

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240510004

高海拔区旱地春油菜组织器官重金属迁移特征

谢园君^{1,2}, 甄国强³, 高卫虎⁴, 王丽萍^{1,2}, 肖明^{1,2*}

(1. 青海大学农牧学院, 西宁 810016; 2. 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; 3. 西宁市湟中区农产品质量安全检查中心, 西宁 811600; 4. 西宁市湟中区农机推广站, 西宁 811600)

摘要: **目的** 对高海拔某工业园区周边耕地土壤及油菜各组织器官中 Cd、Cr、Cu、Pb、Ni 和 Zn 的含量进行检测, 并分析土壤-油菜系统中 6 种重金属元素的分布特征、富集迁移规律。**方法** 使用全自动石墨炉消解仪对样品进行消解, 使用电感耦合等离子体发射光谱仪(inductively coupled plasma atomic emission spectrometer, ICP-OES), 测定土壤和油菜各组织器官中的 6 种重金属元素的含量; 结合单因子指数法和内梅罗综合指数法对重金属污染情况进行分析评价;**结果** 研究区土壤单项污染指数评价显示重金属 Cr、Cu、Pb、Ni 和 Zn 污染等级处于安全水平, Cd 污染等级处于重度污染水平。内梅罗综合污染指数评价显示综合污染等级处于中度污染水平; 油菜籽中重金属 Cd、Cr、Pb 和 Ni 的污染等级处于安全水平。不同重金属元素在油菜各部位含量差异明显, 农作物生长发育中必需元素 Zn 和 Cu 在油菜籽中含量较高, 非必需元素 Cd、Ni、Pb 和 Cr 易在油菜果荚中富集。Pb 和 Cu 具有较高的同源性, Cr、Cd 和 Zn 之间的存在拮抗作用, 而拮抗作用可能是影响重金属元素在土壤-油菜各组织器官富集迁移的重要因素。**结论** 该研究区土壤中 Cd 污染较为严重, 油菜各组织中重金属污染程度较低, 重金属元素间的拮抗作用可能是影响重金属元素在土壤-油菜各部位富集迁移的重要因素, 油菜各组织器官中重金属的残留对人体及动物健康存在安全隐患, 因此本研究可为大田试验提供方法学基础。

关键词: 耕地土壤; 重金属; 油菜; 污染评价

Characteristics of heavy metal transport in tissues and organs of spring *Brassica napus* L. in nonirrigated land

XIE Yuan-Jun^{1,2}, ZHEN Guo-Qiang³, GAO Wei-Hu⁴, WANG Li-Ping^{1,2}, XIAO Ming^{1,2*}

(1. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. 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; 3. Agricultural Product Quality and Safety Inspection Center of Huangzhong District, Xining 811600, China; 4. Huangzhong District Agricultural Machinery Extension Station, Xining 811600, China)

ABSTRACT: Objective To determine the contents of Cd, Cr, Cu, Pb, Ni and Zn in soil and *Brassica napus* L. tissues and organs around an industrial park at high altitude, and to analyze the distribution characteristics,

基金项目: 青海欣亚公招(服务)项目(2022-040)

Fund: Supported by the Qinghai Xinya Public Recruitment (Service) Project (2022-040)

*通信作者: 肖明, 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: mhmdxiao@163.com

*Corresponding author: XIAO Ming, Ph.D, Associate Professor, Qinghai Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Ningda Road, Chengbei District, Xining 810016, China. E-mail: mhmdxiao@163.com

enrichment and migration rules of 6 kinds of heavy metals in soil-*Brassica napus* L. system. **Methods** The samples were digested by automatic graphite furnace digestion apparatus, and the content of 6 kinds of heavy metals in soil and *Brassica napus* L. tissues were determined by inductively coupled plasma atomic emission spectrometer (ICP-OES). Combined with the single factor index method and Nemerow composite index method to analyze and evaluate the heavy metal pollution. **Results** The single pollution index of soil in the study area showed that the pollution levels of heavy metals Cr, Cu, Pb, Ni and Zn were in the safe level, and the pollution level of Cd was in the severe level. The comprehensive pollution index of Nemerow showed that the comprehensive pollution level was moderate. The pollution levels of heavy metals Cd, Cr, Pb and Ni in rapeseed were at safe levels. The content of different heavy metal elements in different parts of rapeseed were significantly different. The essential elements Zn and Cu were higher in rapeseed, while the non-essential elements Cd, Ni, Pb and Cr were easily enriched in rapeseed pods. Pb and Cu had high homology, and there was antagonism between Cr, Cd and Zn, which might be an important factor affecting the enrichment and migration of heavy metal elements in rape tissues and organs. **Conclusion** The Cd pollution in the soil is serious, and the heavy metal pollution in the tissues of *Brassica napus* L. is low. The degree of heavy metal pollution in soil and *Brassica napus* L. tissues in the study area is low. The antagonism between heavy metal elements may be an important factor affecting the enrichment and migration of heavy metal elements in the soil and various parts of *Brassica napus* L., and the residues of heavy metal in various tissues and organs of *Brassica napus* L. have potential safety hazards to human and animal health. Therefore, this study can provide methodological basis for field experiments.

KEY WORDS: arable soil; heavy metals; *Brassica napus* L.; pollution assessment

0 引言

土壤特别容易受到重金属污染的影响,特别是在工业区附近^[1]。农业生产和工业活动对土壤重金属污染影响较大,尤其是以有色金属冶炼、化工、采矿等典型代表的重点行业成为主要的人为源,农药、化肥过度使用以及工业和城市废物不当处理加剧了土壤重金属污染状况^[2]。而且我国的重金属污染形势已经出现了从工业向农业转移、从城区向农村转移、从地表向地下转移、从上游向下游转移、从水土污染向食品链转移,逐步积累的污染进入了突发性、连锁性、区域性并存的爆发阶段^[3]。

重金属很容易富集到作物当中,这无疑对农作物品质和产量产生了极大的影响,而且重金属具有较强的蓄积性,通过食物链在动植物身上发生生物蓄积,从而导致动物和人体健康遭受很大损害^[4]。重金属污染土壤后,农产品根部能吸收、储存或代谢植物组织内的污染物,会对人体健康构成潜在威胁^[5]。根系是作物主要的吸收器官,根系形态与作物对养分、重金属的吸收能力存在密切的关系,被认为是作物品种间重金属累积差异的重要机制之一^[6]。油菜是我国重要的粮油作物,其中秸秆是我国农作物最主要的副产物,秸秆中富含多种营养元素,因此油菜秸秆常常用来饲养牲畜和用做食用菌的培养主料,秸秆中的重金属,如 Cd、Pb 等有可能跟随食物链进入人体,可能会对各器官产生毒害,严重时甚至可能引起癌症^[7]。

有研究分析推测引起油菜籽中重金属含量差异的重要原因之一是油菜种植土壤中重金属含量的不同^[8]。张友峰等^[9]分别对油菜籽皮和仁中的 Cd 和 As 含量进行测定,结果显示,油菜籽皮中重金属 As 的平均含量约为油菜籽仁的 5 倍左右。重金属通过作物根系吸收、地上转移并累积至籽粒,通过农产品食用途径进入人体,人体长期暴露于重金属环境中,易引起人体急慢性疾病,如神经系统损伤、肾功能障碍、骨质疏松、心力衰竭,甚至癌症等^[10-12]。

近年来,研究者在分析土壤和农作物中重金属污染状况时,分析结果发现,土壤中的某些重金属含量没有超过标准限量值,而种植的农作物中出现重金属含量超过食品安全国家标准限量值的情况或土壤中重金属超标样品多而农作物样品中超标样品较少的情况。因此,协同检测重金属在土壤-作物系统中的污染状况至关重要。然而目前关于土壤-农作物不同部位中重金属富集迁移的研究相对缺乏。

本研究区为高海拔地区某工业园区周边农田,属于山地丘陵。海拔 2600~2800 m,属大陆性高原气候。耕地土壤为栗钙土,典型山旱农业区,农田种植的农作物种类主要有油菜、小麦、马铃薯、青稞和燕麦等。年平均气温约为 5℃,降水量为 450~600 mm/年,农作物生长期为平均 133 d/年,无霜期为平均 115 d/年。该研究区为某省重要的有色金属原料加工基地,以 Al、Cu、Pb、Zn、Na、Si 以及稀有金属为发展重点,具有大规模不同类型的生产企

业。工业园区开发加工金属活动是周边农田土壤中重金属的主要污染源之一,土壤重金属污染已成为矿区和工业园区主要环境问题,农作物污染、扬尘污染危及生态安全和人类健康。因此本研究通过对工业园区周边油菜及其耕地土壤中 Cd、Cr、Cu、Pb、Ni 和 Zn 等 6 种重金属的含量进行检测,并对油菜各组织器官及其耕地土壤重金属污染状况进行较科学全面的分析,另外采用生物富集系数法(bio-concentration factor, BCF)来评价油菜各组织器官对土壤中 6 种重金属的富集能力^[13],并探讨土壤-油菜体系中重金属的富集规律,以期为油菜质量监测提供方法学基础。

1 材料与方 法

1.1 材料、试剂与仪器

1.1.1 材料与试剂

Cd、Cr、Cu、Pb、Ni、Zn 元素混合标准溶液(1000 g/mL,国家有色金属及电子材料分析测试中心);硝酸、氢氟酸、高氯酸、过氧化氢(优级纯,国药集团化学试剂有限公司);土壤成分分析标准物质 GBW07454(GSS-25)(地球物理地球化学勘察研究所)。

1.1.2 仪器设备

Dena-Mini 全自动石墨消解及前处理系统(美国 Thomas Cain 公司); ICP-OES 电感耦合等离子体发射光谱仪(日本岛津公司); 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); Milli-Q Integral 水纯化系统(法国 Millipore SAS 公司)。

1.2 方 法

1.2.1 样品的采集

以高海拔地区某工业园区周边的农田为研究区,参照 NY/T 395—2012《农田土壤环境质量监测技术规范》和 NY/T 789—2004《农药残留分析样品的采样方法》,采用网格取样法,点对点等距离间隔采集 0~20 cm 耕作层的土壤样品,并在每个土壤样品采集点同步采集长势良好的 5~6 株油菜样品,确保油菜籽粒饱满,质量大约在 500 g 左右,记录装袋,带至实验室处理并分析。

1.2.2 样品预处理

(1)土壤样品预处理

将采集的土壤样品在整洁、无扬尘的场地自然风干后,过 20 目筛除去石块、杂草及动物残体,用橡胶锤破碎并用研钵研磨,采用四分法取出待测土壤,并过 100 目尼龙筛^[14],保存于自封袋中用于后续元素含量分析。

(2)油菜样品预处理

采集的油菜样品分为油菜籽、根、秸秆和果荚 4 部分。首先将油菜籽从果荚中剥离,根部和油菜秸秆在处理过程中使用陶瓷用具,秸秆统一截取靠近根部 40 cm 处的部位,然后将各部位样品先用自来水冲洗并沉淀 2~3 min,将漂

浮的杂草及黏附的土壤去除干净,再用去离子水反复冲洗 3~5 次,沥干水分后分别包装。然后置于 70℃烘箱中烘干至恒重,最后用研钵碾磨过 100 目筛,保存密封袋中备用。

1.2.3 样品消解

(1)土壤样品消解

在聚四氟乙烯消解管中加入 0.10 g 土壤样品、1.00 mL 超纯水、4.00 mL 硝酸预消解 12 h,再加入 6.00 mL 硝酸、2.00 mL 氢氟酸和 1.00 mL 高氯酸,加盖后置于全自动石墨消解炉上进行消解,消解步骤见表 1。消解液变为淡黄色时取盖赶酸,状态变为胶状物且保持不动时取出冷却,再用 1%的硝酸溶液将其溶解后用超纯水定容至 25.00 mL。每个样品做 3 个平行,同时做空白实验^[15]。

(2)油菜各组织器官消解

依次加入过 100 目筛的 0.20~0.50 g 植株样品、1.00 mL 超纯水、8.00 mL 硝酸和 2.00 mL 过氧化氢于聚四氟乙烯消解管中,利用石墨消解仪消解,消解程序见表 1,消解结束后将消解管开盖进行赶酸处理,赶酸结束后加入 1.00 mL 1%硝酸溶液溶解,再用超纯水定容至 25.00 mL。每个样品做 3 个平行,同时做空白实验。以标准物质为质控样品验证测定结果的准确性,与油菜样品同时进行消解处理^[16-17]。

表 1 石墨炉消解样品程序

Table 1 Procedures of soil sample digestion by graphite furnace

| 样品 | 步骤 | 目标温度 /°C | 保持时间 /min | 状态 |
|----|----|-------------|--------------|------------------------|
| 土壤 | 1 | 140 | 30 | 密闭,静置、消解 |
| | 2 | 150 | 180 | 密闭,每 30 min 振荡 15 s |
| | 3 | 170 | 60 | 开盖,静置、赶酸 |
| 植株 | 1 | 120 | 30 | 密闭,静置、消解 |
| | 2 | 140 | 120 | 密闭,每 30 min 振荡 15 s |
| | 3 | 160 | 60 | 开盖,静置、赶酸 |

1.2.4 重金属含量测定

(1)重金属标准系列溶液的配制

将混合标准溶液用 1% HNO₃ 溶液逐次稀释到质量浓度为 0、0.002、0.005、0.010、0.025、0.050、0.100、0.200、0.600、0.800、1.000 和 1.200 mg/L 的标准系列。

(2)样品重金属含量的测定

将消解好的土壤及油菜各组织器官样品消解液在电感耦合等离子体发射光谱仪(inductively coupled plasma atomic emission spectrometer, ICP-OES)上进行 Cd、Cr、Cu、Pb、Ni 和 Zn 等 6 种重金属元素的测定。

1.3 重金属质量评价标准

土壤重金属质量评价以文献[18]中的农用地土壤污染风险筛选值为依据;油菜作物重金属质量评价以标准 NY 86—12004《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—2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》为依据, 其中不同重金属的具体限量要求 Cr 为 1.00 mg/kg、Cd 为 0.50 mg/kg、Pb 为 0.10 mg/kg、Ni 为 1.00 mg/kg。

1.4 重金属污染程度评价方法

1.4.1 污染指数法

本研究分别采用单因子法和内梅罗综合污染指数法评价土壤重金属的污染程度, 计算公式如(1)、(2):

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

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{P_{\text{mean}}^2 + P_{\text{imax}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中, P_i 表示土壤和油菜籽重金属某个重金属的单项污染指数; C_i 是土壤和油菜籽中某个重金属的含量, mg/kg; S_i 是某个重金属在土壤和油菜籽中的限量标准值, mg/kg。 $P_{\text{综}}$ 表示重金属综合污染指数; P_{mean} 为单因子污染指数的平均值; P_{imax} 表示单一重金属单项污染指数最大值。污染程度风险等级评价标准见表 2。

表 2 土壤污染程度等级划分表
Table 2 Classification of pollution degree level

| 单因子指数(P_i) | 污染程度 | 综合污染($P_{\text{综}}$) | 污染程度 |
|----------------------|------|-------------------------------|------|
| $P_i \leq 1.0$ | 无污染 | $P_{\text{综}} \leq 0.7$ | 安全 |
| $1.0 < P_i \leq 2.0$ | 轻微污染 | $0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$ | 警戒线 |
| $2.0 < P_i \leq 3.0$ | 污染 | $1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$ | 轻度污染 |
| $3.0 < P_i \leq 5.0$ | 中度污染 | $2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$ | 中度污染 |
| $P_i > 5.0$ | 重度污染 | $P_{\text{综}} > 3.0$ | 重度污染 |

1.4.2 超标率

计算超标率可以准确客观地反映油菜及其耕作层土壤中重金属的状况, 计算公式如(3):

$$C_i' = \frac{n_i}{N_i} \times 100\% \quad (3)$$

表 3 土壤重金属总量描述性统计结果

Table 3 Descriptive statistical results of heavy metals in soil

| 元素 | 最大值/(mg/kg) | 最小值/(mg/kg) | 平均值/(mg/kg) | 变异系数/% | 土壤背景值/(mg/kg) | 风险筛选值/(mg/kg) |
|----|-------------|-------------|-------------|--------|---------------|---------------|
| Cd | 8.88 | 0.01 | 2.68 | 0.74 | 0.38 | 0.60 |
| Cr | 62.82 | 22.92 | 50.74 | 0.14 | 44.37 | 250.00 |
| Cu | 34.08 | 14.19 | 24.81 | 0.22 | 18.20 | 100.00 |
| Ni | 36.95 | 15.25 | 26.93 | 0.18 | 7.98 | 190.00 |
| Pb | 32.12 | 17.22 | 24.86 | 0.13 | 63.96 | 170.00 |
| Zn | 109.62 | 2.61 | 48.74 | 0.41 | 58.03 | 300.00 |

式中, C_i' 为重金属 i 在土壤和油菜籽中的超标率, %; n_i 为油菜籽和土壤中重金属 i 超过相应标准值的样品数; N_i 为样品总数。

1.4.3 富集系数

生物富集系数用于表征重金属从土壤到农作物的定量转移, 可作为评估作物重金属污染程度的评估指标, 有助于了解土壤重金属的生物利用度。富集系数越大, 表明油菜对该重金属元素的富集能力越强, 计算公式如(4):

$$BCF = \frac{C_{(\text{油菜})}}{C_{(\text{土壤})}} \quad (4)$$

式中, BCF 为油菜各组织器官的富集系数; $C_{(\text{油菜})}$ 为油菜籽中重金属的含量, mg/kg; $C_{(\text{土壤})}$ 为耕作层土壤中重金属的含量, mg/kg。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2021 软件对原始数据进行统计和分析, 显著性分析使用 SPSS 23.0 软件进行, 图形绘制使用 Origin 2018 软件进行。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属全量描述性统计

采集高海拔工业园区周边土壤 100 份, 经测量得到土壤 pH 最小值为 7.82, 最大值为 8.36, 平均值为 8.14, 因此以 GB 2762—2017 中 pH 大于 7.5 的农用地土壤污染风险筛选值为评价标准, 采集的土壤样品中的 6 种重金属总量的测定结果见表 3。

结合分析表 3, 耕作层土壤样品中重金属的平均含量由高到低顺序为: Cr>Zn>Ni>Pb>Cu>Cd。耕地土壤重金属 Cr、Cu、Pb、Ni 和 Zn 等 5 种重金属平均含量均未超过土壤风险筛选值, 只有 Cd 平均含量超过土壤风险筛选值。另外, 重金属 Pb 和 Zn 的平均含量均低于该研究区土壤背景值, 而 Cd、Cr、Cu 和 Ni 平均含量均高于研究区土壤背景值。研究区周边的工业园区, 主要发展有色金属和稀有金属以及电石、烧碱、化肥等产业, 因此研究区土壤超常富集重金属的现象可能主要受到人类活动的影响。

该研究区土壤单项污染指数和内梅罗综合污染指数评价结果见表 4, 其中重金属 Cd 的单项污染指数大于 3, 其余 5 种重金属的单项污染指数均小于 1, 说明重金属 Cr、Cu、Pb、Ni 和 Zn 污染等级处于安全水平, 而该研究区耕地土壤受重金属 Cd 污染等级处于重度污染水平; 另外, 内梅罗综合污染指数为 2.27, 说明该研究区耕地土壤受 6 种重金属综合污染等级处于中度污染水平。根据超标率情况分析发现所有土壤样品中 Pb、Cr、Cu、Ni 和 Zn 等重金属的平均含量均未超过农用地土壤污染风险筛选值, 说明这 5 种重金属的污染风险水平较低, 而部分耕地土壤样品中的重金属 Cd 含量相较于农用地土壤污染风险筛选值存在超标情况, 超标率达到 83.00%。上述结果表明, 研究区农田土壤主要污染风险来源于重金属元素 Cd, 这结果与双燕等^[19]研究结果一致。

表 4 土壤重金属污染评价结果

Table 4 Evaluation results of heavy metal contamination in soil

| 元素 | 单项污染指数 | 综合污染指数 | 超标率/% |
|----|-----------|--------|-------|
| Cd | 4.46±3.30 | | 83.00 |
| Cr | 0.20±0.03 | | 0.00 |
| Cu | 0.25±0.05 | 2.27 | 0.00 |
| Ni | 0.14±0.03 | | 0.00 |
| Pb | 0.15±0.02 | | 0.00 |
| Zn | 0.16±0.07 | | 0.00 |

表 5 油菜不同组织器官重金属描述性统计结果

Table 5 Descriptive statistical results of the total amount of heavy metals in different parts of *Brassica napus* L.

| 部位 | 指标 | Cd | Cr | Cu | Ni | Pb | Zn |
|----|-------------|------|------|-------|-------|------|-------|
| 根部 | 最大值/(mg/kg) | 0.11 | 0.48 | 17.82 | 5.50 | 0.35 | 78.74 |
| | 最小值/(mg/kg) | 0.03 | 0.03 | 5.47 | 0.38 | 0.08 | 19.45 |
| | 平均值/(mg/kg) | 0.07 | 0.22 | 11.36 | 1.34 | 0.21 | 46.79 |
| | 变异系数/% | 0.23 | 0.28 | 0.29 | 0.43 | 0.29 | 0.27 |
| 秸秆 | 最大值/(mg/kg) | 0.02 | 0.23 | 12.56 | 1.17 | 0.25 | 98.41 |
| | 最小值/(mg/kg) | 0.00 | 0.01 | 0.05 | 0.01 | 0.01 | 12.86 |
| | 平均值/(mg/kg) | 0.01 | 0.13 | 6.50 | 0.58 | 0.14 | 55.17 |
| | 变异系数/% | 0.64 | 0.31 | 0.47 | 0.49 | 0.34 | 0.30 |
| 果荚 | 最大值/(mg/kg) | 0.17 | 1.28 | 30.81 | 10.84 | 0.92 | 62.16 |
| | 最小值/(mg/kg) | 0.07 | 0.24 | 7.13 | 2.54 | 0.28 | 21.92 |
| | 平均值/(mg/kg) | 0.06 | 0.44 | 14.84 | 4.26 | 0.45 | 21.92 |
| | 变异系数/% | 0.34 | 0.44 | 0.38 | 0.35 | 0.27 | 0.46 |
| 菜籽 | 最大值/(mg/kg) | 0.02 | 0.19 | 11.46 | 0.46 | 0.06 | 70.40 |
| | 最小值/(mg/kg) | 0.01 | 0.09 | 4.11 | 0.20 | 0.03 | 26.00 |
| | 平均值/(mg/kg) | 0.02 | 0.15 | 7.74 | 0.32 | 0.04 | 51.88 |
| | 变异系数/% | 0.16 | 0.13 | 0.32 | 0.23 | 0.25 | 0.27 |

2.2 油菜各组织器官重金属含量描述性统计

采集油菜样品 100 份, 将油菜样品分为 4 部分, 分别为根部、秸秆、果荚和菜籽, 各部位样品中的重金属 Cd、Cr、Cu、Pb、Ni 和 Zn 含量的测定分析统计结果见表 5。

由表 5 分析可得, 油菜根部重金属的平均含量由高到低顺序为 Zn>Cu>Ni>Cr>Pb>Cd; 油菜秸秆中重金属的平均含量由高到低顺序为 Zn>Cu>Ni>Pb>Cr>Cd; 油菜果荚中重金属的平均含量由高到低顺序为 Zn>Cu>Ni>Pb>Cr>Cd; 油菜籽中重金属的平均含量由高到低顺序为 Zn>Cu>Ni>Cr>Pb>Cd。与油菜籽重金属限量值相比较, 其中 Ni、Cr、Pb、Cd 等 4 种重金属的平均含量均未超过油菜籽中重金属限量值要求。进一步分析图 1 发现, 在不同组织器官中 Cd 在根部的含量最高, 平均值为 0.07 mg/kg; 果荚中 Cr、Pb 和 Ni 的含量显著高于其他组织器官中的含量, 平均值分别为 0.44、0.45、4.26 mg/kg; 相比之下, Zn 在各个组织器官中均表现为含量最多, 可能是因为 Zn 可以提高油菜抗旱、耐低温的能力, 有利于油菜的生长。

对油菜籽重金属进行单项污染指数和内梅罗综合污染指数评价, 结果见表 6。结果表明, Cd、Zn、Cr、Pb、Ni、Cu 6 种重金属均无污染。油菜籽中重金属 Cd、Cr、Pb 和 Ni 单项污染指数均低于 1, 表明污染等级在安全水平。油菜籽重金属综合污染指数为 0.23, 表明油菜籽受 4 种重金属综合污染的等级处于安全水平。油菜籽中重金属含量相较于限量值, 均未出现超标情况, 而重金属 Cd

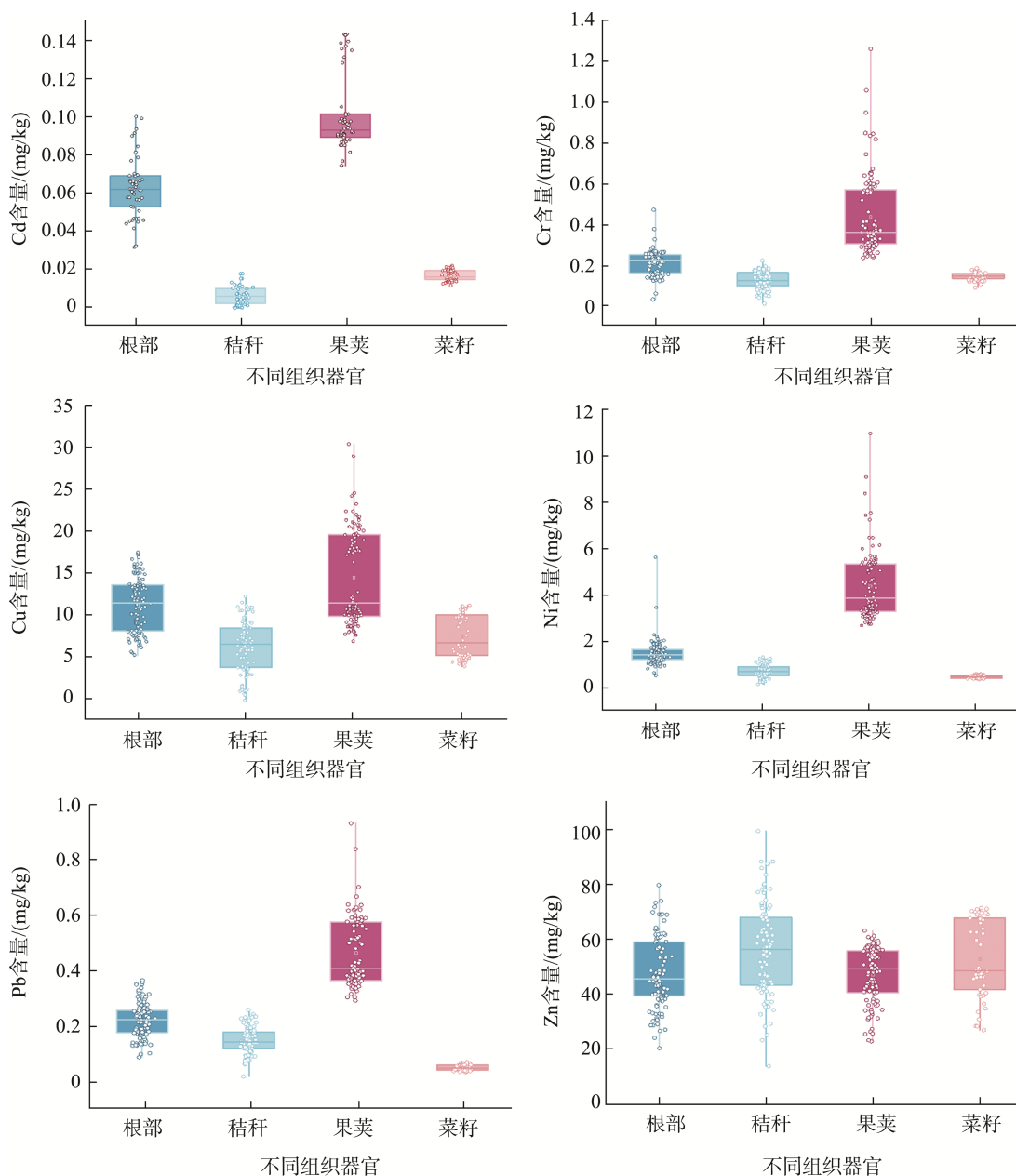


图 1 油菜各组织器官重金属元素含量箱线图

Fig.1 Boxplots of heavy metal element content in various tissues and organs of *Brassica napus* L.

表 6 油菜籽重金属污染评价结果

Table 6 Evaluation results of heavy metal contamination in *Brassica napus* L. seed

| 元素 | 单项污染指数 | 综合污染指数 | 超标率/% |
|----|-----------|--------|-------|
| Cd | 0.03±0.01 | | 0.00 |
| Cr | 0.15±0.02 | | 0.00 |
| Cu | - | 0.23 | - |
| Pb | 0.32±0.07 | | 0.00 |
| Ni | 0.42±0.10 | | 0.00 |
| Zn | - | | - |

注: -表示无。

含量在耕作层土壤中存在超标情况, 说明油菜籽对土壤中 Cd 元素的吸收积累能力弱。由此可得, 土壤污染与作物污染评价结果存在差异, 土壤中 Cd 污染超标严重且普遍存在, 而在油菜籽中并未出现 Cd 超标情况, 结果与曹丽萍^[20]对油菜籽重金属污染的评价结果相一致。

2.3 油菜各组织器官重金属来源相关性分析

研究区油菜各组织器官 6 种重金属含量间的相关性结果如图 2 所示。

由图 2 可知, 油菜根部重金属 Zn-Pb、Zn-Cu、Cu-Pb、Cd-Cu、Cd-Pb 之间呈显著正相关($P < 0.05$), 可以推测油菜根部中重金属 Zn、Pb 和 Cu 具有较高的同源性。Cr、Cu

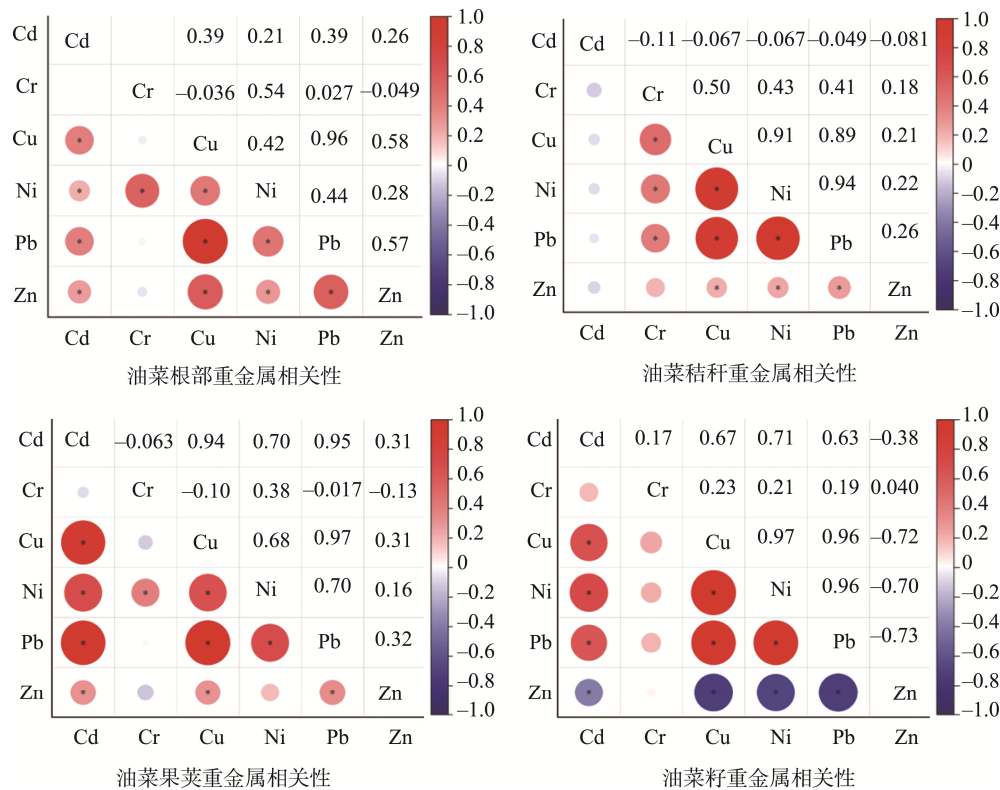


图 2 油菜各组织器官重金属来源相关性

Fig.2 Correlation of heavy metal sources in various tissues and organs of *Brassica napus* L.

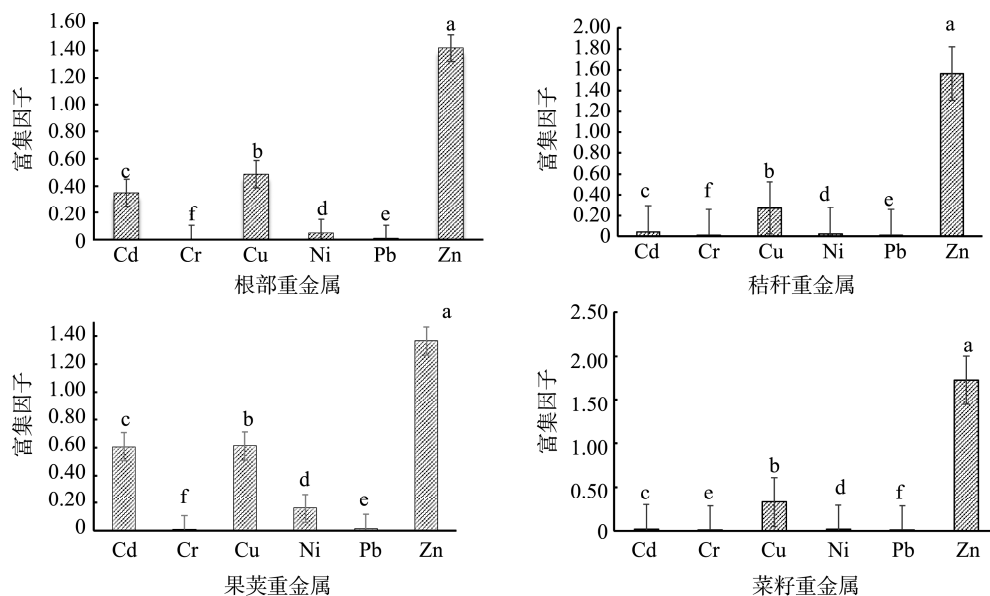
和 Zn 等 3 种重金属之间的相关系数出现负值情况, 这种情况可能是因为不同重金属之间的存在拮抗作用, 也可能是因为各个重金属之间存在竞争吸附进而导致这一情况的出现。油菜秸秆重金属 Cu-Ni、Cu-Pb、Ni-Pb 之间呈显著相关性($P<0.05$), 可以推测油菜秸秆中重金属 Ni、Pb 和 Cu、Ni 和 Pb 具有较高的同源性。油菜果荚重金属 Cd-Ni、Cd-Cu、Cd-Pb、Ni-Pb 以及 Cu-Pb 之间存在显著相关性($P<0.05$), 据此推测油菜秸秆中重金属 Cd 与 Ni、Cu、Pb 具有较高的同源性。油菜籽重金属 Cd-Ni、Cd-Cu、Cd-Pb、Ni-Pb、Cu-Pb 以及 Cu-Ni 之间存在显著相关性($P<0.05$), 由此推测油菜籽重金属 Cd 与 Ni、Cu、Pb 存在协同作用, 具有较高的同源性, 表明这 4 种重金属可能来自同一污染源, 而且重金属之间协同作用的产生可能会造成油菜籽中重金属的复合污染。另外, Zn 与 Cu、Ni、Pb 以及 Cd 两个元素之间的相关性系数为负值, 说明重金属间的拮抗或竞争吸附作用在油菜籽中也有相同表现。其中这一现象的原因可能是油菜在吸收积累重金属时, 土壤中的 Zn 与重金属 Cd 或者其他元素存在竞争关系, 这些元素在一定程度上会影响农作物对 Cd 的吸收^[21]。

值得关注的是, Pb 与多个重金属存在显著相关性, 此前有研究结果显示, 植物根系对铅的吸收机制有选择性吸收、转运蛋白质和矿质元素的共价结合, 并且植物根系的细胞膜上存在多种与 Pb 离子吸收相关的离子通道, 如 Ca

离子通道和 K 离子通道等^[22]。这些通道可以促进 Pb 离子的进入, 从而实现 Pb 离子的主动吸收, 因此这有可能是 Pb 与多个重金属存在显著相关性的一部分原因。

2.4 油菜重金属富集特征

同一蔬菜的不同部位对重金属有不同的吸收积累特征^[23], 因此通过生物富集系数法, 分析土壤重金属的生物利用度和重金属从土壤到农作物的转移情况^[24]。由图 3 可知, 研究区油菜根部重金属富集系数为 $Zn>Cu>Cd>Ni>Pb>Cr$; 油菜秸秆重金属的富集系数为 $Zn>Cu>Cd>Ni>Pb>Cr$; 油菜果荚重金属富集系数由高到低为 $Zn>Cu>Cd>Ni>Pb>Cr$, 油菜籽重金属富集系数为 $Zn>Cu>Cd>Ni>Cr>Pb$ 。综上分析, 相比之下重金属 Zn 在油菜籽中富集系数最高, 且重金属 Cd 在油菜果荚中富集系数最高, 这说明重金属元素 Zn 和 Cd 的迁移和富集部位存在显著性不同, 可能与土壤性质和污染来源相关^[25]; 油菜根部、秸秆、果荚和油菜籽中 Zn 和 Cu 的富集系数远远高于其余重金属的富集系数, 表明重金属 Zn 和 Cu 元素在土壤-油菜系统迁移、转化和富集到油菜各组织器官中的能力较强, 这种情况一方面可能与耕地施用含 Zn 肥料使得土壤中有效 Zn 含量的增加有关^[26]; 另一方面可能是因为 Cu 和 Zn 是农作物生长发育的必需元素, 会以主动吸收的方式在油菜各部位中累积, 有研究发现, Zn、Cu、Cd 在土壤-农作物系统中的协同作用会促进 Cu、Zn 向农作物迁移^[27]。



注:按照大小顺序分别在柱子上方标注 a~f。

图 3 油菜各组织器官对重金属元素生物富集特征

Fig.3 Bioenrichment characteristics of heavy metal elements in various tissues and organs of *Brassica napus* L.

根部容易积累、吸收、储存或代谢植物组织内的污染物^[28], 研究表明油菜根部和果荚中重金属 Cu 的富集系数较高, 这与代天飞^[29]发现 Cu 主要累积在油菜的根部和壳的研究结果相一致。值得注意的是, 油菜各组织器官中 Cd、Ni、Cr、Pb 的生物富集系数比 Zn 和 Cu 的生物富集系数低, 说明土壤和油菜中重金属元素的含量不存在明显的相关性^[30]。

3 结论与讨论

本研究结果表明, 采集的土壤样品中, 重金属 Cd 的平均含量超过土壤风险筛选值, 超标率为 83.00%, 单项污染指数大于 3, 处于重度污染水平; 其余 5 种重金属的单项污染指数均小于 1, 污染等级处于安全水平。在单项污染指数的基础上计算得到内梅罗综合污染指数, 结果等于 2.27, 根据分级标准可以确定这 6 种重金属的综合污染程度属于中度污染, 应该引起有关环保部门的关注和治理。采集的油菜籽样品中 Cd、Zn、Cr、Pb、Ni、Cu 6 种重金属均无污染。油菜籽中重金属 Cd、Cr、Pb 和 Ni 单项污染指数均低于 1, 表明污染等级在安全水平。油菜籽重金属综合污染指数为 0.23, 表明油菜籽综合污染等级处于安全水平。油菜籽中重金属含量相较于限量值, 均未出现超标情况, 而重金属 Cd 含量在耕作层土壤中存在超标情况, 说明油菜籽对土壤中 Cd 元素的吸收积累能力弱。

根据富集系数分析, 研究区油菜籽各组织器官对土壤中不同重金属元素迁移富集特征差异明显, Zn 元素迁移能力最强, Cr 元素迁移能力最弱, 有可能是因为在种植农作物过程中长期向耕地土壤施肥, 重金属 Cr 的生物有效

性降低, 使得 Cr 在油菜果荚中具有较强的富集作用, 而油菜籽对 Cd 的富集作用较弱; 油菜各组织器官对土壤中 Pb 的富集能力较弱, 其中油菜秸秆经常作为食用菌菌包原材料和饲料, 虽然油菜秸秆对 Pb 的富集作用较弱, 但其平均含量超过了饲料和有机肥料最高限值。油菜各部位富集的重金属, 尤其是可以作为饲料的秸秆, 通过食物链进入动物体内, 进而进入人体, 给人类健康带来潜在危害, 导致人类患上各种罕见疾病。大量研究表明重金属的污染抑制农作物的生长发育, 进而降低植物叶片中叶绿素含量及其他元素, 从而导致农作物无法进行光合作用, 抑制了油菜株高, 最终导致油菜降质减产, 且土壤中重金属元素含量和各元素间的拮抗关系等极大可能是影响重金属元素在土壤-油菜各部位富集迁移的重要因素。

本研究发现油菜植株, 尤其是根部和果荚部位富集重金属量较大, 而可食用部位菜籽中富集重金属量较低, 具有在污染农田实现“边生产边修复”的潜力。因此, 明确土壤-农作物系统中各重金属元素间的拮抗或协调关系以及农作物各部位生物富集特征等, 不仅有利于对农作物秸秆资源化利用的风险进行更加深入的评价, 也有利于从多个方面探索更加科学的安全生产措施和“脱毒”处理, 保证油菜高质高产的安全生产, 更有助于今后生态管理部门对该研究区开展针对性地安全利用修复措施。

参考文献

- 王力君, 侯博. 荧光金属-有机框架材料在识别领域的应用[J]. 金属功能材料, 2022, 29: 85-99.
- WANG LJ, HOU B. Application of fluorescent metal-organic framework materials in identification field [J]. Metal Funct Mater, 2022, 29: 85-99.

- [2] LUO L, MA YB, ZHANG SZ, *et al.* An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China [J]. *J Environ Manag*, 2009, 90(8): 2524–2530.
- [3] 赵彬, 王亮, 魏雨泉, 等. 我国农用地土壤重金属污染防治标准体系现状及展望[J]. *环境科学研究*, 2024, 37(5): 1092–1103.
ZHAO B, WANG L, WEI YQ, *et al.* Current situation and prospect of standard system for prevention and control of heavy metal pollution in agricultural soil in China [J]. *Environ Sci Res*, 2024, 37(5): 1092–1103.
- [4] 钱钱. 生物质炭对重金属-PAEs 复合污染土壤中污染物吸附行为的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2020.
QIAN Q. Effect of biochar on adsorption behavior of pollutants in soil contaminated with heavy metals and PAEs [D]. Hangzhou: Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2020.
- [5] ZAKARIA Z, ZULKAFFLEE NS, MOHD RNA, *et al.* Understanding potential heavy metal contamination, absorption, translocation and accumulation in rice and human health risks [J]. *Plants*, 2021, 10: 1070.
- [6] 高茜茜. 不同品种油菜对 Cd 的吸收累积差异[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.
GAO QL. Cumulative difference of Cd absorption in different varieties of rapeseed [D]. Beijing: China Agricultural University, 2007.
- [7] 王卫红, 梁斌, 宋怀庆. 镉铅污染下油菜和玉米食用安全性与秸秆资源化利用风险[J]. *西南科技大学学报*, 2023, 38(2): 55–61.
WANG WH, LIANG B, SONG HQ. Edible safety of rapeseed and maize and risk of straw resource utilization under cadmium and lead pollution [J]. *J Southwest Sci Technol Univ*, 2023, 38(2): 55–61.
- [8] 黎红亮, 杨洋, 陈志鹏, 等. 花生和油菜对重金属的积累及其成品油的安全性[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(5): 2488–2494.
LI HL, YANG Y, CHEN ZP, *et al.* Accumulation of heavy metals by peanut and rapeseed and safety of refined oil [J]. *China J Environ Eng*, 2015, 9(5): 2488–2494.
- [9] 张友峰, 吕和霖, 郑盼茜, 等. 油菜籽皮仁中重金属、多环芳烃和硫苷含量分布[J]. *中国油脂*, 2021, 46(7): 86–91.
ZHANG YF, LV HL, ZHENG PQ, *et al.* Content distribution of heavy metals, polycyclic aromatic hydrocarbons and sulfides in rapeseed kernels [J]. *China Oils Fats*, 2021, 46(7): 86–91.
- [10] HOUD Y, O'CONNOR D, IGALAVITHANA AD, *et al.* Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability [J]. *Nat Rev Earth Env*, 2020, 1: 366–381.
- [11] ELERT E. Rice by the numbers: A good grain [J]. *Nature*, 2014, 514: S50–S51.
- [12] ALENGEBAWY A, ABDELKHALEK ST, QURESHI SR, *et al.* Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: Ecological risks and human health implications [J]. *Toxics*, 2021, 9(3): 42.
- [13] 鄢铮, 彭琼. 马铃薯对土壤中 4 种重金属富集能力的差异[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(2): 10–17.
YAN Z, PENG Q. Differences in the enrichment ability of potato to four heavy metals in soil [J]. *China Agric Sci Bull*, 2020, 36(2): 10–17.
- [14] 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, YAN SF, *et al.* Determination and health risk assessment of heavy metal content in potato and cultivated soil [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(23): 9149–9156.
- [15] 黄盛楠. 全自动石墨消解-原子吸收法测定土壤中重金属的方法研究[J]. *绿色科技*, 2018, (12): 97–100.
HUANG SN. Study on determination of heavy metals in soil by automatic graphite digestion and atomic absorption spectrometry [J]. *Green Sci Technol*, 2018, (12): 97–100.
- [16] 王雪梅, 杜彤彤, 王娟, 等. 微波消解/ICP-MS 同时测定粮食、蔬菜中的 11 种重金属元素[J]. *分析测试学报*, 2017, 36(12): 1522–1525.
WANG XM, DU TT, WANG J, *et al.* Determination of 11 heavy metal elements in grain and vegetable by microwave digestion/ICP-MS [J]. *J Anal Test*, 2017, 36(12): 1522–1525.
- [17] ALTUNDAG H, ALBAYRAK S. Application of wet vs. microwave digestion for trace element determination in soil, vegetable, nuts, and grain samples by ICP-OES [J]. *Atom Spectrosc*, 2015, 36(4): 159–164.
- [18] 马秀花. 工业园区周边耕地土壤重金属质量评价及马铃薯质量安全响应研究[D]. 西宁: 青海大学, 2020.
MA XH. Heavy metal quality assessment of cultivated soil around industrial park and potato quality safety response study [D]. Xining: Qinghai University, 2020.
- [19] 双燕, 杨振鸿, 胡峰. 三峡库区地质高背景区土壤-油菜重金属迁移特征[J]. *三峡生态环境监测*, 2023, 8(4): 56–65.
SHUANG Y, YANG ZH, HU F. Heavy metal transport characteristics between soil and rape in the Three Gorges Reservoir Area with high geological background [J]. *Three Gorges Eco-Environ Monitor*, 2023, 8(4): 56–65.
- [20] 曹丽萍. 工业园区周边耕地土壤重金属质量评价及油菜响应研究[D]. 西宁: 青海大学, 2020.
CAO LP. Heavy metal quality assessment and rapeseed response in cultivated soil around industrial park [D]. Xining: Qinghai University, 2020.
- [21] CAI Y, CAO F, WEI K, *et al.* Genotypic dependent effect of exogenous glutathione on Cd-induced changes in proteins, ultrastructure and antioxidant defense enzymes in rice seedlings [J]. *J Hazard Mater*, 2011. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.06.011
- [22] 丁永丰. 复合改性生物炭对土壤-小白菜系统中 Cd/Pb 的迁移阻控效应及土壤 DOM 组分响应研究[D]. 开封: 河南大学, 2023.
DING YF. Effects of compound modified biochar on Cd/Pb migration and soil DOM component response in soil-Chinese cabbage system [D]. Kaifeng: Henan University, 2023.
- [23] 黎佳佳, 胡红青, 付庆灵, 等. Cd Pb 单一与复合污染对辣椒生物量及重金属残留的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, (1): 49–53.
LI JJ, HU HQ, FU QL, *et al.* Effects of single and combined Cd and Pb pollution on biomass and heavy metal residues of pepper [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2006, (1): 49–53.
- [24] 赵勇, 李红娟, 魏婷婷, 等. 土壤、蔬菜的铅污染相关性分析及土壤铅污染阈值研究[J]. *中国生态农业学报*, 2008, (4): 843–847.
ZHAO Y, LI HJ, WEI TT, *et al.* Correlation analysis of lead pollution in

- soil and vegetables and study on threshold and limit value of lead pollution in soil [J]. *China J Eco-Agric*, 2008, (4): 843–847.
- [25] 谢颖悦. 湖南某地稻田土壤重金属污染情况与其对当地人体健康风险评价[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2022.
- XIE YY. Heavy metal pollution in paddy soil and its risk assessment to local human health in Hunan province [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2022.
- [26] CAKMAK I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? [J]. *Plant Soil*, 2007, 302: 1–17.
- [27] NAN Z, LI J, ZHANG J, *et al.* Cadmium and zinc interactions and their transfer in soil-crop system under actual field conditions [J]. *Sci Total Environ*, 2002, 285(1-3): 187–195.
- [28] ZAKARIA Z, ZULKAFFLEE NS, MOHD RNA, *et al.* Understanding potential heavy metal contamination, absorption, translocation and accumulation in rice and human health risks [J]. *Plants*, 2021, 10(6): 1070.
- [29] 代天飞. 成都平原土壤重金属形态特征及其生物有效性研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2006.
- DAI TF. Study on speciation and bioavailability of heavy metals in Chengdu Plain soil [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2006.
- [30] 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 等. 广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重

金属生物有效性及迁移富集特征[J]. *环境科学*, 2020, 41(1): 449–459.

MA HH, PENG M, LIU F, *et al.* Bioavailability and migration and enrichment of heavy metals in cropland soilcrop system in typical carbonate rock areas of Guangxi, China [J]. *Environ Sci*, 2020, 41(1): 449–459.

(责任编辑: 于梦娇 蔡世佳)

作者简介



谢园君, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工与安全。

E-mail: 1037757544@qq.com



肖明, 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: mhmdxiao@163.com