5 土壤 pH 的测定方法

参照 LY/T 1239—1999《森林土壤 pH 值的测定》, 水土比为 2.5:1 (V:m), 静置 30 min 用 pH 计测定。

### 1.3 重金属质量评价标准

土壤 Cd 质量评价以 GB 15618—2018《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》中土壤污染筛选值和管控值为参考, 当土壤中 Cd 含量不高于 4.00 mg/kg 时, 应当加强土壤环境监测和农产品协同监测, 原则上应当采取农艺调控、替代种植等安全利用措施; 不同作物可食部位中 Cd 的具体限量值以 NY 861—2004《粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品中铅、铬、镉、汞、硒、砷、铜、锌等八种元素限量》和 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》为参考, 植物性饲料原料中 Cd 的限量值以 GB 13078—2017《饲料卫生标准》为参考, 限量要求见表 1。

表 1 不同农作物及土壤中重金属 Cd 限量值  
Table 1 Limit values of cadmium heavy metals in different crops and soils

作物名称	Cd/(mg/kg)
青稞	0.10
燕麦	0.10
小麦	0.10
蚕豆	0.20
油菜	0.50
马铃薯	0.20
土壤风险筛选值	0.60
土壤风险管制值	4.00
植物性饲料原料	1.00

## 1.4 重金属质量评价方法

### 1.4.1 富集系数

生物富集系数是某种重金属在作物不同组织器官中的含量与其所生长的土壤环境中该重金属含量的比值,反映农作物不同组织器官对某种重金属的富集能力<sup>[31]</sup>。其计算公式见(1):

$$BCF/\% = \frac{C_{vi}}{C_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中: BCF 表示不同作物对土壤重金属 Cd 的富集因子, %;  $C_{vi}$  表示作物不同组织器官中重金属 Cd 的测量值, mg/kg;  $C_i$  表示不同作物相对应土壤中重金属 Cd 的测量值, mg/kg。

### 1.4.2 不同作物重金属健康风险评价方法

农作物影响人类健康的唯一暴露途径为摄食,不存在接触或呼吸暴露造成的风险。因此,作物重金属对暴露人群健康风险评价方法采用了与土壤重金属健康风险评价方法一致的由美国环保署(United States Environmental Protection Agency, USEPA)提出的经口摄入暴露模型,又称靶危害系数法(target hazard quotient, THQ)法<sup>[32]</sup>。通过作物摄入重金属的非致癌风险表征公式见(2):

$$THQ_i = \frac{E_F \times E_D \times F_{IR} \times C_i}{RfD_i \times W_{AB} \times T_A} \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中:  $THQ_i$  表示作物中重金属经口摄入造成的非致癌健康风险系数;  $RfD_i$  表示 Cd 口服参考剂量,  $1 \times 10^{-3}$  mg/(kg·d);  $E_F$  表示人体暴露频率, 365 d/a;  $E_D$  表示人体暴露时间, 儿童和成人分别为: 6、70 年;  $W_{AB}$  表示平均体重, 成人和儿童平均体重分别为 55.9 kg、32.7 kg;  $F_{IR}$  表示粮食摄入量, 成人和儿童人平均每天摄入量分别为 0.225 kg/d、0.293 kg/d;  $T_A$  表示非致癌性平均暴露时间,  $365 \times 70$  d;  $C_i$  表示作物重金属  $i$  浓度, mg/kg。

当  $THQ \leq 1$  时,表明该地区生产的粮食经摄入不会对人类健康构成风险;当  $THQ > 1$  时,表明该地区生产的粮食经摄入会对人类健康构成风险<sup>[33]</sup>。

## 1.5 数据处理

实验重复 3 次,数据用 Microsoft Excel 2010 进行整理和统计,结果以平均值±标准偏差表示,用 SPSS 21.0 对数

据进行描述性统计分析和相关性分析,利用 Origin 2018 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤重金属 Cd 含量描述性统计

研究区 9 种作物及空白土壤样品共 90 份,不同作物土壤中重金属 Cd 含量的测定结果见表 2。由表 2 可知,不同作物相对应土壤的 Cd 含量平均值由高到低表现为:小麦>青稞>蚕豆>燕麦>马铃薯>混播>油菜>藜麦>高粱>毛苕子,除青稞和小麦相对应土壤的 Cd 平均含量超过风险管制值外,其余 7 种作物和空白相对应的土壤中 Cd 平均含量介于土壤风险筛选值(0.6 mg/kg)和土壤风险管制值(4.0 mg/kg)之间,可进行耕地安全利用措施,如作物筛选等,后续也应加强土壤环境监测和农产品协同检测,同时不同作物土壤 Cd 含量均高于其土壤背景值。不同作物相对应土壤的 pH 均在 8.60 以上,呈碱性,符合该地区碱性土壤的特点,其中蚕豆和油菜种植地的土壤 pH 最大。另外,变异系数能反映研究区土壤重金属含量的空间分布情况,变异系数越大,说明研究区土壤重金属 Cd 含量的空间分布相对离散越高<sup>[34]</sup>。不同作物土壤中,藜麦土壤和毛苕子土壤 Cd 的变异系数小于 10%,为弱变异,说明作物土壤说明其受到人类活动影响不大。其余 7 种作物土壤 Cd 的变异系数介于 10%~100%之间,为中等变异。

### 2.2 不同作物各组织器官重金属 Cd 含量描述性统计

研究区不同作物根部、植株和籽粒中 Cd 含量的测定结果见表 3。根据作物主要用途以及地区传统分类,将燕麦、毛苕子、高粱划分为饲料作物。不同作物根部 Cd 含量平均值由高到低表现为:燕麦>青稞>蚕豆>混播>油菜>马铃薯>藜麦>小麦>高粱>毛苕子,其中饲料作物燕麦、毛苕子、高粱根部 Cd 平均含量超过饲料中限量值(1 mg/kg),因此不能作为饲料使用;不同作物植株 Cd 含量由高到低表现为:燕麦>马铃薯>高粱>混播>油菜>青稞>蚕豆>毛苕子>小麦>藜麦,其中饲料作物毛苕子、高粱的植株 Cd 平均含量低于相关标准,可以作为饲料原料使用;不同作物

表 2 不同土壤中 Cd 含量描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of Cd content in different soils

名称	最大值/(mg/kg)	最小值/(mg/kg)	平均值±标准差/(mg/kg)	变异系数/%	土壤背景值/(mg/kg)	pH
青稞	5.96	0.72	4.37±1.47	33.59	0.38	8.61
燕麦	5.16	3.02	3.96±0.71	17.90	0.42	8.63
小麦	7.32	3.27	5.71±1.15	20.10	0.45	8.65
蚕豆	5.32	0.35	3.97±1.45	36.59	0.32	8.70
油菜	4.23	2.25	3.37±0.59	17.54	0.28	8.70
马铃薯	6.47	2.34	3.52±1.20	34.22	0.32	8.64
藜麦	3.16	2.61	2.85±0.19	6.76	0.24	8.63
毛苕子	3.21	2.62	2.80±0.18	6.52	0.27	8.67
高粱	4.28	2.01	2.84±0.85	29.94	0.24	8.62
混播	4.81	2.37	3.46±0.72	20.84	0.29	8.61

表 3 不同作物各组织器官 Cd 含量描述性统计  
Table 3 Descriptive statistics of Cd content in various tissues and organs of different crops

组织器官	名称	最大值/(mg/kg)	最小值/(mg/kg)	平均值/(mg/kg)	变异系数/%
根部	青稞	3.29	2.59	3.00±1.47	8.20
	燕麦	3.99	2.92	3.25±0.32	9.80
	小麦	2.11	1.27	1.72±0.26	15.23
	蚕豆	2.96	2.05	2.59±0.32	12.50
	油菜	2.61	1.65	2.11±0.33	15.62
	马铃薯	3.10	1.15	1.93±0.55	28.29
	藜麦	2.10	1.01	1.79±0.33	18.64
	毛苕子	1.92	1.17	1.39±0.23	16.43
	高粱	1.94	1.12	1.46±0.21	14.30
	混播	3.09	2.00	2.51±0.33	13.07
	植株	青稞	1.22	0.14	0.47±0.33
燕麦		3.52	0.22	1.02±0.61	99.74
小麦		0.67	0.11	0.42±0.21	50.50
蚕豆		0.91	0.22	0.45±0.21	46.08
油菜		1.47	0.16	0.50±0.40	80.00
马铃薯		1.05	0.25	0.65±0.24	37.33
藜麦		0.79	0.09	0.32±0.22	69.21
毛苕子		1.00	0.19	0.43±0.24	56.61
高粱		1.07	0.24	0.60±0.30	50.34
混播		0.92	0.20	0.52±0.23	45.31
籽粒		青稞	0.23	0.11	0.09±0.06
	燕麦	0.05	0.02	0.06±0.01	37.40
	小麦	0.26	0.06	0.04±0.01	25.00
	蚕豆	0.24	0.02	0.09±0.07	75.50
	油菜	0.08	0.01	0.04±0.03	73.61
	马铃薯	0.05	0.02	0.08±0.01	33.20
	混播	0.05	0.02	0.06±0.01	29.17

籽粒 Cd 含量由高到低表现为: 青稞=蚕豆>马铃薯>燕麦=混播>油菜=小麦。5 种粮食作物籽粒中 Cd 含量平均不超过食品中污染物限量值, 饲料作物燕麦中 Cd 也低于相关标准限量值, 其中粮食作物油菜籽除了生产食用油外, 其饼粕还可作为蛋白质饲料。由于环境、气候、温度等多因素的影响, 藜麦、毛苕子和高粱在收获季节并未如期长出籽粒。所有作物不同组织器官的 Cd 平均含量表现: 根部>植株>籽粒, 这与李乐乐等<sup>[5]</sup>的研究结果相一致。除青稞和燕麦根部外其余作物根部 Cd 的变异系数大于 10%, 处于中等变异; 所有作物植株和籽粒 Cd 的变异系数介于 10%~100%, 为中等变异, 说明作物各组织器官中重金属 Cd 受人类活动影响较大。

### 2.3 不同作物各组织器官重金属 Cd 的富集系数

研究区不同作物根部、植株和籽粒对土壤中重金属 Cd 的富集情况如图所示。图 1 中, 不同作物根部对土壤中 Cd 的富集能力由高到低排序为: 蚕豆(1.24)>青稞(0.97)>燕麦(0.84)>混播(0.76)>油菜(0.65)>藜麦(0.63)>马铃薯(0.59)>高粱(0.54)>毛苕子(0.50)>小麦(0.32), 其中粮食小麦根部对土壤中重金属 Cd 的富集能力最低, 其次是饲料

作物毛苕子和高粱。有研究表明, 根系的生理活性、形态、根表氧化膜以及内部的重金属运输方式等都会导致作物对 Cd 的吸收有所差异, 因此根系对作物吸收重金属有直接的影响<sup>[35]</sup>; 不同作物植株对土壤中 Cd 的富集能力由高到低为: 蚕豆(0.38)>燕麦(0.28)>高粱(0.21)>马铃薯(0.20)>混播(0.16)>青稞(0.15) ≥ 油菜(0.15) ≥ 毛苕子(0.15)>藜麦(0.11)>小麦(0.08), 其中粮食作物蚕豆植株对土壤重金属 Cd 的吸收能力最强, 粮食作物小麦植株对其吸收能力最弱、饲料作物藜麦植株对 Cd 的吸收最弱。

由图 1 可知, 不同作物籽粒对土壤中 Cd 的富集能力由高到低为: 马铃薯(0.056)>蚕豆(0.045)>青稞(0.032)>油菜(0.011)>混播(0.010)>小麦(0.009)>燕麦(0.007), 其中粮食作物马铃薯和蚕豆籽粒对土壤中重金属 Cd 的富集能力最强, 粮食作物小麦籽粒对 Cd 的富集能力最低, 油菜次之; 饲料作物燕麦对 Cd 的富集能力低于粮食作物小麦, 可能由于这些作物的营养成分和基因型的差异造成富集能力的不同; 所有作物对不同组织器官的富集系数均表现为: 根系>植株>籽粒, 其中蚕豆植株的 Cd 含量是籽粒的 7.6 倍, 这与邵晓庆等<sup>[36]</sup>研究结果一致。

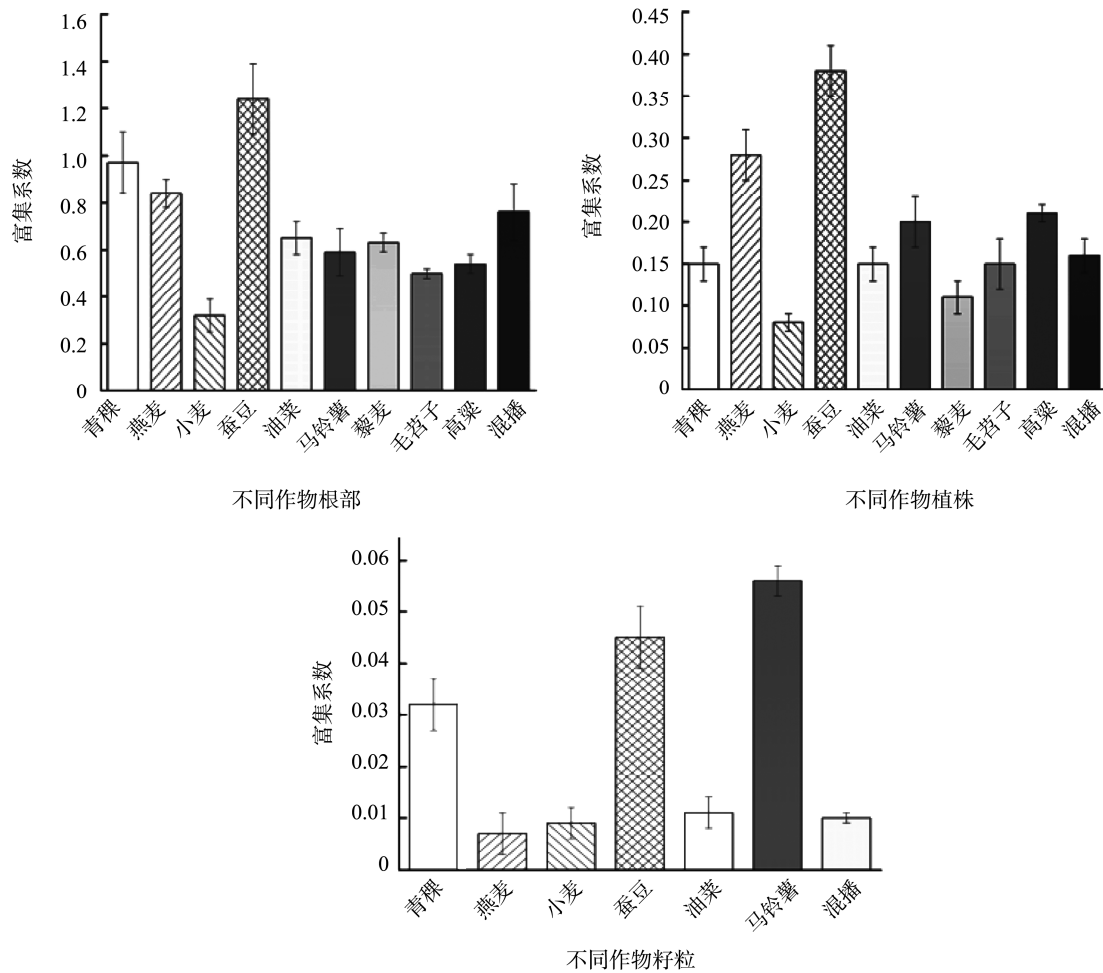


图 1 不同作物根部、植株和籽粒对土壤 Cd 的富集情况  
Fig.1 Enrichment of soil Cd by roots, plants and seeds of different crops

## 2.4 研究区不同作物 Cd 含量的影响因素

### 2.4.1 土壤化学性质对不同作物籽粒重金属 Cd 含量的影响

选取 6 种不同作物的 Cd 富集因子分别作因变量, 以不同作物相对应土壤的 pH(X)为自变量进行多元逐步回归分析, 结果见表 4。青稞、小麦、蚕豆籽粒 Cd 含量与土壤 pH 之间呈显著负相关( $P < 0.05$ ), 标准化系数分别为 -0.440、-0.297、-0.123; 燕麦和马铃薯籽粒 Cd 含量与土壤 pH 之间呈显著正相关( $P < 0.05$ ), 标准化系数分别为 0.336、0.439。表明作物籽粒 Cd 含量还受到土壤酸碱性的不同程度影响<sup>[37]</sup>, 土壤 pH 对不同作物籽粒中重金属 Cd 含量的影响大小为: 青稞 > 马铃薯 > 燕麦 > 小麦 > 蚕豆。

### 2.4.2 土壤养分对不同作物籽粒重金属 Cd 含量的影响

选取 6 种不同土壤的重金属 Cd 含量分别作因变量, 以不同作物相对应土壤的有机质含量( $X_1$ )、硝态氮含量( $X_2$ )、铵态氮含量( $X_3$ )、有效磷含量( $X_4$ )、阳离子交换量( $X_5$ )分别作自变量进行最优多元逐步回归分析, 结果见表 5。比较标准化系数可知, 土壤有机质含量对油菜籽粒 Cd

的影响最大, 青稞籽粒次之, 且有机质含量与油菜籽粒 Cd 含量均呈显著负相关( $P < 0.05$ ), 与青稞籽粒中 Cd 含量呈极显著负相关( $P < 0.01$ )。研究表明, 有机质是影响重金属在土壤和植物之间转移的关键因素之一<sup>[38-40]</sup>, 重金属易与有机质中的大分子有机物形成具有强稳定性的螯合物, 以此降低作物对重金属的富集能力<sup>[41-42]</sup>; 土壤硝态氮含量对蚕豆籽粒 Cd 的影响最大, 燕麦次之, 对小麦籽粒 Cd 含量最小,

表 4 不同农作物籽粒 Cd 含量与土壤化学性质之间的相关性( $n=54$ )  
Table 4 Correlation between Cd content in seeds of different agricultural commodities and soil chemical properties ( $n=54$ )

土壤类型	逐步回归方程	标准化系数	F	P	$R_{Adj}^2$
青稞	$Y=3.548-0.401X$	-0.440	1.681	<0.05	0.194
燕麦	$Y=-0.584+0.074X$	0.336	0.892	<0.05	0.113
小麦	$Y=3.455-0.395X$	-0.297	0.678	<0.05	0.088
蚕豆	$Y=1.186-0.126X$	-0.123	0.108	<0.05	0.015
油菜	—	—	—	—	—
马铃薯	$Y=-2.292+0.274X$	0.439	1.668	<0.05	0.192

注: —标志两者没有相关性, 表 5 同。

表 5 不同农作物籽粒 Cd 含量与土壤化学性质之间的相关性(n=54)  
Table 5 Correlation between Cd content in seeds of different agricultural commodities and soil chemical properties (n=54)

土壤类型	逐步回归方程	标准化系数					F	P	R <sub>Adj</sub> <sup>2</sup>
		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>			
青稞	Y=-0.541-0.026X <sub>1</sub>	-0.891	—	—	—	—	1.348	<0.01	0.692
燕麦	Y=0.071-0.014X <sub>2</sub> -0.043X <sub>4</sub>	—	-1.321	—	-0.711	—	1.013	<0.05	0.628
小麦	Y=1.224-0.010X <sub>2</sub> -0.037X <sub>3</sub>	—	-0.920	1.099	—	—	0.667	<0.05	0.526
蚕豆	Y=-0.282+0.044X <sub>2</sub> -0.029X <sub>3</sub>	—	1.457	-1.703	—	—	0.397	<0.05	0.398
油菜	Y=-0.672-0.010X <sub>1</sub>	-0.997	—	—	—	—	0.283	<0.05	0.320

其标准化系数分别为 1.457、-1.321、-0.920, 且硝态氮含量与小麦籽粒和燕麦籽粒 Cd 含量呈负相关, 与蚕豆籽粒 Cd 含量均呈负相关。土壤有效磷含量对燕麦土壤 Cd 的影响最大, 且有效磷含量与燕麦土壤 Cd 含量呈负相关。土壤铵态氮含量对蚕豆籽粒 Cd 的影响最大, 小麦次之, 铵态氮含量与蚕豆籽粒 Cd 含量呈负相关, 与小麦和籽粒 Cd 含量均呈正相关。

### 2.5 不同作物重金属 Cd 安全风险评价分析

研究区由不同作物可食部位膳食摄入的重金属 Cd 对儿童和成人的非致癌健康风险系数平均水平见图 2。由图 2 可知, 成人和儿童通过饮食摄入不同作物可食部位导致的

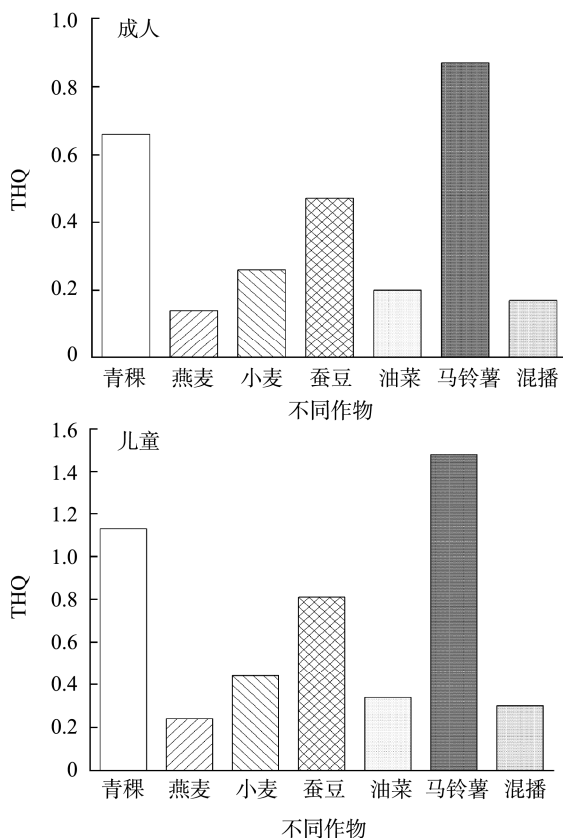


图 2 作物可食部位重金属 Cd 对儿童和成人致癌风险系数对比  
Fig.2 Comparison of carcinogenic risk coefficients of heavy metal Cd in edible parts of crops for children and adults

Cd 非致癌健康风险趋势表现为: 儿童>成人, 这与张田等<sup>[43]</sup>研究结果一致。青稞和马铃薯重金属 Cd 对儿童的 THQ>1, 分别为 1.13 和 1.48, 其余作物对儿童的的 THQ<1, 其中燕麦和混播的 THQ 最小, 油菜次之, 说明在本研究区所选取的土壤条件下, 所种植作物中 Cd 对成人的非致癌健康风险性要小于儿童; 此外, 不同作物可食部位重金属 Cd 对成人的 THQ 均小于 1, 其中燕麦、混播和油菜的的非致癌健康风险系数 THQ 较低, 分别为 0.14、0.20, 说明这 2 种作物中重金属 Cd 对成人造成健康风险的可能性最低, 因此, 在重金属轻中度污染地区可优先种植粮食作物油菜和饲料作物燕麦这种重金属 Cd 低积累作物。小麦和混播的的非致癌健康风险系数 THQ 相较于其他作物较低, 可进一步加强其土壤环境监测和农产品协同检测, 再确定是否剔除小麦和混播为 Cd 低积累型作物。

### 3 结论与讨论

本研究对青海某工业园区周边耕地作物进行 Cd 含量研究, 结果表明, 所种植作物可食部位中 Cd 平均含量符合食品中污染物限量值的标准。本研究以 6 种不同作物可食部位为研究对象, 发现饲料作物燕麦和粮食作物油菜可食部位对 Cd 的富集能力低于其余作物, 且同一作物的不同组织器官对 Cd 富集能力也存在差异, 但均表现为根部>植株>籽粒。由此可见, 作物的植株和根部相比于食用部分具有更强的富集能力, 造成这种现象的可能原因是作物地上部分组织器官(植株和籽粒)对 Cd 的再分配能力影响可食部位中 Cd 含量。因此, 从富集能力看, 饲料作物燕麦和粮食作物油菜具有 Cd 低积累型农作物的优势, 可以保证耕地的安全利用, 适当提高农业经济效益和农民收入。

研究发现, 重金属积累量低的作物品种其根部组织器官会释放有机物和少量的 H<sup>+</sup>, 使土壤中重金属的活化能力降低, 从而减少可食部位从植株和根部富集重金属的可能性, 保障农产品安全性<sup>[44]</sup>。本研究区周边种植小麦、蚕豆、油菜和青稞等经济作物, 这些作物地上部拥有大量秸秆和茎叶类副产物。重金属积累量低的作物可确保其副产物重金属含量也相对较低, 将这些副产物作为饲料原料应

用于草食动物生产,能够促进青海省耕地资源合理利用及畜牧业发展。此外,不同品种作物除马铃薯和青稞外,多数作物对儿童和成人健康造成的影响不明显,但从农产品安全角度出发,本研究所筛选的低 Cd 积累作物还需进一步的长期验证,以满足污染耕地安全利用的需要。

工业园区耕地土壤 pH 在 8.60 以上,呈碱性,符合该地区碱性土壤的标准。土壤 pH 对不同作物籽粒中 Cd 含量影响最大的是青稞且呈负相关;土壤有机质含量与油菜籽粒 Cd 含量呈负相关,土壤硝态氮含量和有效磷含量与燕麦籽粒 Cd 含量呈负相关,这与 IM 等<sup>[45]</sup>研究结果一致,可能原因是 Cd 与有效磷可以在土壤中产生络合作用,使作物对重金属的富集能力降低。由此可见,除了种植环境、气候和农艺措施会影响作物中 Cd 含量外,土壤理化性质也会以复杂多样的方式影响作物对土壤 Cd 的吸收和富集。

### 参考文献

- [1] MOHAMMAD ALIM, HOSSAIN D, AL-IMRAN, *et al.* Environmental pollution with heavy metals: A public health concern [Z]. 2021.
- [2] WANG H, ZHANG H, XU RK. Heavy metal pollution characteristics and health evaluation of farmland soil in a gold mine slag area of Luoyang in China [J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2021, 14(5): 213–221.
- [3] ZHANG GX, SHAO LZ, LI FL, *et al.* Bioaccessibility and health risk assessment of Pb and Cd in urban dust in Hangzhou, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(11): 11760–11771.
- [4] JIANG R, WANG ME, CHEN WP, *et al.* Ecological risk of combined pollution on soil ecosystem functions: Insight from the functional sensitivity and stability [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 255(p1): 113184.
- [5] 李乐乐, 刘源, 李宝贵, 等. 镉低积累小麦品种的筛选研究[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(8): 53–58, 72.  
LI LL, LIU Y, LI BG, *et al.* Screening study of wheat varieties with low cadmium accumulation [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(8): 53–58, 72.
- [6] GALLEGO SM, PENA LB, BARCIA RA, *et al.* Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: Insight into regulatory mechanisms [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2012, 83: 33–46.
- [7] LI H, LUO N, LI YW, *et al.* Cadmium in rice: Transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 224: 622–630.
- [8] 杨小俊. 重金属作用对作物品质及代谢的影响研究概述[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(20): 7995–8003.  
YANG XJ. Overview of the effects of heavy metals on crop quality and metabolism [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(20): 7995–8003.
- [9] 赖灯妮, 林树花, 谭欢, 等. 果蔬中主要污染物与污染状况及其危害研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(16): 69–77.  
LAI DN, LIN SH, TAN H, *et al.* Progress in the study of major pollutants and contamination status and their hazards in fruits and vegetables [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(16): 69–77.
- [10] 赵丽娟. 代谢组学技术研究氯磺隆和镉对玉米幼苗和菠菜代谢的影响[D]. 太原: 山西大学, 2016.  
ZHAO LJ. Metabonomics study on the effects of chlorsulfuron and cadmium on the metabolism of maize seedlings and spinach [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2016.
- [11] 包成龙, 刘根红, 吴炫燕, 等. 重金属污染对枸杞生长及品质影响的研究进展[J]. *北方园艺*, 2024(16): 125–132.
- [12] BAO CL, LIU GH, WU XY, *et al.* Research progress on the effect of heavy metal pollution on the growth and quality of *Lycium barbarum* [J]. *North Horticulture*, 2024(16): 125–132.
- [13] HU YA, CHENG HF, TAO S. The challenges and solutions for cadmium-contaminated rice in China: A critical review [J]. *Environment International*, 2016, 92–93: 515–532.
- [14] LIU N, HUANG XM, SUN LM, *et al.* Screening stably low cadmium and moderately high micronutrients wheat cultivars under three different agricultural environments of China [J]. *Chemosphere*, 2020, 241: 125065.
- [15] 柴冠群, 周礼兴, 王丽, 等. 镉污染耕地玉米重金属安全品种筛选[J]. *河南农业科学*, 2022, 51(10): 74–85.  
CHAI GQ, ZHOU LX, WANG L, *et al.* Screening of heavy metal-safe varieties of maize in cadmium and arsenic polluted cropland [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2022, 51(10): 74–85.
- [16] ZHAO FJ, MA YB, ZHU YG, *et al.* Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(2): 750–759.
- [17] 孙玖明, 张大乐, 宋纪斌, 等. 低积累作物品种筛选技术在保障重金属污染农田安全生产中的应用[J/OL]. *浙江农业学报*, 1-16. [2024-09-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1151.S.20240816.1746.022.html>  
SUN JM, ZHANG DL, SONG JB, *et al.* Research progress and application of low accumulation crop variety screening technology in ensuring safe production of heavy metal polluted farmland [J/OL]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 1-16. [2024-09-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1151.S.20240816.1746.022.html>
- [18] SHI GL, ZHU S, BAI SN, *et al.* The transportation and accumulation of arsenic, cadmium, and phosphorus in 12 wheat cultivars and their relationships with each other [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 299: 94–102.
- [19] 艾金华, 廖晓勇, 王凌青, 等. 镉胁迫下小麦镉低累积品种筛选[J]. *南昌大学学报(理科版)*, 2019, 43(2): 175–181.  
AI JH, LIAO XY, WANG LQ, *et al.* The selection of low cadmium accumulation wheat varieties under cadmium stress [J]. *Journal of Nanchang University (Natural Science)*, 2019, 43(2): 175–181.
- [20] 张彦威, 张军, 徐冉, 等. 籽粒有毒重金属低富集大豆品种筛选及与环境作用效应分析[J]. *大豆科学*, 2019, 38(6): 839–846.  
ZHANG YW, ZHANG J, XU R, *et al.* Screening of soybean varieties with low enrichment of toxic heavy metals in seeds and analysis of effects on their role with the environment [J]. *Soybean Science*, 2019, 38(6): 839–846.
- [21] 连秀叶. 2个引进水稻新品种对镉的积累特性及安全利用[J]. *农业科技通讯*, 2022(10): 79–81, 128.  
LIAN XY. Accumulation characteristics and safe utilization of cadmium by two new introduced rice varieties [J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2022(10): 79–81, 128.
- [22] 查盐, 汤婕, 牛天新. 叶菜类蔬菜对重金属富集特性研究[J]. *江西农业大学学报*, 2022, 44(3): 773–782.  
CHA Y, TANG J, NIU TX. Characterization of leafy vegetables on heavy metal enrichment [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2022, 44(3): 773–782.
- [23] 者理. 小麦镉低积累种质资源筛选及相关候选基因挖掘[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.  
ZHE L. Screening of germplasm resources for low cadmium accumulation in wheat and mining of related candidate genes [D]. Yangling: Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2023.
- [24] 王秋红, 时倩茹, 彭爱华, 等. 污染石灰性土壤不同品种小麦籽粒对重金属的积累特征[J]. *河南农业科学*, 2023, 52(10): 72–81.  
WANG QH, SHI QR, PENG AIH, *et al.* Accumulation characteristics of heavy metals in wheat kernels of different varieties in polluted calcareous soil [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2023, 52(10): 72–81.

- [24] 潘建清, 陆敏, 杨肖娥. 不同小麦品种灌浆期生长和镉积累的差异研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(4): 756–765.  
PAN JQ, LU M, YANG XE. Variations in growth and cadmium accumulation among 30 wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars during the grain filling stage [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(4): 756–765.
- [25] 马凤仪, 马立超, 赵宝平, 等. 低镉高产春小麦品种筛选及富集转运特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(5): 994–1003.  
MA FY, MA LC, ZHAO BP, *et al.* Screening Cd enrichment and transport characteristics of low-cadmium and high-yield spring wheat varieties [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(5): 994–1003.
- [26] 陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 等. 不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选[J]. 环境科学, 2019, 40(10): 4647–4653.  
CHEN XH, SHEN GX, BAI YJ, *et al.* Enrichment characteristics of different crops on Cd in soil and screening of low accumulation varieties [J]. Environmental Science, 2019, 40(10): 4647–4653.
- [27] 鲍玉花, 马秀花, 闫世芳, 等. 马铃薯及耕地土壤重金属含量的测定及健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(23): 9149–9156.  
BAO YH, MA XH, AN SF, *et al.* Determination of heavy metals in potato and arable soil and health risk assessment [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(23): 9149–9156.
- [28] 何富豪, 田超, 户少武, 等. 土壤镉污染和叶面施锌对小麦不同部位镉锌含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(4): 741–751.  
HE FH, TIAN C, HU SW, *et al.* Effects of soil cadmium pollution and foliar zinc application on cadmium and zinc contents in different parts of wheat [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(4): 741–751.
- [29] 吴东峰, 李秀菊, 宋艾林, 等. 自动石墨消解-石墨炉原子吸收法测定土壤中铅和镉[J]. 干旱环境监测, 2020, 34(1): 38–40.  
WU DF, LI XJ, SONG AIL, *et al.* Determination of lead and cadmium in soil by automatic graphite digestion-graphite furnace atomic absorption method [J]. Arid Environmental Monitoring, 2020, 34(1): 38–40.
- [30] 王丹丹, 李卫华, 郭海平, 等. 重金属汞在玉米不同组织内积累差异性分析[J]. 山西农业科学, 2017, 45(6): 912–917.  
WANG DD, LI WH, GUO HP, *et al.* Differential analysis of heavy metal mercury accumulation in different tissues of maize [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2017, 45(6): 912–917.
- [31] 柴冠群, 蔡景行, 吴道明, 等. 十一个辣椒品种的镉富集和转运能力比较[J]. 南方农业, 2023, 17(9): 56–60, 74.  
CHAI GQ, CAI JX, WU DM, *et al.* Comparison of cadmium enrichment and translocation capacity of eleven pepper varieties [J]. South China Agriculture, 2023, 17(9): 56–60, 74.
- [32] 王莎莎. 基于石墨炉原子吸收法对重庆市渝西地区鲜辣椒镉污染情况的风险评估[J]. 现代食品, 2023, 29(22): 225–228.  
WANG SS. Risk assessment of cadmium contamination in fresh chili peppers in Yuxi, Chongqing based on graphite furnace atomic absorption [J]. Modern Food, 2023, 29(22): 225–228.
- [33] 张秀锦, 张容慧, 蔡景行, 等. 镍污染稻田低积累水稻品种筛选及健康风险评估[J]. 河南农业科学, 2023, 52(6): 61–69.  
ZHANG XJ, ZHANG RH, CAI JH, *et al.* Screening of rice varieties with low accumulation in nickel-contaminated paddy fields and health risk evaluation [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023, 52(6): 61–69.
- [34] 杨昱莹, 刘亮, 陈明, 等. 长三角地区南京市表土重金属污染特征及源解析[J]. 中国环境科学, 2024, 44(7): 3910–3918.  
YANG YY, LIU L, CHEN M, *et al.* Characterization and source analysis of topsoil heavy metal pollution in Nanjing, Yangtze River Delta [J]. China Environmental Science, 2024, 44(7): 3910–3918.
- [35] 张耿亩, 赵钰杰. 诸暨市不同作物对土壤铅吸收的研究:富集系数和安全阈值[J]. 中国农学通报, 2022, 38(18): 100–106.  
ZHANG GM, ZHAO YJ. Study on the uptake of soil cadmium and lead by different crops in Zhuji City: Enrichment coefficients and safety thresholds [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(18): 100–106.
- [36] 邵晓庆, 贺章咪, 徐卫红. 辣椒果实高中低镉型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较[J]. 环境科学, 2021, 42(2): 952–959.  
SHAO XQ, HE ZM, XU WH. Comparison of cadmium enrichment, transport properties and subcellular distribution characteristics between high and low cadmium accumulation types in pepper fruits [J]. Environmental Science, 2021, 42(2): 952–959.
- [37] 黄承建, 李祥, 刘小康, 等. 不同农作物种植对土壤和作物重金属的影响[J/OL]. 作物杂志, 1–10. [2024-11-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1808.S.20240814.1639.012.html>  
HUANG CJ, LI X, LIU XK, *et al.* Effects of different crop cultivation on soil and crop heavy metals [J/OL]. Crops, 1–10. [2024-11-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1808.S.20240814.1639.012.html>
- [38] 关天霞, 何红波, 张旭东, 等. 土壤中重金属元素形态分析方法及形态分布的影响因素[J]. 土壤通报, 2011, 42(2): 253–262.  
GUAN TX, HE HB, ZHANG XD, *et al.* Methods of morphometric analysis of heavy metal elements in soil and factors affecting morphometric distribution [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(2): 253–262.
- [39] WANG FY, WANG L, SHI ZY, *et al.* effects of AM inoculation and organic amendment, alone or in combination, on growth, P nutrition, and heavy-metal uptake of Tobacco in Pb-Cd contaminated soil [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2012, 31(4): 549–559.
- [40] SUHGUR A, SOYLAK M, YILMAZ E, *et al.* Characterization of heavy metal fractions in agricultural soils by sequential extraction procedure: The relationship between soil properties and heavy metal fractions [J]. Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 2015, 24(1): 1–15.
- [41] 杜彩艳, 祖艳群, 李元. pH 和有有机质对土壤中镉和锌生物有效性影响研究[J]. 云南农业大学学报, 2005, 20(4): 88–92.  
DU CY, ZU YQ, LI Y. Effects of pH and organic matter on the bioavailability of cadmium and zinc in soil [J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2005, 20(4): 88–92.
- [42] ANADE SM, VALVERDE-ASENJO I, QUINTANA JR, *et al.* Carbonate, organic and clay fractions determine metal bioavailability in periurban calcareous agricultural soils in the Mediterranean area [J]. Geoderma, 2014, 221–222: 103–112.
- [43] 张田, 李艳玲, 王天齐, 等. 北方小麦田土壤-小麦系统镉综合健康风险评估[J/OL]. 环境科学, 1–12. [2024-09-26]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202401191>  
ZHANG T, LI YL, WANG TQ, *et al.* Integrated health risk assessment of cadmium in soil-wheat systems in northern wheat fields [J/OL]. Environmental Science, 1–12. [2024-09-26]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202401191>
- [44] 陈惠君, 谭玲, 李取生, 等. Cr/Pb 低累积玉米品种筛选及其根际机理研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(7): 1249–1256.  
CHEN HJ, TAN L, LI QS, *et al.* Screening of Cr/Pb low-accumulation cauliflower varieties and their inter-root mechanism [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(7): 1249–1256.
- [45] IM J, YANG K, JHO E, *et al.* Effect of different soil washing solutions on bioavailability of residual arsenic in soils and soil properties [J]. Chemosphere, 2015, 138: 253–258.

(责任编辑: 韩晓红 安香玉)