

doi: 10.12029/gc20220512001

任彧仲, 宋延斌, 王喜宽, 侯进凯, 赵瑞. 2023. 河南省洛阳市不同农作物中镉富集规律及镉轻度污染区农业种植建议[J]. 中国地质, 50(4): 1250–1267.

Ren Yuzhong, Song Yanbin, Wang Xikuan, Hou Jinkai, Zhao Rui. 2023. Cadmium accumulation in different crops and agricultural planting suggestions for Cadmium lightly polluted areas in Luoyang City, Henan Province[J]. Geology in China, 50(4): 1250–1267(in Chinese with English abstract).

## 河南省洛阳市不同农作物中镉富集规律及镉轻度污染区农业种植建议

任彧仲, 宋延斌, 王喜宽, 侯进凯, 赵瑞

(河南省地质矿产勘查开发局第一地质矿产调查院, 河南 洛阳 471023)

**提要:**【研究目的】本文主要是为了筛选镉低积累农作物, 研究农作物中镉的影响因素, 指导农田土壤镉轻度污染区的安全利用。【研究方法】通过对洛阳市大田种植的 23 种农作物可食部分以及根系土中镉及其他元素的测试, 应用数理统计与相关性分析, 结合地质矿产特征, 研究了洛阳市土壤中镉超标原因, 不同农作物中镉的富集规律和影响因素, 筛选出镉低积累农作物。【研究结果】农作物土壤中镉超标点位占总点位数的 6.98%, 农作物超标点位占总点位的 0.84%, 农作物超标点占土壤轻微轻度超标点的 12%, 镉轻微轻度超标土壤中农作物超标率低。各种农作物可食部分中镉平均含量从大到小排列为: 花生 > 秋葵 > 豇豆 > 绿豆 > 大豆 > 黑豆 > 芝麻 > 油菜籽 > 辣椒 > 小麦 > 大蒜 > 红小豆 > 谷子 > 毛豆 > 豆角 > 玉米 > 红薯 > 樱桃 > 石榴 > 梨 > 银条 > 苹果 > 葡萄。土壤中镉含量与镉不同形态均呈显著正相关。进行相关性分析的 16 种农作物中, 农作物中镉与土壤中镉 8 种呈正相关, 4 种呈负相关, 4 种无相关。2 种农作物中镉与 pH 呈正相关, 11 种农作物中镉与 pH 呈负相关, 3 种农作物中镉与 pH 无相关。13 种镉 BCF 与 pH 呈负相关, 3 种镉 BCF 与 pH 呈正相关。15 种镉 BCF 与农作物中镉呈正相关, 1 种镉 BCF 与农作物中镉呈负相关。影响农作物中镉含量的因素主要是土壤 pH 值, 其次是土壤中镉。各种农作物中镉与土壤和农作物中硒、铜、锌以及其 BCF 呈现不同的相关性。镉轻微轻度污染区, 种植苹果、石榴、银条、梨、红薯、玉米、大蒜、葡萄、豆角、樱桃可以安全利用。芝麻、油菜籽、谷子、小麦、花生种植在碱性土壤中也可以安全利用。豆类作物也是镉轻微轻度污染区适合种植的农作物。小麦中镉超标区种植芝麻、油菜籽、谷子、红薯、玉米等粮油作物和苹果、梨、葡萄、樱桃等水果均可以安全利用, 提高土壤 pH 值也可以降低小麦对镉的吸附。【结论】不同农作物镉富集规律与影响因素的研究, 为研究区土壤镉轻微轻度污染区的安全利用提供了科学依据。

**关键词:** 镉; 土壤; 镉轻微轻度污染区; 低积累农作物; 富集系数; 农业地质调查工程; 洛阳市; 河南省

**创新点:** 首次对洛阳市不同农作物中镉含量进行分析评价, 对不同农作物的富集规律进行了总结; 分析了不同农作物中镉的影响因素, 对镉轻微轻度污染区安全利用提出了科学建议。

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)04-1250-18

## Cadmium accumulation in different crops and agricultural planting suggestions for Cadmium lightly polluted areas in Luoyang City, Henan Province

收稿日期: 2022-05-12; 改回日期: 2022-07-27

基金项目: 洛阳市硒资源详查项目(洛公交易采购[2018]053号)资助。

作者简介: 任彧仲, 男, 1967年生, 高级工程师, 从事土壤污染修复研究; E-mail: renyuzhongdkyy@163.com。

通讯作者: 王喜宽, 男, 1969年生, 正高级工程师, 从事地球化学研究; E-mail: nmgwxk@126.com。

REN Yuzhong, SONG Yanbin, WANG Xikuan, HOU Jinkai, ZHAO Rui

(No.1 Institute of Geological and Mineral Resources Survey, Henan Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, Luoyang 471023, Henan, China)

**Abstract:** This paper is the result of agricultural geological survey engineering.

**[Objective]** The purpose of this paper is to screen the crops with low cadmium accumulation, study the influencing factors of cadmium in crops, and guide the safe utilization of agricultural soil lightly contaminated with cadmium. **[Methods]** Cadmium and other elements in the edible parts of 23 crops and the corresponding root soils from Luoyang City were measured. We studied the reasons of excessive cadmium in soil, enrichment trend of cadmium in different crops and its influencing factors to screen out the crops with low cadmium accumulation by mathematical statistics and correlation analysis combined with the information of geology and mineral deposits. **[Results]** 6.98% of root soil samples exceeded the national standard of Cd in crop soil. 0.84% of crop samples exceeded the national standard of Cd in crops. The rates of crop exceeding the national standard in the soil with cadmium slightly exceeding the national standard is low. The average cadmium concentration in the edible parts of various crops is ranked as: peanut > okra > cowpea > mung bean > soybean > black bean > sesame > rapeseed > pepper > wheat > garlic > red bean > millet > edamame > bean > corn > sweet potato > cherry > pomegranate > pear > Chinese artichoke > apple > grape. Different speciation of Cd is significantly correlated with the total Cd in root soil. The main influencing factors affecting cadmium concentration in edible parts of crops is soil pH, followed by cadmium concentration in soil and concentrations of other elements such as Se, Mo and Zn. The correlation between Cd concentration in edible parts of different crops and soil Cd content and pH is not consistent. In areas with weak cadmium pollution, apples, pomegranates, Chinese artichoke, pears, sweet potatoes, corn, garlic, grapes, beans and cherries are recommended to be planted. Sesame, rapeseed, millet, wheat and peanuts can be farmed in alkaline soil. Sesame, rapeseed, millet, sweet potato and corn and fruits such as apple, pear, grape and cherry can be safely grown in areas with excessive cadmium in wheat grains. Increasing soil pH can also reduce the adsorption of cadmium by wheat grains. **[Conclusions]** The study of cadmium accumulation trends and its influencing factors of different crops could provide scientific basis for the safe utilization of soil with cadmium slightly exceeding the national standard.

**Key words:** Cadmium; soil; cadmium slightly contaminated area; cadmium low accumulation crops; enrichment coefficient; agricultural geological survey engineering; Luoyang City; Henan Province

**Highlights:** The cadmium concentrations of edible parts of different crops in Luoyang were analyzed and evaluated for the first time, and cadmium accumulation trends and its influencing factors of different crops was revealed. Scientific suggestions were put forward for the safe utilization of soil with cadmium slightly exceeding the national standard.

**About the first author:** REN Yuzhong, male, born in 1967, senior engineer, engaged in soil pollution remediation research; E-mail: renyuzhongdkey@163.com.

**About the corresponding author:** WANG Xikuan, male, born in 1969, professor level senior engineer, engaged in geochemical research; E-mail: nmgwxk@126.com.

**Fund support:** Supported by the Detailed Investigation Project of Selenium Resources in Luoyang city (Public Transaction Procurement of Luoyang City [2018] No. 053).

## 1 引言

2014年4月17日,环境保护部和国土资源部公布的《全国土壤污染状况调查公报》显示全国耕地土壤点位超标率为19.4%,其中轻微、轻度、中度和重度污染点位比例分别为13.7%、2.8%、1.8%和1.1%。镉点位超标率7.0%,排名第一,是全国土壤和耕地主要的污染物,其中镉轻微、轻度、中度、重

度超标点位分别是5.2%、0.8%、0.5%、0.5%,总体以轻微轻度污染为主。镉是一种有毒重金属元素,主要在人体肝、肾部积累,造成肾小管等脏器损伤,导致肾功能不全,并使人体骨骼代谢受阻,继而引发骨骼病变(田效琴等,2017)。

目前中国重金属污染农田土壤修复所采用的技术主要有:工程修复、物化稳定—低吸收作物联合阻控、农艺(水分等)调控、植物吸取修复、化学淋

洗修复、替代种植与安全利用等技术(胡鹏杰等, 2018)。轻微轻度污染区影响因素众多,主要是地质环境高背景和上游金属矿山经冲洪积作用在下游沉积形成污染区,污染区域面积大。如何安全利用此类土地是目前研究的热点之一。有些研究者使用低积累植物或品种的概念,认为低积累植物或品种能够限制重金属在地上部的吸收和富集,从而能够降低重金属对人类的风险(Chen et al., 2007; Grant et al., 2008)。为实现中轻度镉污染农田的利用及粮食的安全生产,近年来诸多学者开展了镉低积累型作物的筛选与培育工作,并得到了诸多具有镉低积累特性的作物(Wu et al., 2016),选育出对重金属具有低积累性的作物品种,然后将这些新品种种植在被重金属污染的土壤中,达到修复或利用这些土壤的目的(吴大付等, 2012)。目前,对小麦镉低积累型品种的筛选多基于污灌区附近重度污染农田、室内盆栽试验和水培试验(朱桂芬等, 2009)以及单一环境大田试验(Zhou et al., 2019),均不能全面反映小麦在中轻度镉污染情况下的自然生长状况及稳定性(冯亚娟等, 2021)。不同作物种类及同一作物不同品种间对重金属的吸收存在差异(Pinsonet al., 2015),如小麦是一种易于累积镉的作物(刘畅等, 2022),镉是花生籽仁中最容易超标也是最需要关注的重金属(刘璇等, 2020),大蒜对镉污染土壤具有较强的生理生态适应性,具备修复镉污染土壤的潜力(Qian et al., 2009)。不同种类蔬菜镉积累量存在显著差异,其中叶菜类>根茎类>茄果类>豆类蔬菜(李明, 2018)。

植物修复技术是治理土壤重金属污染的一种绿色经济的新途径,但由于超富集植物生物量小、环境适应能力弱、生长耗时较长,还需要中断农业生产,不符合当前中国耕地资源紧缺的基本国情(李涵等, 2020)。选择对镉低积累农作物,种植出符合国家标准的安全农产品,是轻微轻度污染耕地最好的安全利用方法。同时,轻微轻度土壤污染区种植的农作物不一定超出国家标准,需要进行全面调查评价。

2018—2020年,河南省第一地质矿产调查院在洛阳市多目标区域地球化学调查发现的硒高背景区进行1:5万土地质量地球化学调查工作,圈定出富硒和富钼、富锌土地和镉的轻微轻度污染区。在

洛阳市采集了23种农作物,分析了硒、钼、镉、锌、铜、铅、砷、镍、汞、铬等元素以及土壤理化性质。本文在此项目成果的基础上,总结洛阳市各种农作物中镉富集规律,筛选发现镉低富集农作物,研究土壤镉轻度污染区对农作物的影响以及不同农作物中镉富集机理与影响因素,为该区域内土壤镉轻度污染区安全利用提供依据。

## 2 材料与方法

### 2.1 研究区概况

研究区位于河南省洛阳市伊洛河流域,涉及伊川县大部,汝阳县、嵩县、孟津县和洛阳市区的部分地区。土壤类型以褐土、潮土、红黏土和粗骨土为主。农业种植区主要分布在第四系山坡耕植土及洛河、伊河、汝河阶地黄土区和冲洪积平原区;新近系砾岩、砂砾岩、钙质泥质砂岩、粉砂质泥岩夹泥灰岩薄层分布区;中元古界熊耳群安山岩、辉石安山岩、安山玄武岩夹少量流纹岩、石英斑岩及火山碎屑,五佛山群砾岩、石英砂岩、粉砂质页岩、页岩等,汝阳群石英砂岩、长石石英砂岩、页岩夹少量白云岩分布区;喜山早期辉石橄榄玄武岩,夹少量砂砾岩及泥岩分布区(图1)。西部是豫西有色金属成矿带。研究区主要以洛阳市1:5万硒资源详查770 km<sup>2</sup>的调查区(包括南、北两个区)为主,洛阳市其他农业种植区为辅。

### 2.2 样品采集

本次农作物及其根土主要采自洛阳市硒资源详查区内,部分采自农业示范区和其他地区。样品采集选择有代表性的地块,共采集小麦174件,玉米175件,谷子34件,花生49件,芝麻35件,油菜籽15件,银条17件,大豆20件,绿豆4件,黑豆4件,红薯125件,大蒜16件,豆角2件,辣椒2件,梨20件,苹果13件,葡萄3件,石榴3件,豆角2件,毛豆1件,豇豆1件,秋葵1件,红小豆1件。大面积种植的农作物样品采集大于30件,种植面积较小的采集5~30件,种植面积太小的样品数量小于5件,只有一个地块发现有种植的4种农作物各采集了1件。总计采集各类农作物样品717件。

农作物采用棋盘法进行3~5点混合取样,然后等量混匀组成1件样品,同时采集根土样品。大型果实由5~10棵或者以上植株组成,小型果实由10~20棵

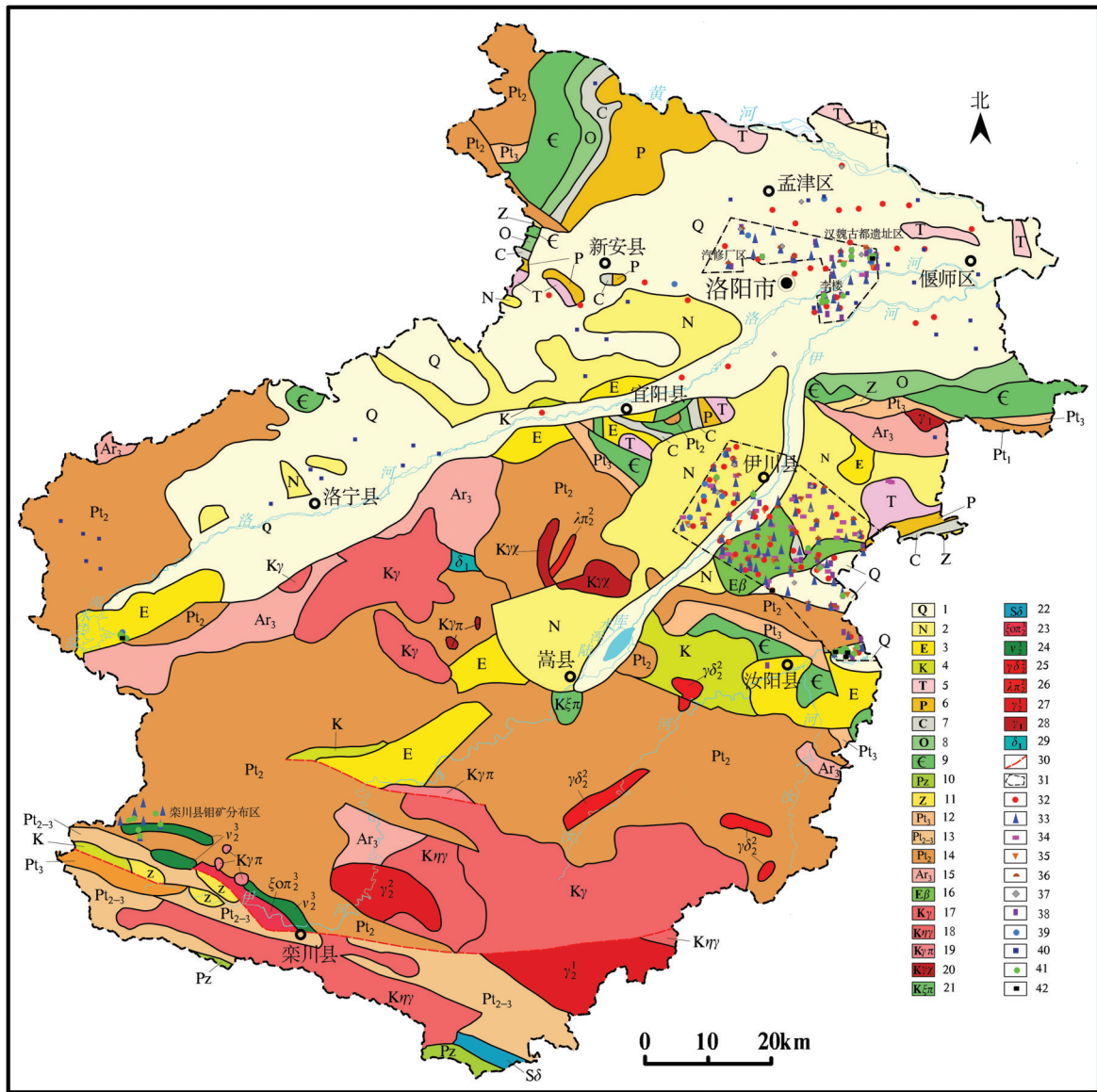


图1 研究区位置及农作物样品采集位置分布图

1—第四系;2—新近系;3—古近系;4—白垩系;5—三叠系;6—二叠系;7—石炭系;8—奥陶系;9—寒武系;10—下古生界(未分);11—新元古界震旦系;12—新元古界;13—中新元古界;14—中元古界;15—太古界;16—喜山早期玄武岩;17—燕山晚期花岗岩;18—燕山晚期二长花岗岩;19—燕山晚期花岗斑岩;20—燕山晚期花岗煌斑岩;21—燕山晚期正长斑岩;22—加里东晚期闪长岩;23—新元古代石英正长斑岩;24—新元古代辉长岩;25—中元古代花岗闪长岩;26—中元古代石英斑岩;27—早元古代花岗岩;28—太古代花岗岩;29—太古代闪长岩;30—区域断裂;31—1:5万硒资源详查工作区范围;32—小麦样品采集位置;33—玉米样品采集位置;34—谷子样品采集位置;35—花生样品采集位置;36—芝麻样品采集位置;37—油菜样品采集位置;38—红薯样品采集位置;39—豆类样品采集位置;40—其他类农作物样品采集位置;41—超风险筛选值土壤点;42—农作物超标点

Fig.1 Location of the study area and distribution map of crop sample collection

1— Quaternary; 2— Neogene; 3— Paleogene; 4— Cretaceous; 5— Triassic; 6— Permian; 7— Carboniferous; 8— Ordovician; 9— Cambrian; 10— Lower Paleozoic (undivided); 11— Neoproterozoic/Sinian; 12— Neoproterozoic; 13— Meso- Neoproterozoic; 14— Mesoproterozoic; 15— Archaean; 16— Early Himalayan basalt; 17— Late Yenshanian granite; 18— Late Yenshaniann monzogranite; 19— Late Yenshaniann granite porphyry; 20— Late Yenshaniann granite lamprophyre; 21— Late Yenshaniann syenite- porphyry; 22— Late Caledonian diorite; 23— Neoproterozoic quartz- syenite- porphyry; 24— Neoproterozoic gabbro; 25— Mesoproterozoic granodiorite; 26— Mesoproterozoic quartz porphyry; 27— Paleoproterozoic granite; 28— Archaean granite; 29— Archaean diorite; 30— Regional fracture; 31— 1:50000- scaled scope of selenium resource detailed investigation work area; 32— Wheat sample locations; 33— Corn sample locations; 34— Millet sample locations; 35— Peanut sample locations; 36— Sesame sample locations; 37— Rape sample locations; 38— Sweet potato sample locations; 39— Legume sample locations; 40— Other crops sample locations; 41— Risk screening values exceed soil sample locations; 42— Standard exceed crops sample locations

或者以上植株组成。谷物、油料、豆类采集质量为1 kg(干质量),水果、蔬菜类、中药材采集质量为2 kg(鲜质量)。土壤样品采集质量为1 kg(干质量)。

### 2.3 样品分析测试

华北有色地质勘查局燕郊中心实验室承担根土样品、土壤形态样品测试;河南省岩矿测试中心、湖北省地质实验测试中心、河南省地矿局地矿一院实验室承担农作物样品测试。

#### 2.3.1 样品制备

小麦、玉米、谷子、花生、芝麻、豆类:将样品用尼龙筛筛去杂质,四分法缩分,分取于尼龙筛中,用自来水多次清洗至水澄清,再用蒸馏水冲洗,置于陶瓷托盘中,于60℃(谷子于45℃)烘箱中烘干。烘干样品经玛瑙研磨机加工至40目,密闭消解。

水果、蔬菜、银条:将样品用自来水冲洗干净,再用蒸馏水冲洗,用玛瑙研磨机制成浆状,将碎好的样品装入螺口塑料瓶内,密闭消解。

土壤样品制备:土壤样品在野外样品加工间里阴干过20目尼龙筛后,采用四分法将样品装袋送交实验室。实验室用玛瑙研磨机将样品研磨至小于200目以后,称取0.1000 g样品进行四酸(硝酸、盐酸、氢氟酸、高氯酸)溶样,定容25 mL后稀释待测。

#### 2.3.2 根土样品测试

根土样品采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)分析镉、钼、锌,原子荧光光谱法(AFS)分析硒。取10.0 g样品,纯水浸取直接采用pH计电极法

(ISE)测定pH。分析质量均符合《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016)的相关要求(表1)。

#### 2.3.3 土壤样品形态分析

按不同区域从根土中随机选择了38件土壤样品进行形态分析,采用电感耦合等离子体光谱法(ICP-AES),分析了镉元素的水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态、腐殖酸结合态、铁锰结合态、强有机结合态、残渣态共7种形态。镉元素各形态检出限:水溶态0.002mg/kg、离子交换态0.02 mg/kg、碳酸盐结合态0.02 mg/kg、腐殖酸结合态0.02 mg/kg、铁锰结合态0.02 mg/kg、强有机结合态0.02 mg/kg、残渣态0.03 mg/kg。Cd形态检测总报出率为74.36%。

#### 2.3.4 农作物样品分析

依据《食品安全国家标准食品中多元素的测定》(GB 5009.268-2016),农作物样品采用等离子体质谱法(ICP-MS)分析镉、钼、硒、锌。各元素分析质量见表2。

#### 2.3.5 统计分析与制图

本次工作采用Excel和SPSS25进行数据统计分析,制图采用MapGIS软件进行。

## 3 结果与讨论

### 3.1 根土和农作物中镉元素特征

#### 3.1.1 根土中镉元素含量特征和超标成因分析

洛阳市土壤和农作物中镉元素统计结果(表3)显示,全部农作物根土镉平均含量范围0.07~2.21

表1 土壤样品分析质量一览

Table 1 Quality of soil samples

元素	分析方法	检出限/(mg/kg)	报出率/%	准确度( $\Delta$ lgc)	精密度(RSD)/%
Cd	ICP-MS	0.03	100	0.006	5.66
Mo	ICP-MS	0.3	100	0.005	5.45
Zn	ICP-MS	4	100	0.006	5.32
Se	AFS	0.01	100	0.006	6.01
pH	ISE	0.10(无量纲)	100	0.003	3.88

表2 农作物样品分析质量一览

Table 2 Quality of crop samples

元素	分析方法	检出限/(mg/kg)	报出率/%	相对偏差RE/%	相对标准偏差RSD/%	重复检验合格率/%
Cd	ICP-MS	0.001	95.29	5.56	3.86	100
Mo	ICP-MS	0.002	98.35	6.25	6.02	100
Se	ICP-MS	0.002	98.12	-3.77	3.77	100
Zn	ICP-MS	0.4	99.76	4.74	2.38	100

表3 洛阳市土壤和农作物中镉元素统计结果

Table 3 Statistical table of description of cadmium in soil and crop of Luoyang City

种类	n	pH	土壤中镉/(mg/kg)			农作物中镉/(mg/kg)		
			含量范围	均值±离差	变异系数	含量范围	均值±离差	变异系数
小麦	174	7.76	0.072~1.91	0.29±0.17	0.60	0.0076~0.224	0.036±0.028	0.78
玉米	175	7.55	0.089~1.04	0.26±0.17	0.64	0.0005~0.022	0.0048±0.003	0.58
谷子	34	7.58	0.096~0.25	0.17±0.03	0.21	0.008~0.60	0.022±0.011	0.49
花生	49	7.40	0.081~0.76	0.20±0.10	0.47	0.042~0.48	0.14±0.08	0.57
芝麻	35	7.55	0.077~0.37	0.21±0.05	0.26	0.0218~0.18	0.06±0.037	0.62
油菜籽	15	7.35	0.17~0.32	0.25±0.04	0.18	0.0099~0.15	0.058±0.041	0.72
大豆	20	7.66	0.11~0.63	0.29±0.13	0.44	0.023~0.139	0.077±0.03	0.39
黑豆	4	7.16	0.14~0.35	0.28±0.09	0.33	0.052~0.081	0.073±0.014	0.20
绿豆	4	7.74	0.18~1.1	0.47±0.43	0.92	0.026~0.13	0.08±0.048	0.61
红薯	125	7.66	0.09~2.21	0.25±0.23	0.91	0.0009~0.057	0.0033±0.005	1.63
豆角	2	7.83	0.13~0.15	0.14±0.01	0.07	0.0049~0.0061	0.0055±0.00083	0.15
大蒜	16	8.17	0.18~0.59	0.32±0.10	0.33	0.013~0.097	0.033±0.02	0.61
辣椒	2	7.29	0.14~0.16	0.15±0.01	0.06	0.044~0.05	0.047±0.004	0.09
梨	20	7.87	0.072~0.46	0.21±0.11	0.52	0.0003~0.0018	0.0011±0.00036	0.31
苹果	13	7.93	0.07~0.16	0.11±0.02	0.22	0.0002~0.0015	0.0006±0.00049	0.78
葡萄	3	7.77	0.19~0.21	0.19±0.01	0.06	0.0003~0.0009	0.0005±0.00037	0.80
石榴	3	7.77	0.081~0.13	0.10±0.02	0.23	0.0017~0.0022	0.002±0.00022	0.11
樱桃	2	7.63	0.17~0.22	0.2±0.04	0.18	0.0008~0.0033	0.0020±0.002	0.85
银条	17	7.77	0.14~0.3	0.19±0.05	0.25	0.0002~0.0026	0.0011±0.001	0.61
红小豆	1	7.05	—	0.29	—	—	0.025	—
豇豆	1	7.72	—	0.17	—	—	0.11	—
毛豆	1	7.28	—	0.42	—	—	0.0057	—
秋葵	1	7.66	—	0.41	—	—	0.13	—

mg/kg。镉平均含量超出 pH < 7.5 条件下土壤镉风险筛选值 0.3 mg/kg 的耕地中种植的农作物是绿豆、毛豆、秋葵、大蒜。大蒜采样点均位于 1:5 万硒资源详查区外围的洛宁县境内洛河流域第四系黄土区,其他元素含量正常,镉含量范围 0.18~0.59 mg/kg,平均值 0.32 mg/kg,变异系数 0.33,中等变异特征。洛河上游以金银矿分布为主,区域上金、银、铋、镉等金银矿特征元素沿洛河两岸呈高背景分布。该区土壤 pH 值大于 7.5,呈碱性,镉未超出农用地土壤风险筛选值,属于高背景区。绿豆 1 件镉未超标,根土镉 1.1 mg/kg,超出风险筛选值,位于伊川县西部的伊河北部冲洪积区,硒、砷、汞、铬、镍、铜、锌、钼、铅、氟等元素含量较高,是伊河灌溉水造成。伊河上游是中国钼矿的矿集区,还有铜、铅、锌等有色金属矿产和萤石矿产,矿物元素经灌溉水在下游农田沉积形成富集。毛豆位于洛河冲洪积物沉积而成的李楼地区,根土中富集镉、硒、汞、铬、镍、铜、锌、

铅。该区内种植小麦、玉米、油菜籽的土壤中镉含量共有 4 件根土超出风险筛选值。秋葵位于洛宁县故县水库东,附近是金银矿开采,由矿产污染引起,秋葵根土不超标,该区内种植黑豆、大豆的土壤中镉含量轻微超标,其他元素呈富集特征的还有硒、汞、铜、锌。

其余农作物根土镉含量平均值均低于 pH < 7.5 条件下的土壤风险筛选值,但也有镉含量最大值超出土壤风险筛选值,主要是小麦、大豆、黑豆、玉米、油菜籽、红薯、花生的根土。根土 pH 平均值显示研究区主要呈弱碱性到碱性环境。

研究区共有 10 处计 50 件农作物根土镉含量超出风险筛选值,主要是轻微轻度程度为主,超标原因见表 4。其中位于洛阳市区北汽修理厂集中区周边土壤中只有镉、铅异常,与其他地区异常元素组合明显不同。在研究区南部的汝河冲积区分布有 5 家企业,靠近企业的农田土壤中镉、铜、锌、铅、

表4 洛阳市镉元素超标区特征

Table 4 Table of characteristics of cadmium exceeding standard in Luoyang City

地点	土壤超标点数	pH	农作物	镉超标原因
故县水库东	8	7.13	黑豆、大豆	附近金银矿山引起
汉魏古都遗址区	7	8.1	小麦、玉米、红薯	古都与伊洛河冲洪积物沉积引起
李楼	5	7.79	毛豆、小麦、玉米、油菜籽	伊河、洛河冲积沉积区
栾川钼矿区	6	7.36	玉米	钼矿集区附近,由矿山引起
洛阳市区北	1	7.72	红薯	汽车修理厂集中区引起
玄武岩分布区	3	7.16	小麦、玉米、油菜籽	武岩玄岩性引起,
玄武岩区南部	1	7.61	红薯	陆浑水库灌溉水引起
汝河沉积区	16	6.9	小麦、玉米、红薯、花生	上游含矿物质沉积和当地企业引起
伊川县西南	2	7.22	小麦、玉米	上游矿山物质被伊河冲洪积物沉积引起
伊川县西	1	7.97	绿豆	上游矿山物质被伊河冲洪积物沉积引起
地点	土壤镉平均值/(mg/kg)	污染程度	农作物超标点	其他高背景元素
故县水库东	0.39	轻微	1件秋葵超标	硒、汞、铜、锌
汉魏古都遗址区	1.03	轻度	1件小麦超标	硒、汞、铬、镍、铜、锌、铅
李楼	0.54	轻微	无	硒、汞、铬、镍、铜、锌、铅
栾川钼矿区	0.64	轻度	无	硒、砷、汞、铬、镍、铜、锌、钼、铅、氟
洛阳市区北	2.21	中度	无	铅
玄武岩分布区	0.32	轻微	无	硒、铬、镍、铜、锌、钼
玄武岩区南部	0.71	轻微	1件小麦超标	硒、砷、汞、铬、镍、钼、铅
汝河沉积区	0.58	轻微	3件小麦超标	硒、砷、汞、锌、铅
伊川县西南	0.45	轻微	无	硒、汞、铜、锌、铬、镍、钼、铅
伊川县西	1.1	轻度	无	硒、砷、汞、铬、镍、铜、锌、钼、铅、氟

砷超标,远离企业,土壤中上述元素中镉还有超标,其他元素含量呈高背景,说明该区镉超标是上游冲洪积物与当地企业共同作用的结果。在汉魏古都区汞明显高出其他地区,是古代汞冶炼以及古墓大量使用汞造成。

### 3.1.2 农作物中镉元素含量特征及超标分析

各种农作物可食部分中镉元素平均含量从大到小排列:花生>秋葵>豇豆>绿豆>大豆>黑豆>芝麻>油菜籽>辣椒>小麦>大蒜>红小豆>谷子>毛豆>豆角>玉米>红薯>樱桃>石榴>梨>银条>苹果>葡萄(表5)。秋葵、豇豆、红小豆、毛豆样品只有1件,作为参考。总体规律是油料作物(花生、芝麻、油菜籽)与豆类作物、秋葵中镉含量最高,其次是谷类(小麦、谷子)、辣椒、大蒜、豆类蔬菜以及玉米、红薯中镉含量较低,水果和中药材银条中镉含量最低,远低于国家标准限值。

广西大豆、黑豆、花生中镉分别为(0.05±0.028)mg/kg、(0.033±0.047)mg/kg、(0.21±0.11)mg/kg(覃志英等,2006)。中国花生的平均镉含量为0.1634mg/kg(陈志军等,2012)。辣椒属于地上部易富集

镉的蔬菜品种(赵首萍等,2021;胡立志等,2021)。苏州黄心红薯、白心红薯、紫红薯中镉含量分别为0.0143 mg/kg、0.00531 mg/kg、0.00206 mg/kg(刘慧等,2021)。青岛市8个主栽普通花生品种籽仁镉含量0.051~0.126 mg/kg,平均0.102 mg/kg(赵明等,2010)。山西省中部、南部水果主产区的苹果和梨中镉含量分别是0.00211 mg/kg和0.00005 mg/kg,分别为限量值的4.2%和0.1%,远低于国家规定的限量(郝变青等,2015)。中国黄淮海和长江中下游两大小麦优势产区的8个省(市)的小麦镉含量均值为(0.032±0.051)mg/kg(陆美斌等,2015)。相同情况下玉米对汞、铅、镉的累积程度显著低于小麦(徐友宁等,2007)。在茄果类蔬菜中秋葵容易吸收重金属元素镉,秋葵中镉含量的高低主要取决于种植环境(黄彬红等,2019)。上述结果总体上与本次接近,说明不同种类的农作物在不同地方的总体规律一致。

与《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB2762-2017)对比,农作物超出标准6件,其中5件是小麦,1件是秋葵,占总点位数的0.84%。秋葵

表5 洛阳市各种农作物中镉富集系数特征  
Table 5 Characteristics of Cadmium enrichment coefficient in various crops in Luoyang City

种类	n	pH	范围	均值±离差	变异系数
小麦	174	7.76	1.18~63.63	13.69±10.09	0.74
玉米	175	7.55	0.23~8.25	2.17±1.40	0.64
谷子	34	7.58	4.31~48.00	13.84±8.21	0.59
花生	49	7.40	17.37~342.34	79.26±54.33	0.69
芝麻	35	7.55	11.47~167.45	33.98±34.80	1.02
油菜籽	15	7.35	5.80~61.15	23.65±17.90	0.76
大豆	20	7.66	7.06~56.14	29.22±12.07	0.41
黑豆	4	7.16	23.23~36.03	27.21±5.94	0.22
绿豆	4	7.74	6.61~72.55	28.95±30.39	1.05
红薯	125	7.66	0.08~10.31	1.32±1.12	0.85
豆角	2	7.83	3.67~4.14	3.91±0.33	0.08
大蒜	16	8.17	5.15~16.42	10.37±3.96	0.38
辣椒	2	7.29	28.22~34.77	31.50±4.63	0.15
梨	20	7.87	0.13~1.63	0.67±0.37	0.55
苹果	13	7.93	0.15~1.48	0.60±0.47	0.78
葡萄	3	7.77	0.12~0.48	0.24±0.20	0.82
石榴	3	7.77	1.37~2.67	2.06±0.65	0.32
樱桃	2	7.63	0.37~1.91	1.14±1.09	0.95
银条	17	7.77	0.13~1.64	0.60±0.44	0.73
红小豆	1	7.05		8.57	
豇豆	1	7.72		65.67	
毛豆	1	7.28		1.38	
秋葵	1	7.66		32.54	

位于故县水库东部金矿附近,14件样品中有8件根土中镉超标,种植的黑豆、大豆、绿豆和玉米中镉均未超标。秋葵土壤pH值为7.66,属于弱碱性土壤,根土镉含量0.41 mg/kg,未超出土壤风险筛选值,属于高背景,秋葵镉含量0.133 mg/kg,超出蔬菜中镉含量限值,说明秋葵对镉有较强的富集能力,秋葵易吸收重金属元素镉(黄彬红等,2019;谢运河等,2020)。超标的5件小麦籽粒中有1件位于汉魏古都遗址区,土壤pH值为8.68,属于碱性土壤,根土镉含量0.42 mg/kg,未超出土壤风险筛选值,但小麦籽粒中镉含量0.136 mg/kg,超出限量标准。洛阳市小麦主要是洛阳市农业科学院培育的洛麦系列品种,该点位于一个农业实验区,41件小麦样品中有3件根土镉超标而小麦籽粒未超标,该点土壤未超标,但小麦籽粒中镉超标,推断与外界环境有关,属于偶然情况。

其余4件小麦籽粒镉超标点有3件位于研究区

南部汝河河流阶地,土壤pH值分别为6.98、6.54、6.70,呈弱酸性,根土镉含量分别为0.45 mg/kg、0.58 mg/kg、0.77 mg/kg,小麦籽粒镉含量分别为0.224 mg/kg、0.161 mg/kg、0.143 mg/kg,属于弱酸性环境下根土和小麦籽粒均轻度超标的特征。另1件位于玄武岩区南部,土壤pH值7.17,呈中性,小麦籽粒镉含量为0.107 mg/kg,轻微超标,根土镉含量为0.17 mg/kg,未超标。

研究区南部汝河冲积平原区内种植的小麦、玉米、红薯、花生中共有16件根土中镉超标,其中小麦有5件,除了小麦籽粒有3件样品超标外,玉米、红薯、花生中镉均不超标。

从上述特征看出,研究区黑豆、大豆、小麦、玉米、红薯、毛豆、油菜籽、花生、绿豆的根土中均有镉超出风险筛选值,但农作物中超出食品安全国家标准的只有小麦。小麦根土中超出土壤风险筛选值的样品有12件,其中有3件小麦籽粒超出食品安全国家标准。同时还有2件小麦根土未超标,而小麦籽粒超标,说明研究区小麦是主要的具有镉污染风险的农作物。

由于农民大多数不清楚所种农作物品种,采样者也无法精准区分出不同品种,因此未能按照不同农作物的不同品种进行研究。已有研究证明,不同作物的镉积累能力存在种间和种内差异性。大豆是易吸收积累镉的农作物,而玉米的镉转运能力较弱,大豆富集镉的能力高于玉米(Zhuang et al., 2013; Zhao et al., 2014; 魏祥东等, 2015)。承德市玉米中镉含量均低于0.005 mg/kg(杨帆等, 2020),与本区结果一致。本次研究表明,研究区各种农作物中镉含量有变异性,是作物品种、土壤类型、土壤中镉背景、成土母质等综合作用的结果。但不同种类的农作物镉含量具有明显的差异,花生、油菜籽、芝麻等油料作物,豆类作物,小麦,蔬菜中的秋葵、辣椒都是富镉农作物,玉米是镉含量最低的粮食作物,银条和水果是低镉农作物,说明不同种类间镉的差异明显。

### 3.2 不同农作物中镉富集规律

富集系数(BCF)是表征土壤中元素含量分布对食物链影响程度的参数,客观反映了农产品从土壤环境中吸收或摄取微量元素的能力,是现代环境地球化学研究土壤元素行为的常用指标之一(廖启林



等,2013)。本文均分析农作物的可食部分,因此镉BCF(富集系数)=(农作物中可食部分镉含量/土壤中镉含量)×100%(表5)。不同农作物镉BCF从大到小排列顺序为:花生>豇豆>芝麻>秋葵>辣椒>大豆>绿豆>黑豆>油菜籽>谷子>小麦>大蒜>红小豆>豆角>玉米>石榴>毛豆>红薯>樱桃>梨>银条>苹果>葡萄。其中花生是最富集镉的农作物,与赵明等(2010)研究成果花生籽仁对土壤镉具有较强的富集能力一致。豇豆、芝麻、秋葵、辣椒、大豆、绿豆、黑豆、油菜籽、谷子、小麦、大蒜中镉BCF均大于10%,属于对镉较为富集的农作物。红小豆、豆角、玉米、石榴、毛豆、红薯、樱桃、梨、银条、苹果、葡萄属于镉低积累农作物。

各种农作物中镉BCF与镉含量的总体规律一致。油料和豆类、茄类蔬菜(秋葵、辣椒)、谷类作物(谷子、小麦)、大蒜属于对镉较为富集的农作物,玉米、红薯、水果是对镉低积累的农作物。花生是最富集镉的农作物,无论是镉含量还是镉BCF,都是研究区农作物中最高。总体规律与石一珺等(2019)研究杭州市主要农作物中镉的富集特征一致。

### 3.3 土壤镉形态与农作物中镉超标分析

本次对镉、砷、铅、汞、铜、锌分析了7种形态,镉元素各形态占全量比值从大到小是碳酸盐结合态(23.37%)>铁锰结合态(23.16%)>离子交换态(18.18%)>残渣态(13.68%)>腐殖酸结合态(11.96%)>强有机结合态(8.35%)>水溶态(0.5%),其中在自然环境下能被农作物吸收的是水溶态与离子态,在酸性环境下碳酸盐结合态也能够被活化。将水溶态与离子态做为镉的有效态,其占全量总比值是18.68%,是汞有效态的7.13倍,铜有

效态的13.54倍,砷有效态的23.35倍,锌有效态的38.92倍,铅有效态的47.90倍,说明镉是最容易被农作物吸收的重金属元素。

对土壤镉全量、pH与不同形态进行Pearson相关分析,从分析结果(表6)可以看出,土壤不同形态与全量之间均具有显著的正相关,说明土壤镉全量是不同形态的决定性因素。已有研究证明,镉的不同结合态形式受土壤有机质、氧化物、碳酸盐以及黏土含量等影响(Liu, 2019)。因而土壤类型(Sarib et al., 2020)、土地利用方式(Khodrani et al., 2019)、土壤的物理化学性质(Ashayeri and Keshavarzi, 2019)等不同,镉存在的形态不同,其中土壤的物理化学性质对镉的迁移转化具有重要影响(Yang et al., 2020)。研究区pH与水溶态呈微弱反相关,与碳酸盐结合态、铁锰结合态、腐殖酸结合态、强有机结合态呈微弱正相关,与离子交换态、残渣态无相关。随着pH增高,镉水溶态减少,土壤中镉活性降低,水溶态转换为碳酸盐结合态、铁锰结合态、腐殖酸结合态、强有机结合态等稳定态。但pH与不同形态均不是显著相关,而土壤镉总量与各种形态均呈显著正相关,说明土壤中镉总量是决定镉形态的主要因素。

研究区农作物主要是镉超标,说明镉是最容易超标的重金属,与镉的有效态远高于其他元素有关。研究区中北部碱性土壤34个镉超标点中小麦镉超标只有1件,南部中酸性土壤16个镉超标点中小麦镉超标4件,说明中酸性土壤中镉超标容易造成小麦中镉超标。

### 3.4 不同农作物中镉及镉BCF与其他指标的相关性

土壤是各种元素的组合系统,各种元素之间有拮抗与协同作用。硒能够缓解或加剧水稻中镉毒

表6 土壤镉全量、pH与不同形态的相关性

	pH	全量Cd	水溶Cd	离子Cd	碳酸盐Cd	腐殖酸Cd	铁锰Cd	强有机Cd	残渣Cd
pH	1	0.20	-0.19	0.08	0.27	0.18	0.23	0.12	-0.01
全量Cd	0.20	1	0.59**	0.98**	0.99**	0.99**	0.98**	0.87**	0.72**
水溶Cd	-0.19	0.59**	1	0.65**	0.51**	0.63**	0.54**	0.58**	0.50**
离子Cd	0.08	0.98**	0.65**	1	0.95**	0.98**	0.96**	0.91**	0.78**
碳酸盐Cd	0.27	0.99**	0.51**	0.95**	1	0.97**	0.98**	0.86**	0.68**
腐殖酸Cd	0.18	0.99**	0.63**	0.98**	0.97**	1	0.96**	0.86**	0.72**
铁锰Cd	0.23	0.98**	0.54**	0.96**	0.98**	0.96**	1	0.91**	0.75**
强有机Cd	0.12	0.87**	0.58**	0.91**	0.86**	0.86**	0.91**	1	0.91**
残渣Cd	-0.01	0.72**	0.50**	0.78**	0.68**	0.72**	0.75**	0.91**	1

注:\*\*表示在0.01级别(双尾),相关性显著。

害,这主要取决于硒和镉的剂量(Feng et al., 2013)。低硒处理显著增加冬小麦幼苗的镉累积量,较高硒处理则显著降低冬小麦地上部镉质量分数(Qin et al., 2018)。尽管不少研究发现外源施硒可以有效降低植物对重金属镉的吸收和积累,但硒对镉的拮抗效应也受镉浓度、硒浓度及硒价态的影响。通常在低镉水平下,硒能明显抑制作物对镉的吸收累积,但在高镉水平下,这种抑制作用减弱(Feng et al., 2013; Huang et al., 2017)。相应的,当硒浓度过高时,反而会加剧镉的吸收(刘秀珍等, 2014; 曾宇斌等, 2017)。虽然目前已有大量研究证实了硒镉存在拮抗作用,但绝大部分研究成果都是来自盆栽试验,硒和镉的施用量、形态都与硒镉高背景区存在显著差异(王波等, 2020)。不同研究者的成果显示不同地区农作物中硒镉元素之间的作用不同。本次在洛阳市发现了富钼、富锌土地和镉轻微轻度污染区,利用Pearson相关分析对不同农作物和土壤中镉、硒、钼、锌以及pH进行了相关性分析,来揭示不同农作物中镉与硒、钼、锌以及pH的相互影响。

3.4.1 不同农作物中镉与其他指标的相关性

不同农作物中镉主要受土壤中镉、pH以及镉BCF影响(表7),与土壤和农作物中硒、钼、锌以及BCF的相关性各不相同。除黑豆中镉与镉BCF呈

显著负相关外,其余农作物中镉与镉BCF均呈显著与明显正相关。小麦、玉米、黑豆、大蒜、红薯中镉与土壤中镉呈显著正相关,黄豆、绿豆、梨中镉与土壤中镉呈弱正相关;石榴中镉与土壤中镉呈显著负相关,葡萄中镉与土壤中镉呈较强负相关,芝麻、苹果中镉与土壤中镉呈弱负相关;谷子、花生、油菜籽、银条中镉与土壤中镉无相关性。绿豆中镉与土壤pH呈较强正相关,黄豆中镉与土壤pH呈弱正相关;芝麻、苹果、油菜籽、谷子、花生、小麦、玉米中镉与土壤pH呈显著负相关,黑豆、石榴、银条中镉与土壤pH呈较强负相关,葡萄中镉与土壤pH呈弱负相关;大蒜、红薯、梨中镉与土壤pH无相关。

谷子中镉与硒呈显著正相关;黑豆中镉与硒呈显著负相关,葡萄、大蒜中镉与硒呈较强负相关。油菜籽、梨、小麦中镉与土壤中硒呈显著正相关,绿豆中镉与土壤中硒呈较强正相关;苹果中镉与土壤中硒呈显著负相关,石榴、黑豆、葡萄、银条中镉与土壤中硒呈较强负相关。谷子中镉与硒BCF呈显著正相关,石榴、苹果、银条中镉与硒BCF呈较强正相关;葡萄、大蒜、黑豆、绿豆、梨中镉与硒BCF呈较强负相关。

绿豆、油菜籽、梨、红薯、小麦中镉与锌呈显著正相关,葡萄、石榴中镉与锌呈较强正相关;苹果、黑豆中镉与锌呈显著负相关。玉米、小麦中镉与土壤中锌呈显著正相关,葡萄、黑豆、绿豆中镉与土壤

表7 不同农作物中镉与其他指标的相关性

Table 7 Correlation between cadmium and other indicators in different crops

种类	样品数	pH	土壤镉	镉BCF	农作物硒	土壤硒	硒BCF	农作物钼	土壤钼	钼BCF	农作物钼	土壤钼	钼BCF
小麦镉	174	-0.431**	0.243**	0.728**	0.094	0.160*	0.033	0.159*	0.186*	-0.072	-0.165*	0.075	-0.288**
玉米镉	175	-0.228**	0.366**	0.594**	0.145	0.072	0.109	0.140	0.364**	-0.145	0.407**	0.324**	-0.046
谷子镉	34	-0.555**	0.022	0.877**	0.403*	-0.150	0.436**	0.220	-0.143	0.370*	-0.133	0.272	-0.348*
花生镉	49	-0.480**	-0.028	0.863**	-0.100	0.082	-0.129	0.166	-0.267	0.304*	0.230	0.107	-0.099
芝麻镉	35	-0.862**	-0.237	0.851**	-0.103	0.040	-0.097	-0.011	-0.117	0.146	-0.321	0.215	-0.520**
油菜籽镉	15	-0.598*	-0.080	0.976**	0.140	0.627*	0.090	0.551*	-0.321	0.646**	-0.357	0.350	-0.629*
黄豆镉	20	0.246	0.273	0.480*	-0.165	0.057	-0.206	0.207	-0.013	0.041	0.295	0.264	0.215
黑豆镉	4	-0.748	0.992**	-0.984*	-0.995**	-0.946	-0.431	-0.982*	0.715	-0.931	-0.687	-0.937	0.452
绿豆镉	4	0.581	0.223	0.670	0.030	0.734	-0.390	0.992**	0.501	0.008	0.396	-0.630	0.393
大蒜镉	16	0.017	0.71**	0.70**	-0.430	0.034	-0.467	-0.236	0.249	-0.315	0.541*	0.560*	0.382
红薯镉	125	-0.096	0.850**	0.411**	0.048	0.144	0.025	0.193*	0.159	0.101	0.182*	0.148	0.148
苹果镉	13	-0.858**	-0.163	0.985**	0.223	-0.686**	0.450	-0.827**	-0.860**	-0.707**	-0.410	0.019	-0.392
梨镉	20	-0.075	0.103	0.438	-0.278	0.540*	-0.340	0.490*	0.285	-0.012	-0.268	0.352	-0.344
葡萄镉	3	-0.143	-0.468	0.999*	-0.866	-0.500	-0.755	0.968	0.991	0.957	0.998*	-0.987	0.998*
石榴镉	3	-0.418	-1.000**	0.994	0.075	-0.994	0.745	0.577	-0.449	0.398	-0.147	0.060	-0.058
银条镉	17	-0.373	-0.095	0.954**	0.116	-0.338	0.355	-0.235	-0.492*	0.125	0.111	-0.076	0.126

注:\*表示在0.05级别(双尾),相关性显著;\*\*表示在0.01级别(双尾),相关性显著。

中镉呈较强正相关;银条、苹果中镉与土壤中镉呈显著负相关,石榴、油菜籽中镉与土壤中镉呈较强负相关。油菜籽、谷子、花生中镉与镉BCF呈显著正相关,葡萄、石榴中镉与镉BCF呈较强正相关;苹果中镉与镉BCF呈显著负相关,黑豆、大蒜中镉与镉BCF呈较强负相关。

葡萄、大蒜、玉米、红薯中镉与镉呈显著正相关,绿豆中镉与镉呈较强正相关;小麦中镉与镉呈显著负相关,黑豆、苹果、油菜籽、芝麻中镉与镉呈较强负相关。大蒜、玉米中镉与土壤中镉呈显著正相关,梨、油菜籽中镉与土壤中镉呈较强正相关;葡萄、黑豆、绿豆中镉与土壤中镉呈较强负相关。葡萄中镉与镉BCF呈显著正相关,黑豆、绿豆、大蒜中镉与镉BCF呈较强正相关;油菜籽、芝麻、谷子、小麦中镉与镉BCF呈显著负相关,梨、苹果中镉与镉BCF呈较强负相关。

显然绝大部分农作物中镉与镉BCF呈显著或明显正相关,与土壤pH呈显著或明显的负相关。各种农作物中镉与土壤中镉呈现不同的相关性;与土壤和农作物中镉、镉、镉以及其BCF也呈现不同的相关性。影响农作物中镉的主要因素是pH和农作物的BCF。

#### 3.4.2 不同农作物中镉BCF与其他指标的相关性

黄豆镉BCF与土壤pH呈显著正相关,黄豆、黑豆镉BCF与土壤pH呈较强正相关;芝麻、苹果、油菜籽、谷子、小麦、花生、红薯、玉米的镉BCF与土壤pH呈显著负相关,梨、银条、石榴的镉BCF与土壤pH呈较强负相关(表8)。

黑豆镉BCF与黑豆中镉呈显著负相关,葡萄、苹果、油菜籽、银条、谷子、花生、芝麻、小麦、大蒜、玉米、黄豆、红薯的镉BCF与对应农作物中镉均呈显著正相关,石榴、绿豆、梨的镉BCF与对应农作物中镉呈较强正相关。黑豆、梨、黄豆、芝麻、谷子、花生、玉米、小麦的镉BCF与土壤中镉呈显著负相关,苹果、银条、葡萄、绿豆、石榴的镉BCF与土壤中镉呈较强负相关。陈洁等(2021)也发现,水稻、小麦、夏玉米和春玉米4种作物的BCF值与土壤镉含量之间都呈现出负相关关系。

黑豆、谷子、红薯的镉BCF与对应农作物中镉呈显著正相关;大蒜、玉米的镉BCF与对应农作物中镉呈显著负相关,葡萄、绿豆的镉BCF与对应农作物

中镉呈较强负相关。油菜籽的镉BCF与土壤中镉呈显著正相关,黑豆的镉BCF与土壤中镉呈较强正相关;石榴、苹果、玉米、小麦的镉BCF与土壤中镉呈显著负相关,葡萄、大蒜、梨的镉BCF与土壤中镉呈较强负相关。谷子、红薯的镉BCF与镉BCF呈显著正相关,石榴、黑豆、苹果、银条、梨的镉BCF与镉BCF呈较强正相关;玉米的镉BCF与镉BCF呈显著负相关,葡萄、绿豆、大蒜的镉BCF与镉BCF呈较强负相关。

黑豆、油菜籽、花生、玉米的镉BCF与对应农作物中镉呈显著正相关,葡萄、绿豆、石榴的镉BCF与对应农作物中镉呈较强正相关;苹果的镉BCF与苹果中镉呈显著负相关,银条的镉BCF与银条中镉呈较强负相关。葡萄、绿豆的镉BCF与土壤中镉呈较强正相关;苹果、银条、花生、黄豆、谷子、玉米、小麦的镉BCF与土壤中镉呈显著负相关,黑豆、石榴、油菜籽的镉BCF与土壤中镉呈较强负相关。油菜籽、谷子、黄豆、花生、玉米、芝麻、小麦、红薯的镉BCF与镉BCF呈显著正相关,葡萄、黑豆、梨的镉BCF与镉BCF呈较强正相关;苹果的镉BCF与镉BCF呈显著负相关。

葡萄、黄豆的镉BCF与对应农作物中镉呈显著正相关,黑豆、绿豆、大蒜的镉BCF与对应农作物中镉呈较强正相关;芝麻、小麦的镉BCF与对应农作物中镉呈显著负相关,梨、油菜籽、苹果的镉BCF与对应农作物中镉呈较强正相关。黑豆、油菜籽、大蒜、黄豆的镉BCF与土壤中镉呈较强正相关;葡萄、绿豆的镉BCF与土壤中镉呈较强负相关。葡萄的镉BCF与镉BCF呈显著正相关,大蒜、黄豆、绿豆的镉BCF与镉BCF呈较强正相关;油菜籽、芝麻、小麦的镉BCF与镉BCF呈显著负相关,梨、苹果的镉BCF与镉BCF呈较强负相关。

总结以上规律,各种农作物的镉BCF主要受农作物中镉、土壤中镉和土壤pH的影响,绝大部分农作物中镉BCF与农作物中镉呈正相关,与土壤中镉呈负相关,与pH呈负相关特征(表8)。说明农作物对镉的吸收强度是镉富集的主要因素,同时土壤pH是影响农作物中镉富集的另一种重要因素,提高土壤pH会减少绝大部分种类农作物中镉含量,但会促进黄豆、绿豆、黑豆中镉的吸收。

#### 3.4.3 各指标相关性分析

有研究证明辣椒、绿豆、小麦中镉与土壤中镉呈正相关特征(何录秋等,2018;胡立志等,2021;冯亚娟

等,2021)。通常情况下,土壤中镉含量越高,蔬菜吸收镉的量就越高,二者呈现较好的正相关性(郭晓静等,2015)。但张磊等(2019)发现玉米、芋头、香蕉、白菜、花生土壤中镉总量和有效态含量均与农作物可食用部分镉含量不成正相关关系,不同种类的农作物对镉的富集情况相差较大。本次研究证明在自然背景下,不同农作物中镉含量与土壤中镉含量呈现不同的相关性,与其他地区的同种农作物也不同。

土壤中镉污染严重,含量变化明显的地区,以及通过人工添加不同含量镉造成土壤中镉含量差异明显的盆栽与大田试验中,农作物中镉与土壤中镉主要呈正相关。在研究区以自然背景为主,镉含量变化较小的环境下,不同农作物由于作物品种、土壤类型、成土母质、元素背景不同,产生不同的结果。16种农作物中从弱到显著正相关的农作物有8种,从弱到显著负相关的农作物有4种,无相关性的有4种。说明在不细分作物品种、土壤类型等条件下,农作物中镉含量与土壤中镉含量呈现正相关的占多数。说明土壤镉是影响农作物中镉含量的主要因素(Mi et al., 2019)。

研究区绝大多数农作物中镉与pH呈负相关,说明随着土壤碱性提高,镉的活性降低,农作物吸收镉的能力减小。绝大多数农作物中镉BCF与pH呈负相关,说明随着土壤pH提高,土壤逐渐变碱性,绝大多数农作物中镉含量逐渐降低,只有豆类作物镉含量提高。

不同农作物中镉与土壤和农作物中硒、铜、锌的相关性各不相同,以两元素间呈显著正相关作为元素间具有协同作用,显著负相关作为元素间具有拮抗作用来分析,农作物中镉与硒具有协同作用的是谷子,具有拮抗作用的是黑豆、葡萄。农作物中镉与锌具有协同作用的是绿豆、油菜籽、梨、红薯、小麦、葡萄、石榴,具有拮抗作用的是黑豆、苹果。农作物中镉与铜具有协同作用的是葡萄、大蒜、玉米、红薯,具有拮抗作用的是小麦。

农作物中镉还受土壤中硒、铜、锌的影响,镉与硒、铜、锌两者之间呈显著正相关,说明硒、铜、锌促进农作物对镉的吸收,显著负相关说明硒、铜、锌抑制农作物对镉的吸收。农作物中镉与土壤中硒呈显著正相关,硒促进镉被农作物吸收的是油菜籽、梨、小麦、绿豆;呈显著负相关,具有抑制镉被农作

物吸收的是苹果、石榴、黑豆、葡萄。农作物中镉与土壤中铜呈显著正相关,铜促进镉被农作物吸收的是玉米、小麦、葡萄、黑豆、绿豆;呈显著负相关,抑制镉被农作物吸收的是银条、苹果。农作物中镉与土壤中铜呈显著正相关,铜促进镉被农作物吸收的是大蒜、玉米;呈显著负相关,铜抑制镉被农作物吸收的是葡萄、黑豆、绿豆。

### 3.5 轻微轻度镉超标区农作物的安全种植

研究区土壤镉轻微轻度污染区,种植对镉低富集,同时BCF与pH呈负相关的农作物,可以安全利用受镉轻微轻度污染的农田。这些农作物包括苹果、石榴、银条、梨、红薯、玉米、大蒜、葡萄、豆角、樱桃。对于芝麻、油菜籽、谷子、小麦、花生等对镉具有较强吸收能力的农作物,在碱性土壤中种植可以安全利用。豆类作物在研究区中酸性、碱性环境下的镉轻微轻度污染区种植镉均未超标,也是镉轻微轻度污染区适合种植的农作物。

研究表明,植物修复技术是土壤重金属污染治理应用前景最好的技术(赵鑫娜等,2023)。对于研究区土壤镉轻微轻度污染区,采用种植镉低积累农作物是非常有效的方法。研究区主要是小麦中镉超标,集中在南部汝河冲洪积盆地区,土壤pH呈中酸性,种植芝麻、油菜籽、谷子、红薯、玉米等粮油作物和苹果、梨、葡萄、樱桃等均可以实现安全利用。油菜籽粒对镉较为富集,油菜茎秆对镉富集程度更高,是修复镉轻微轻度污染的较好农作物(向丹等,2009;吴林土等,2021),且油菜籽中的镉转移到菜籽油中的比例仅为2%~10%(Yang et al., 2016;武琳霞等,2016),大豆、黑豆、油菜除果实外根、茎、叶对镉的富集系数都大于1,都可以作为植物修复的理想作物(张竹青等,2008;刘月莉,2008;李敏,2017),中轻度镉污染试验田按照黑豆-油菜、大豆-油菜、黑豆-大豆模式种植,对土壤中镉的修复效率较好,其中轮作模式中以黑豆-油菜模式提取效率最高(常银川,2020)。这些研究与本次成果结合,种植油菜、豆类是最好的修复方式。

该区域土壤和小麦中富硒富镉,可以通过施加钝化剂提高土壤pH值来降低小麦对镉的吸附。实验研究结果表明玉米秸秆和水稻秸秆生物炭对 $Cd^{2+}$ 和 $Pb^{2+}$ 有着良好的吸附性能(杨育振等,2023)。冯敬云等(2021)基于60篇相关文献分析不同钝化材

表8 不同农作物中镉BCF与其他指标的相关性

Table 8 Correlation between cadmium BCF and other indicators in different crops

种类	样品数	pH	农作物镉	土壤镉	农作物硒	土壤硒	硒BCF	农作物锌	土壤锌	锌BCF	农作物钼	土壤钼	钼BCF
小麦镉BCF	174	-0.506**	0.728**	-0.217**	-0.134	-0.223**	0.005	0.032	-0.216**	0.217**	-0.307**	0.007	-0.331**
玉米镉BCF	175	-0.306**	0.594**	-0.366**	-0.178*	-0.330**	-0.156*	0.226**	-0.324**	0.473**	0.024	-0.027	0.094
谷子镉BCF	34	-0.650**	0.877**	-0.409*	0.357*	-0.257	0.435*	0.261	-0.439**	0.605**	-0.185	-0.011	-0.220
花生镉BCF	49	-0.431**	0.863**	-0.373**	-0.154	-0.202	-0.128	0.320*	-0.505**	0.538**	0.061	-0.084	0.004
芝麻镉BCF	35	-0.926**	0.851**	-0.585**	-0.148	-0.144	-0.088	-0.111	-0.280	0.349*	-0.419*	-0.039	-0.483**
油菜籽镉BCF	15	-0.677**	0.976**	-0.249	0.060	0.540*	0.019	0.609*	-0.338	0.711**	-0.358	0.354	-0.619*
黄豆镉BCF	20	0.534*	0.480*	-0.614**	-0.047	0.098	-0.069	0.282	-0.458*	0.569**	0.520*	0.302	0.387
黑豆镉BCF	4	0.839	-0.984*	-0.997**	0.993**	0.878	0.565	0.961*	-0.598	0.856	0.763	0.861	-0.291
绿豆镉BCF	4	0.269	0.670	-0.571	-0.492	0.097	-0.673	0.760	0.389	0.044	0.652	-0.311	0.328
大蒜镉BCF	16	-0.212	0.704**	0.049	-0.540*	-0.396	-0.450	-0.090	-0.172	-0.002	0.479	0.348	0.486
红薯镉BCF	125	-0.338**	0.411**	0.020	0.324**	-0.119	.324**	0.070	-0.082	0.211*	-0.064	-0.015	-0.039
苹果镉BCF	13	-0.836**	0.985**	-0.306	0.195	-0.731**	0.436	-0.814**	-0.883**	-0.680*	-0.355	-0.069	-0.328
梨镉BCF	20	-0.340	0.438	-0.629**	0.203	-0.303	0.381	0.233	-0.162	0.413	-0.373	-0.170	-0.345
葡萄镉BCF	3	-0.108	0.999*	-0.498	-0.883	-0.469	-0.778	0.976	0.995	0.966	0.999*	-0.992	0.999*
石榴镉BCF	3	-0.514	0.994	-0.993	0.183	-1.000**	0.813	0.485	-0.349	0.296	-0.254	0.168	-0.166
银条镉BCF	17	-0.442	0.954**	-0.365	0.213	-0.243	0.408	-0.306	-0.567*	0.119	0.094	-0.222	0.215

注:\*表示在0.05级别(双尾),相关性显著;\*\*表示在0.01级别(双尾),相关性显著。

料对土壤镉污染农田土壤修复效果为石灰类 > 含磷材料 > 生物炭 ≈ 金属氧化物 > 黏土矿物 > 其他有机物。施入碱性肥料如石灰(Beverley et al., 2012; Chen et al., 2016)、钙镁磷肥(李造煌等, 2017)可提高土壤pH值,降低土壤重金属活性。典型石灰类物质包括石灰、氢氧化钙、钙镁氧化物、碳酸盐矿物、碳酸钙镁矿物、白云石、方解石等(Jörg et al., 2015; Mahar et al., 2016; 陈远其等, 2016),可有效提高土壤pH值,对镉污染土壤具有显著修复效果。但研究表明在实际应用中,长期频繁施用石灰类钝化材料会使表土结皮、土壤板结,降低土壤透气、透水性能,造成土壤结构破坏及养分流失,且碱性条件不利于砷、钼等阴离子的固定,并会增加土壤铝毒性(刘勇等, 2019; 黄柏豪等, 2020),后期土壤中的活性酸、潜性酸及种植作物根系呼吸作用分泌的有机酸等产生缓冲作用,使土壤pH值呈先升高后缓慢回落趋势(李造煌等, 2017),导致土壤中钝化的镉重新活化。在施用石灰类物质时,应注意石灰类物质钝化材料与其他材料进行复配的比例、施用量及长期钝化效应评估(冯敬云等, 2021)。

石灰+腐殖酸能使小麦田土壤pH提升16.8%,石灰+偏硅酸钠+硫酸镁使小麦籽粒镉含量降低25.8%(上官宇先等, 2022)。石灰和硅钙镁肥显著提高土壤的pH值,硅钙镁肥处理对小麦籽粒镉含

量降低效果最大降幅为90.85%(朱利楠等, 2020)。石灰+有机物料处理能明显降低小麦籽粒和秸秆中的镉,施用高量猪粪或石灰+低量猪粪能显著降低小麦对镉的吸收(詹绍军等, 2011)。综合该区域内小麦与pH、BCF呈负相关特征,采用施加石灰+腐殖酸、石灰+硅钙镁肥、石灰+有机肥会降低小麦中镉含量,达到安全利用。

秋葵种植区可以种植玉米、谷子、红薯等农作物,也可以种植苹果、梨、葡萄、石榴等对镉低积累水果,达到安全利用。

该区内花生中镉含量虽然没超标,但已有8件样品中花生镉含量 > 0.2 mg/kg,有1件样品接近花生国家限值0.5 mg/kg。根据花生中镉与土壤中镉无相关性,与土壤pH呈显著负相关,与镉BCF呈显著正相关,镉BCF与土壤中镉呈显著负相关特征,研究区花生中镉含量主要受pH的影响,提高镉轻微轻度污染区的土壤pH值,可以降低花生中镉含量。

## 4 结论

通过对洛阳市不同种类农作物中镉富集特征以及不同农作物和土壤中镉、硒、锌、钼以及土壤pH值相关性研究,得出如下结论:

(1)研究区717个农作物根土中镉超标点位50个,占总点位数的6.98%,农作物超标点位6个,占

总点位的0.84%,均为轻微轻度超标。农作物镉超标点占土壤镉轻微轻度超标点的12%。土壤中镉轻微轻度超标,农作物中镉超标率低。

(2)各种农作物可食部分中镉平均含量从大到小排列为:花生>秋葵>豇豆>绿豆>大豆>黑豆>芝麻>油菜籽>辣椒>小麦>大蒜>红小豆>谷子>毛豆>豆角>玉米>红薯>樱桃>石榴>梨>银条>苹果>葡萄。不同农作物镉BCF从大到小排列为:花生>豇豆>芝麻>秋葵>辣椒>大豆>绿豆>黑豆>油菜籽>谷子>小麦>大蒜>红小豆>豆角>玉米>石榴>毛豆>红薯>樱桃>梨>银条>苹果>葡萄。

(3)小麦、玉米、黑豆、大蒜、红薯中镉与土壤中镉呈显著正相关,黄豆、绿豆、梨中镉与土壤中镉呈弱正相关;石榴中镉与土壤中镉呈显著负相关,葡萄中镉与土壤中镉呈较强负相关,芝麻、苹果中镉与土壤中镉呈弱负相关;谷子、花生、油菜籽、银条中镉与土壤中镉无相关性。

(4)绿豆、黄豆中镉与pH呈较强和弱正相关;芝麻、苹果、油菜籽、谷子、花生、小麦、玉米中镉与pH呈显著负相关,黑豆、石榴、银条中镉与pH呈较强负相关,葡萄中镉与pH呈弱负相关;大蒜、红薯、梨中镉与pH无相关。

(5)芝麻、苹果、油菜籽、谷子、石榴、小麦、银条、花生、梨、红薯、玉米、大蒜、葡萄、豆角中镉BCF与pH呈负相关。绿豆、大豆、黑中镉BCF与pH呈正相关。

(6)研究区镉轻微轻度污染区,种植苹果、石榴、银条、梨、红薯、玉米、大蒜、葡萄、豆角、樱桃可以安全利用。芝麻、油菜籽、谷子、小麦、花生等对镉具有较强吸收能力的农作物,种植在碱性环境土壤中也可以安全利用。豆类作物也是镉轻微轻度污染区适合种植的农作物。

(7)研究区小麦中镉超标区种植芝麻、油菜籽、谷子、红薯、玉米等粮油作物和苹果、梨、葡萄、樱桃等均可以安全利用。也可以通过提高土壤pH值来降低小麦对镉的吸附。

(8)秋葵种植区改种玉米、黄豆、红薯等农作物或者苹果、梨、葡萄、石榴等对镉低积累水果,达到安全利用。

(9)该区内花生尽量种植在碱性土壤中,在酸性

土壤中要提高土壤pH值,可以降低花生中镉含量。

## References

- Ashayeri N Y, Keshavarzi B. 2019. Geochemical characteristics, partitioning, quantitative source apportionment, and ecological and health risk of heavy metals in sediments and water: A case study in ShadeganWetland, Iran[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 149: 110495.
- Beverley H, Evans L, Lambert R. 2012. Effects of cement or lime on Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Sb and Zn mobility infield-contaminated and Aged Soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 199(1): 119-127.
- Chang Yinchuan, Chen Yixuan, Dou Yuan, Tan Kefu, Tu Pengfei, Zeng Qingru. 2020. Comparison of soil cadmium remediation ability between black bean-rapeseed and soybean-rapeseed rotation mode[J]. *Crop Research*, 34(2): 153-157, 160 (in Chinese with English abstract).
- Chen Fei, Dong Jing, Wang Fang, Wu Feibo, Zhang Guoping, Li Guoming, Chen Zhefeng, Chen Jingxing, Wei Kang. 2007. Identification of barley genotypes with low grain Cd accumulation and its interaction with four microelements[J]. *Chemosphere*, 67(10): 2082-2088.
- Chen Jie, Wang Juan, Wang Yiwen, Yao Qixing, Su Dechun. 2021. Influencing factors of cadmium bioaccumulation factor in crops[J]. *Environmental Science*, 42(4): 2031-2039 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yanhui, Xie Tuanhui, Liang Qiaofeng, Liu Mengjiao, Zhao Mingliu, Wang Mingkuang, Wang Guo. 2016. Effectiveness of lime and peat applications on cadmium availability in a paddy soil under various moisture regimes[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(8): 7757-7766.
- Chen Yuanqi, Zhang Yu, Chen Guoliang. 2016. Remediation of heavy metal contaminated soils by lime: A review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 25(8): 1419-1424 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhijun, Song Wen, Li Peiwu, Ding Xiaoxia, Wang Min, Qian Yongzhong. 2012. Survey and dietary risk assessment of cadmium in peanut produced in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 31(2): 237-244 (in Chinese with English abstract).
- Feng Jingyun, Nie Xinxing, Liu Bo, Li Fangmin, Yang Li. 2021. Efficiency of in-situ passivation remediation in cadmium-contaminated farmland soil and its mechanism: A review[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 38(5): 764-777 (in Chinese with English abstract).
- Feng Renwei, Wei Chaoyang, Tu Shuxin, Ding Yongzhen, Song Zhengguo. 2013. A dual role of Se on Cd toxicity: Evidences from the uptake of Cd and some essential elements and the growth responses in paddy rice[J]. *Biological Trace Element Research*, 151(1): 113-121.
- Feng Yajuan, Huang Yiman, Yu Haiying, Zhang Xizhou. 2021.

- Screening of wheat materials with low cadmium accumulation in grains and characteristics of cadmium accumulation[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 41(7): 842–850 (in Chinese with English abstract).
- Grant C A, Clarke J M, Duguid S, Chaney R L. 2008. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation[J]. *Science of The Total Environment*, 390: 301–310.
- Guo Xiaojin, Hu Chengxiao, Zhao Xiaohu, Tan Qiling, Sun Xuecheng. 2015. Difference of cadmium uptake and accumulation in vegetables under different planting patterns[J]. *Acta Agriculturna Zhejiangensis*, 27(8): 1387–1393 (in Chinese with English abstract).
- Hao Bianqing, Ma Liping, Qin Shu, Wang Xia, Qiao Xiongwu. 2015. Determination and analysis of 5 kinds of heavy metal content in apple, pear, peach and jujube[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 43(3): 329–332, 336 (in Chinese with English abstract).
- He Luqiu, Yang Xuele, Zhang Lu. 2018. Difference analysis of cadmium accumulation in green bean varieties under different cadmium content background values[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, (11): 19–22 (in Chinese with English abstract).
- Hu Lizhi, Liu Hongyan, Liu Qingdong, Luo Kai, Yu Zhi, Wang Xuewen, Ran Xiaozhu. 2021. Cadmium accumulation properties of pepper and risk threshold of soils in Karst area of Guizhou Province[J]. *Ecological Science*, 40(3): 193–200 (in Chinese with English abstract).
- Hu Pengjie, Li Zhu, Wu Longhua. 2018. Current remediation technologies of heavy metal polluted farmland soil in China: Progress, challenge and countermeasure[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 39(4): 535–542 (in Chinese with English abstract).
- Huang Binhong, Hong Li, Chen Li'e, Lin Song, Huang Hongxia, Meng Peng. 2019. Quality analysis of spot check results on the products of organic vegetables and bean in Fujian Province[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 47(7): 204–208 (in Chinese with English abstract).
- Huang Bohao, Wu Qinhuizi, Xiao Heng, Meng Xiaoxia, Wu Jun. 2020. Effects of continuous lime application on Cd morphology and Cd absorption in soils contaminated by Cd[J]. *China Soil & Fertilizer*, (3): 138–143 (in Chinese with English abstract).
- Huang Gaoxiang, Ding Changfeng, Guo Fuyu, Li Xiaogang, Zhang Taolin, Wang Xingxiang. 2017. Underlying mechanisms and effects of hydrated lime and selenium application on cadmium uptake by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings[J]. *Environment Science Pollution Research*, 24(23): 18926–18935.
- Jörg R, Sabry M S. 2015. Miscellaneous additives can enhance plant uptake and affect geochemical fractions of copper in a heavily polluted riparian grassland soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 119: 58–65.
- Khodrani N E, Omrania S, Zouahri A, Douaik A, Iaaich H, Yahyaoui A., Fekhaoui M. 2019. Spatial distribution and mapping of heavy metals in agricultural soils of the Sfaaa region (Gharb, Morocco)[J]. *Materials Today: Proceedings*, 13: 832–840.
- Li Han, Huang Daoyou, Huang Shan, Tang Bin, Guo Huanle, Cao Zhongyang, Chen Songlin, Chen Zhihui. 2020. Primary research on cadmium accumulation in maize and soybean intercropping system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 39(9): 1900–1907 (in Chinese with English abstract).
- Li Min. 2017. Phytoremediation and Soil Improvement Technology of Heavy Metal Pollution in Soil Reclamation Process of Iron Tailings[D]. Ji'nan: Shandong University (in Chinese with English abstract).
- Li Ming. 2018. Study on Adjustment of Planting Pattern of Vegetable Soils Contaminated by Cadmium in Acid Zone[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University (in Chinese with English abstract).
- Li Zaohuang, Yang Wentao, Zou Jialing, Zhou Hang, Zeng Qingru, Liao Bohan. 2017. Effects of calcium magnesium phosphate fertilizer on Cd bioavailability in soil and Cd contents in rice[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 37(6): 2322–2330 (in Chinese with English abstract).
- Liao Qilin, Liu Cong, Cai Yuman, Zhu Baiwan, Wang Cheng, Hua Ming, Jin Yang. 2013. A preliminary study of element bioconcentration factors within milled rice and wheatmeal in some typical areas of Jiangsu Province[J]. *Geology in China*, 40(1): 331–340 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hui, Sun Xiulan. 2021. Determination of 18 elements in sweet potato by microwave digestion-ICP-MS[J]. *Cereal and Industry*, 1: 67–71 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chang, Xu Yingming, Huang Qingqing, Tao Xueying, Wang Lin, Sun Yubing, Zhao Lijie. 2022. Variations in cadmium accumulation and transport and ionic traits among different winter wheat varieties[J]. *Environmental Science*, 43(3): 1596–1605 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaoyang, Shi Huading, Bai Zhongke, Zhou Wei, Liu Kun, Wang Minghao, He Yujie. 2019. Heavy metal concentrations of soils near the large opencast coalmine pits in China[J]. *Chemosphere*, 244: 125360.
- Liu Xiuzhen, Ma Zhihong, Zhao Xingjie. 2014. Effect of different organic manure on cadmium form of soil and resistance of wheat in cadmium contaminated soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 28(3): 243–247. (in Chinese with English abstract).
- Liu Xuan, Zhang Shuxia, Wu Man, Wu Zhengfeng, Dai Huawei, Shen Pu, Wang Caibin. 2020. Research advances on heavy metal enrichment characteristics in peanut and its prevention and control measurements[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 52(3): 144–150 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yong, Liu Yan, Zhu Guangxu, Wu Tingliang, Liang Qing, Wang Xingxing. 2019. Effects of lime on chemical forms of heavy metals under combined pollution of Cu, Cd, Pb and Zn in soils[J]. *Environmental Engineering*, 37(2): 158–164 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yueli. 2008. Vegetation Ecological Investigation and Screening of

- Heavy Metal Hyperaccumulator Plants in Ganluo Lead-zinc Mining Area, Sichuan Province [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University (in Chinese with English abstract).
- Lu Meibin, Chen Zhijun, Li Weixi, Hu Xuexu, Li Jingmei, Wang Bujun. 2015. Survey and dietary exposure assessment of cadmium in wheat from two main wheat-producing regions in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 48(19): 3866–3876 (in Chinese with English abstract).
- Liao Qilin, Liu Chong, Cai Yuman, Zhu Baiwan, Wang Cheng, Hua Ming, Jin Yang. 2013. A preliminary study of element bioconcentration factors within milled rice and wheatmeal in some typical areas of Jiangsu Province[J]. *Geology in China*, 40(1): 331–340 (in Chinese with English abstract).
- Mahar A, Wang Ping, Alia A, Guo Zhanya, Awasthi M K, Lahori A H, Wang Quan, Shen Feng, Li Ronghua, Zhang Zengqiang. 2016. Impact of CaO, fly ash, sulfur and Na<sub>2</sub>S on the (im) mobilization and phytoavailability of Cd, Cu and Pb in contaminated soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 134(Part 1): 116–123.
- Mi Baobin, Wang Duanhua, Zhang Zhuqing, Dai Xiongze, Liu Feng, Liang Chengliang, Xie Lingling, Zhou Huoqiang. 2019. Safety evaluation of vegetables under different cadmium concentrations in soils[J]. *Agricultural Science & Technology*, 20(1): 15–21.
- Pinson Shannon R M, Tarpley Lee, Yan Wengui, Yeater Kathleen, Lahner Brett, Yakubova Elena, Huang Xinyuan, Zhang Min, Guerinot Mary Lou, Salt David E. 2015. Worldwide genetic diversity for mineral element concentrations in rice grain[J]. *Crop Science*, 55: 1–18.
- Qian Yi, Yang Lijie. 2009. Effect of cadmium pollution in soil on physiological and biochemical index of *Allium sativum* L[J]. *Agricultural Science & Technology*, 10(3): 7–10.
- Qin Xiaoming, Nie Zhaojun, Liu Hongen, Zhao Peng, Qin Shiyu, Shi Zhiwei. 2018. Influence of selenium on root morphology and photosynthetic characteristics of winter wheat under cadmium stress[J]. *Environmental & Experimental Botany*, 50: 232–239.
- Qin Zhiying, Tang Zhenzhu, Liang Jiangming, Wu Zujun, Chen Guanglin, Wu Xun, Jiang Yonghong, Huang Zhaoyong, Jianghui. 2006. Investigation and analysis of Lead, Cadmium, Arsenic and Mercury pollution in main agricultural products of Guangxi from 2002 to 2004[J]. *Micronutrients and Health Research*, 23(4): 29–32 (in Chinese with English abstract).
- Sarib Jadoon, Said Muhammad, Zakir Hilal, Muhammad Ali, Sardar Khan, Nimat Ullah Khattak. 2020. Spatial distribution of potentially toxic elements in urban soils of Abbottabad City, (N Pakistan): evaluation for potential risk[J]. *Microchemical Journal*, 153: 104489.
- Shang Guan Yuxian, Yin Hongliang, Xu Yi, Zhong Hongmei, He Mingjiang, Qin Yusheng, Guo Song, Yu Hua. 2022. Effects of different passivators on cadmium absorption in rice and wheat grains [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 31(2): 370–379. (in Chinese with English abstract).
- Shi Yijun, Xu Yingfei, Ni Zhongying, Li Dan, Zhang Minkui. 2019. Cadmium enrichment difference of Main Crops in Hangzhou and its influencing factors [J]. *Zhejiang Agricultural Sciences*, 60(7): 1230–1233 (in Chinese with English abstract).
- Tian Xiaoqin, Li Zhuo, Liu Yonghong. 2017. Characteristics of cadmium uptake by rape (*B. junica*) grown in cadmium contaminated farmland on Chengdu Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 36(3): 496–506, 497 (in Chinese with English abstract).
- Wei Xiangdong, Zou Huling, Tie Baiqing, Chen Huan, Cao Dan, Cai Lei, Fang Yayu, Yin Xiaohui. 2015. Effects of different planting patterns on concentrations and migration of soil heavy metals in dryland in southern China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 34(6): 1096–1106. (in Chinese with English abstract).
- Wang Bo, Zhang Ranran, Yang Ruyi, Shi Xiaojing, Su Nannan, Zhu Meng, Zan Shuting. 2020. Effect of exogenous selenium (Se) and Se-tolerant bacterium on the growth, physiology, and Se and cadmium (Cd) accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) grown under Cd stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 39(12): 2710–2718 (in Chinese with English abstract).
- Wu Dafu, Zhu Tongquan, Hao Yangkun. 2012. New direction of phytoremediation: Environmental protection breeding[J]. *Journal of Henan Institute of Science and Technology*, (6): 28–31 (in Chinese with English abstract).
- Wu Haiyun, Liao Qilin, Chillrud Steven N, Yang Qiang, Huang Lei, Bi Jun, Yan Beizhan. 2016. Environmental exposure to cadmium: Health risk assessment and its associations with hypertension and impaired kidney function[J]. *Scientific Reports*, 6: 29989.
- Wu Lintu, Ye Chunfu, Li Guisong, Xu Huozhong, Guo Bin, Huang Ruizhi. 2021. Screening of cadmium low accumulation rapeseed varieties suitable for planting in Zhejiang Province [J]. *Zhejiang Agricultural Sciences*, 62(4): 681–683 (in Chinese with English abstract).
- Wu Linxia, Ding Xiaoxia, Li Peiwu, Jiang Jun, Zhou Haiyan, Yin Nanri, Bai Yizhen, Chen Xiaomei. 2016. Cadmium pollution of rapeseed and quality and safety assessment of rapeseed oil in China[J]. *Quality and Safety of Agro-Products*, (1): 41–46 (in Chinese with English abstract).
- Xiang Dan, Jiao Weiping, Su Dechun. 2009. Cadmium accumulation in different organs of rapeseed with different cadmium uptake capacities[J]. *Chinese Journal of Oil Crops*, 31(1): 29–33 (in Chinese with English abstract).
- Xie Yunhe, Ji Xionghui, Wu Jiamei, Liu Saihua, Pan Shufang, Yi Hongwei. 2020. The “three highs” hyperaccumulators screening and repair cost analysis of cadmium and arsenic contaminated soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 43(S1): 116–121 (in Chinese with English abstract).
- Xu Youning, Zhang Jianghua, Liu Ruiping, Ke Hailing, Li Yujing.



2007. Analysis of environmental effects of heavy metal pollution in farmland soil of gold mining area [J]. *Geology in China*, 34(4): 716–722 (in Chinese with English abstract).
- Yang Fan, Wang Jingbin, Wang Chensheng, He Zexin, Jia Fengchao, Huang Xingkai, Zhang Xiaomin, Liu Wei, Cui Xiaoying. 2020. Geochemical characteristics and ecological risk assessment of cadmium in selenium-rich soil of Chengde City in Hebei Province[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 47(6): 163–172 (in Chinese with English abstract).
- Yang Meiyu, Zhang Hong, Ni Jinzhi, Chen Weifeng, Yang Liuming, Wei Ran. 2020. Effect of cadmium on pyrene biodegradation in solution and soil using free and immobilized *Escherichia sp.* on biochar[J]. *Applied Soil Ecology*, 150: 103472.
- Yang Yang, Li Hongliang, Liang Peng, Chen Zhipeng, Zeng Qingru. 2016. Assessment of Pb and Cd in seed oils and meals and methodology of their extraction[J]. *Food Chemistry*, 197: 482–488.
- Yang Yuzhen, Gao Baolong, Huang Yi, Xiao Dechang, Chen Fei, Luo Heng, Li Lifan, Wu Gang. 2023. The adsorption characteristics of  $Pb^{2+}$  and  $Cd^{2+}$  by straw based biochars generated at medium-high pyrolysis temperatures[J]. *Geology in China*, 50(1): 52–60 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Yubin, Zheng Shuhua. 2017. Effects of different concentrations of Se on Cd accumulation in different parts of soybeans[J]. *Environmental Protection Science*, 43(3): 116–119 (in Chinese with English abstract).
- Zhan Shaojun, Yu Hua, Feng Wenqiang, Qin Yusheng, Liao Minglan, Wang Changquan, Tu Shihua. 2011. Effects of different organic material and lime on wheat grow and cadmium uptake[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 25(2): 214–231.
- Zhang Zhuqing, Tan Dejun. 2008. Excessive Accumulation effect of Heavy Metals in Green bean, soybean and mung bean [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 36(6): 81–83(in Chinese with English abstract).
- Zhang Lei, Xing Yuquan. 2019. Study of concentration in different crops on the contaminated soil by cadmium[J]. *Journal of Tangshan University*, 32(3): 26–29, 79 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Ming, Cai Kui, Ren Yan, Sun Yonghong, Wang Wenjiao, Chen Jianmei, Chen Zhende. 2010. Bioaccumulation and transformation of Cu, Zn, Pb, Cd and Cr in different peanut (*Arachis hypogaea* L.) cultivars[J]. *Journal of Peanut Science*, 39 (3): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Shouping, Ye Xuezhu, Zhang Qi, Xiao Wendan, Chen De, Huang Miaojie, Hu Jing, Gao Na. 2021. The capacity and critical stage of Cd absorption and accumulation of different pepper cultivars[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 27(4): 695–705 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xinna, Yang Zhongfang, Yu Tao. 2023. Review on heavy metal pollution and remediation technology in the soil of mining areas[J]. *Geology in China*, 50(1): 84–101 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y, Fang X, Mu Y, Cheng Y, Ma Q, Nian H, Yang C. 2014. Metal pollution (Cd, Pb, Zn, and As) in agricultural soils and soybean, glycine max, in Southern China[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 92(4): 427–432.
- Zhou Z, Zhang B, Liu H T, Liang X, Ma W, Shi Z, Yang S. 2019. Zinc effects on cadmium toxicity in two wheat varieties (*Triticum aestivum* L.) differing in grain cadmium accumulation[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 183: 1–8.
- Zhu Guifen, Hang Chunyan, Wang Jianling, Wang Xuefeng, Chen Dejun. 2009. Investigation of heavy metal pollution in soil and wheat grains in sewageirrigated area in Sizhuangding, Xinxiang city[J]. *Journal of Agro-Agricultural Science*, 28(2): 263–268 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Linan, Hua Dangling, Yang Jinkang, Yang Qiuyun, Ren Shuaishuai, Zhang Jingjing. 2020. Effects of different amendments on chemical speciation and uptake by winter wheat in slightly alkaline soil contaminated by Cadmium[J]. *China Environmental Science*, 40(8): 3559–3566 (in Chinese with English abstract).
- Zhuang Ping, Li Zhian, Zou Bi, Xia Hanping, Wang Gang. 2013. Heavy metal contamination in soil and soybean near the Dabaoshan mine, South China[J]. *Pedosphere*, 23(3): 298–304.

#### 附中文参考文献

- 常银川, 陈奕暄, 窦源, 谭可夫, 涂鹏飞, 曾清如. 2020. 黑豆-油菜与大豆-油菜轮作模式土壤镉修复能力比较[J]. *作物研究*, 34(2): 153–157, 160.
- 陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯. 2021. 影响不同农作物镉富集系数的土壤因素[J]. *环境科学*, 42(4): 2031–2039.
- 陈远其, 张煜, 陈国梁. 2016. 石灰对土壤重金属污染修复研究进展[J]. *生态环境学报*, 25(8): 1419–1424.
- 陈志军, 宋雯, 李培武, 丁小霞, 王敏, 钱永忠. 2012. 中国花生中镉含量调查与膳食风险评估[J]. *农业环境科学学报*, 31(2): 237–244.
- 冯敬云, 聂新星, 刘波, 李方敏, 杨利. 2021. 镉污染农田原位钝化修复效果及其机理研究进展[J]. *农业资源与环境学报*, 38(5): 764–777.
- 冯亚娟, 黄议漫, 余海英, 张锡洲. 2021. 籽粒镉低积累小麦材料的筛选及稳定性分析[J]. *麦类作物学报*, 41(7): 842–850.
- 郭晓静, 胡承孝, 赵小虎, 谭启玲, 孙学成. 2015. 不同种植模式下蔬菜吸收积累镉的差异[J]. *浙江农业学报*, 27(8): 1387–1393.
- 郝变青, 马利平, 秦曙, 王霞, 乔雄梧. 2015. 苹果、梨、桃和枣4种水果5种重金属含量检测与分析[J]. *山西农业科学*, 43(3): 329–332, 336.
- 何录秋, 杨学乐, 张璐. 2018. 不同镉含量背景值下绿豆品种镉积累差异性分析[J]. *湖南农业科学*, (11): 19–22.
- 胡立志, 刘鸿雁, 刘青栋, 罗凯, 余志, 王雪雯, 冉晓追. 2021. 贵州喀斯特地区辣椒镉的累积特性及土壤风险阈值研究[J]. *生态科学*, 40(3): 193–200.
- 胡鹏杰, 李柱, 吴龙华. 2018. 我国农田土壤重金属污染修复技术、问题及对策探讨[J]. *农业现代化研究*, 39(4): 535–542.
- 黄彬红, 洪丽, 陈丽叶, 林松, 黄红霞, 孟鹏. 2019. 福建省有机蔬菜及豆类农产品抽查结果质量分析[J]. *安徽农业科学*, 7(7): 204–208.

- 黄柏豪, 吴秦慧姿, 肖亨, 孟晓霞, 伍钧. 2020. 连施石灰对Cd污染土壤Cd形态及稻麦吸收Cd的影响[J]. 中国土壤与肥料, (3): 138-143.
- 李涵, 黄道友, 黄山, 汤彬, 郭欢乐, 曹钟洋, 陈松林, 陈志辉. 2020. 玉米/大豆间作的镉累积规律初探[J]. 农业环境科学学报, 39(9): 1900-1907.
- 李敏. 2017. 铁尾矿土壤化利用过程中重金属污染的植物修复和土壤改良技术[D]. 济南: 山东大学.
- 李明. 2018. 酸性镉污染蔬菜产地种植结构调整技术探讨[D]. 南京: 南京农业大学.
- 李造煌, 杨文弢, 邹佳玲, 周航, 曾清如, 廖柏寒. 2017. 钙镁磷肥对土壤Cd生物有效性和糙米Cd含量的影响[J]. 环境科学学报, 37(6): 2322-2330.
- 廖启林, 刘聪, 蔡玉曼, 朱伯万, 王成, 华明, 金洋. 2013. 江苏典型地区水稻与小麦籽实中元素生物富集系数(BCF)初步研究[J]. 中国地质, 40(1): 331-340.
- 刘慧, 孙秀兰. 2021. 微波消解-ICP-MS法测定红薯中18种元素[J]. 粮食与饲料工业, 1: 67-71.
- 刘畅, 徐应明, 黄青青, 陶雪莹, 王林, 孙约兵, 赵立杰. 2022. 不同冬小麦品种镉富集转运及离子组特征差异[J]. 环境科学, 43(3): 1596-1605.
- 刘秀珍, 马志宏, 赵兴杰. 2014. 不同有机肥对镉污染土壤镉形态及小麦抗性的影响[J]. 水土保持学报, 28(3): 243-247.
- 刘璇, 张淑霞, 吴曼, 吴正锋, 戴华伟, 沈浦, 王才斌. 2020. 花生重金属富集特征及防控对策研究进展[J]. 山东农业科学, 52(3): 144-150.
- 刘勇, 刘燕, 朱光旭, 伍廷亮, 梁清, 王星星. 2019. 石灰对Cu、Cd、Pb、Zn复合污染土壤中重金属化学形态的影响[J]. 环境工程, 37(2): 158-164.
- 刘月莉. 2008. 四川甘洛铅锌矿区植被生态调查及重金属超富集植物的筛选[D]. 成都: 四川农业大学.
- 陆美斌, 陈志军, 李为喜, 胡学旭, 李静梅, 王步军. 2015. 中国两大优势产区小麦重金属镉含量调查与膳食暴露评估[J]. 中国农业科学, 48(19): 3866-3876.
- 覃志英, 唐振柱, 梁江明, 吴祖军, 陈广林, 吴训, 江永红, 黄兆勇, 蒋慧. 2006. 2002—2004年广西主要农产品铅镉汞污染调查分析[J]. 微量元素与健康研究, 23(4): 29-32.
- 上官宇先, 尹宏亮, 徐懿, 钟红梅, 何明江, 秦鱼生, 郭松, 喻华. 2022. 不同钝化剂对水稻小麦籽粒镉吸收的影响[J]. 生态环境学报, 31(2): 370-379.
- 石一珺, 徐颖菲, 倪中应, 王京文, 李丹, 章明奎. 2019. 杭州市主要农作物对镉的富集差异及其影响因素[J]. 浙江农业科学, 60(7): 1230-1233.
- 田效琴, 李卓, 刘永红. 2017. 成都平原农田镉污染情况及油菜镉吸收特征[J]. 农业环境科学学报, 36(3): 496-506.
- 魏祥东, 邹慧玲, 铁柏清, 陈焕, 蔡丹, 蔡蕾, 方雅瑜, 尹晓辉. 2015. 种植模式对南方旱地重金属含量及其迁移规律的影响[J]. 农业环境科学学报, 34(6): 1096-1106.
- 王波, 张然然, 杨如意, 石晓菁, 苏楠楠, 朱濛, 笄树婷. 2020. 外源硒和耐硒细菌对镉胁迫下水稻生长、生理和硒镉积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 39(12): 2710-2718.
- 吴大付, 朱统泉, 郝仰坤. 2012. 植物修复研究的新方向: 环保育种[J]. 河南科技学院学报, 40(6): 28-31.
- 吴林土, 叶春福, 李贵松, 徐火忠, 郭彬, 黄锐之. 2021. 适于浙江省种植的镉低累积油菜品种筛选试验[J]. 浙江农业科学, 62(4): 681-683.
- 武琳霞, 丁小霞, 李培武, 姜俊, 周海燕, 印南日, 白艺珍, 陈小媚. 2016. 我国油菜镉污染及菜籽油质量安全性评估[J]. 农产品质量与安全, (1): 41-46.
- 向丹, 焦卫平, 苏德纯. 2009. 不同吸镉能力油菜各器官累积镉的差异[J]. 中国油料作物学报, 31(1): 29-33.
- 谢运河, 纪雄辉, 吴家梅, 柳赛花, 潘淑芳, 易红伟. 2020. 镉污染土壤“三高”富集植物筛选与修复成本分析[J]. 环境科学与技术, 43(S1): 116-121.
- 徐友宁, 张江华, 刘瑞平, 柯海岭, 李育敬. 2007. 金矿区农田土壤重金属污染的环境效应分析[J]. 中国地质, 34(4): 716-722.
- 杨帆, 王京彬, 王晨昇, 何泽新, 贾凤超, 黄行凯, 张晓敏, 刘卫, 崔晓英. 2020. 承德市富硒土壤区镉的地球化学特征及生态风险评价[J]. 水文地质工程地质, 47(6): 163-172.
- 杨育振, 高宝龙, 黄屹, 肖德长, 陈飞, 罗恒, 李丽芬, 吴刚. 2023. 中高热解温度下秸秆基生物炭对铅、镉的吸附特性研究[J]. 中国地质, 50(1): 52-60.
- 詹绍军, 喻华, 冯文强, 秦鱼生, 廖鸣兰, 王昌全, 涂仕华. 2011. 不同有机物料与石灰对小麦吸收镉的影响[J]. 水土保持学报, 25(2): 214-231.
- 张竹青, 谭德军. 2008. 四季豆、黄豆、绿豆对重金属的超量积累效应[J]. 贵州农业科学, 36(6): 81-83.
- 张磊, 邢玉权. 2019. 不同农作物对镉污染土壤富集情况的研究[J]. 唐山学院学报, 32(3): 26-29, 79.
- 赵明, 蔡葵, 任艳, 孙永红, 王文娇, 陈建美, 陈振德. 2010. 不同花生品种重金属Cu、Zn、Pb、Cd、Cr富集与转运规律[J]. 花生学报, 9(3): 1-7.
- 赵首萍, 叶雪珠, 张棋, 肖文丹, 陈德, 黄森杰, 胡静, 高娜. 2021. 不同辣椒品种镉吸收积累能力及关键期研究[J]. 植物营养与肥料学报, 27(4): 695-705.
- 赵鑫娜, 杨忠芳, 余涛. 2023. 矿区土壤重金属污染及修复技术研究进展[J]. 中国地质, 50(1): 84-101.
- 曾宇斌, 郑淑华. 2017. 不同硒水平对大豆不同部位累积镉的影响[J]. 环境保护科学, 43(3): 116-119.
- 朱桂芬, 张春燕, 王建玲, 王学锋, 陈得军. 2009. 新乡市寺庄顶污灌区土壤及小麦重金属污染特征的研究[J]. 农业环境科学学报, 28(2): 263-268.
- 朱利楠, 化党领, 杨金康, 杨秋云, 任帅帅, 张静静. 2020. 不同改良剂对微碱性土壤镉形态及小麦吸收的影响[J]. 中国环境科学, 40(8): 3559-3566.