

祁浩,钱相宇,万亚男,等.复合污染土壤中樱桃萝卜对镉、砷和铅的富集特征及其安全生产阈值[J].中国环境科学,2025,45(5):2598-2607.

Qi H, Qian X Y, Wan Y N, et al. Accumulation characteristics of Cd, As, and Pb in cherry radish (*Raphanus sativus* L.var.radculus pers) grown in composite polluted soil and its safe production thresholds [J]. China Environmental Science, 2025,45(5):2598-2607.

## 复合污染土壤中樱桃萝卜对镉、砷和铅的富集特征及其安全生产阈值

祁浩,钱相宇,万亚男,李花粉,王琪,庄重\* (中国农业大学资源与环境学院,农田土壤污染防治与修复北京市重点实验室,北京 100193)

**摘要:** 通过模拟不同污染程度的镉(Cd)、砷(As)和铅(Pb)复合污染土壤的盆栽试验,分析了樱桃萝卜在不同重金属污染条件下的生物量变化、矿质营养元素的吸收累积特征以及重金属累积特征,并进一步推导了酸性土壤中樱桃萝卜安全生产的土壤 Cd、As 和 Pb 阈值.结果表明:当土壤添加重金属浓度达到风险管制值时,樱桃萝卜表现出明显的毒害作用;樱桃萝卜根部的铁(Fe)、铜(Cu)和锌(Zn)含量随重金属污染程度的升高先增加后减少,而锰(Mn)含量则不断增加;樱桃萝卜根部对 Cd 的富集能力和转移最强,Cd 的富集系数(BCF)平均值分别是 As 和 Pb 的 18.6 和 115 倍,Cd 的转移系数(TF)平均值分别是 Pb 和 As 的 4.02 和 2.41 倍,樱桃萝卜根部对重金属的富集以及转移能力会受土壤中重金属浓度的影响;依据食品安全国家标准(GB 2762—2022)中规定限值,综合考虑樱桃萝卜根部和地上部的安全生产,推导出酸性土壤中樱桃萝卜安全生产的 Cd、As 和 Pb 阈值分别为 0.30、171.1 和 27.5mg/kg.

**关键词:** 重金属; 蔬菜; 矿质元素; 复合污染; 安全生产阈值

**中图分类号:** X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2025)05-2598-10

**Accumulation characteristics of Cd, As, and Pb in cherry radish (*Raphanus sativus* L.var.radculus pers) grown in composite polluted soil and its safe production thresholds.** QI Hao, QIAN Xiang-yu, WAN Ya-nan, LI Hua-fen, WANG Qi, ZHUANG Zhong\* (Beijing Key Laboratory of Farmland Soil Pollution Prevention and Remediation, College of Resource and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China). *China Environmental Science*, 2025,45(5): 2598~2607

**Abstract:** In this study, a pot experiment was conducted to simulate soil contaminated with varying levels of cadmium (Cd), arsenic (As), and lead (Pb) to investigate the changes in biomass, the absorption and accumulation of mineral nutrients, as well as the accumulation characteristics of heavy metals under different contamination conditions. Furthermore, soil threshold for Cd, As, and Pb in acidic soil were derived to ensure the safe production of cherry radish. The results indicated that cherry radish exhibited significant toxic effects when heavy metals content added in soil reached the risk control threshold. The contents of iron (Fe), copper (Cu), and zinc (Zn) in root of cherry radish increased initially and then decreased as the level of heavy metals contamination increased, while manganese (Mn) content continuously increased. The root of cherry radish had the highest enrichment and translocation ability for Cd, with average bioconcentration factors (BCF) being 18.6 and 115 times higher than those for As and Pb, respectively. The average translocation factors (TF) for Cd were 4.02 and 2.41 times higher than those for Pb and As, respectively. Based on the National Food Safety Standard (GB2762—2022), and considering the safety of both the roots and shoots of cherry radishes, the derived soil threshold values for safe cherry radish production in acidic soil were 0.30mg/kg for Cd, 171.1mg/kg for As, and 27.5mg/kg for Pb.

**Key words:** heavy metals; vegetable; mineral elements; composite pollution; safety production threshold

过量的土壤重金属会威胁生物多样性并降低农田的整体生产力<sup>[1-3]</sup>.我国菜田在过去30年间快速发展<sup>[4]</sup>,密集的农艺措施如频繁灌溉、高复种、化肥和农药的过度使用<sup>[5-6]</sup>,同时伴随着种植年限增加,重金属在菜田土壤中的累积及其对蔬菜产品的影响应当受到重视.镉(Cd)、砷(As)和铅(Pb)是菜地土壤中危害性较强的3种主要重金属污染物,并且经常以

复合污染的形式出现<sup>[7-8]</sup>.Cd、As和Pb在蔬菜中的累积会对蔬菜的产量和品质产生重要影响,进而对人体健康造成威胁.目前国内外对土壤-蔬菜系统

收稿日期: 2024-09-05

基金项目: 云南省重大科技专项(202202AE090029);现代农业产业技术体系专项(CARS-23-B-15)

\* 责任作者, 助理研究员, zhuangzhong@cau.edu.cn

中重金属的迁移累积特征已经有较多研究,蔬菜对于重金属的富集能力存在种间差异,依据蔬菜的主要食用器官分类一般表现为:叶菜类>根茎类>茄果类<sup>[9-11]</sup>。

樱桃萝卜(*Raphanus sativus* L.var.*radculus* pers)是国内当前广泛栽培的根菜类作物之一,可作为蔬菜或水果而食用,具有营养价值高、适应性强、生长速度快和生长周期短等特点,并且经济效益明显,是种植大户和普通百姓常常考虑种植的作物<sup>[12-13]</sup>。由于其肉质根为主要食用部位,根系直接接触土壤,易吸收并富集重金属元素<sup>[14-15]</sup>。樱桃萝卜的地上部,即茎叶部分又称萝卜缨,可以通过爆炒、油炸及凉拌等方式加工成熟食直接食用。然而,少有研究对樱桃萝卜地上部进行可食用安全性评价。

因此本文考虑到实际菜地土壤中可能存在多种重金属复合污染的问题,通过设置不同污染程度的 Cd、As 和 Pb 复合污染土壤处理,模拟在 3 种重金属复合污染情况下,探究樱桃萝卜在不同重金属污染条件下的生物量变化、矿质元素吸收累积的影响以及 Cd、As 和 Pb 的富集特征,结合樱桃萝卜地上部和根部均可食用的特性,综合分析了其不同食用部位的重金属累积差异,并进一步推导樱桃萝卜的安全生产土壤重金属阈值,以全面评估其不同部

位的重金属污染风险,从而为农产品安全管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 污染土壤制备

供试土壤取自山东省泰安市农田 0~20cm 表层土壤(36°12' N,116°56' E),其基本理化性质及重金属背景含量见表 1。依照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)<sup>[16]</sup>中土壤 pH 值为 5.5~6.5 时的筛选值和管制值,分别设置 6 个重金属处理,分别为不外源添加重金属、重金属浓度低于筛选值、等于筛选值、高于筛选值但低于管制值、等于管制值、高于管制值。将重金属以溶液的形式充分混入土壤中,将试剂配置成相同浓度的母液,并补充去离子水,确保加入液体体积一致,对照加等量去离子水。

添加 Cd 浓度(以 Cd 计)分别为 0,0.1,0.3,1.0,2.0 和 5.0mg/kg,添加砷浓度(以砷计)分别为 0,20,40,100,150 和 200mg/kg,添加铅浓度(以铅计)分别为 0,50,90,300,500 和 1000mg/kg,共 6 个处理(表 2),加入花盆土壤中的 Cd、As 和 Pb 分别用分析纯 Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O、分析纯 Na<sub>2</sub>HAsO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 和分析纯 Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>,每个处理 3 个重复,陈化 2 年后使用。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil

pH 值	全氮(g/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)	有机质(g/kg)	CEC(cmol/kg)	全镉(mg/kg)	全砷(mg/kg)	全铅(mg/kg)
6.1	0.64	48.13	408.38	24.19	10.92	0.16	10.43	21.1

表 2 土壤添加重金属浓度及依据标准

Table 2 The content of added heavy metals in soil and the corresponding standards

处理	镉(mg/kg)	砷(mg/kg)	铅(mg/kg)	依据标准 (GB 15618—2018)
S1	0	0	0	-
S2	0.1	20	50	低于筛选值
S3	0.3	40	90	等于筛选值
S4	1.0	100	300	介于筛选值和管制值
S5	2.0	150	500	等于管制值
S6	5.0	200	1000	高于管制值

### 1.2 盆栽试验

盆栽试验于 2022 年 10 月在中国农业大学温室中进行,将上述污染土壤过 2mm 筛后,装入花盆中,每盆装土 3kg,每个盆中加入 1.03g 尿素、0.27g 氯化

钾和 0.99g 过磷酸钙,与土壤混合均匀后,在保持田间持水量约 75%的情况下平衡一周。

供试蔬菜为樱桃萝卜,种子购买自山东寿禾种业公司。挑选籽粒饱满的樱桃萝卜种子用去离子水洗净,经过 10% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消毒 30min 后用饱和硫酸钙浸泡 4h,最后用去离子水清洗干净种子。将种子半浸入去离子水中,待种子露白后播种至盆中,待樱桃萝卜出苗后及时间苗,每盆樱桃萝卜定植 4 株。根据天气状况控制适宜的水分,蔬菜整个生长期用去离子水进行浇灌,高温时期早晚各浇一次水,保持土壤湿润,生长期及时清除盆内杂草,并在四周放置粘虫板,樱桃萝卜生长 40d 后收获,采集樱桃萝卜地上部和地下部样品。

### 1.3 样品制备与分析

植株样品的制备参考张好等<sup>[17]</sup>的方法,樱桃萝卜样品收获后,将樱桃萝卜植株的地上部和根部分开先用自来水冲洗干净,然后用去离子水清洗,用吸水纸拭干后,称量其地上部和根部鲜重.然后将样品在 105℃ 下杀青半小时,在 75℃ 下烘干 48h,称量干重,烘干后的植株样品用粉碎机磨碎处理后待用.

土壤样品称取 0.2000g,加入 8mL 王水(HCl:HNO<sub>3</sub> =3:1,体积比),冷消化过夜,使用电热消解仪消解.植株样品称取 0.2500g,加入 8mL HNO<sub>3</sub>(优级纯),冷消化过夜,使用电热消解仪消解.消解程序为:先在 80℃ 下加热 1.5h,继续升温至 120℃ 加热 1.5h,再升温至 150℃ 加热 3h.继续将温度升至 160~180℃ 进行赶酸,加热直至消解管中仅剩 1mL 消解液.待消解管冷却后,取下消解管塞,直接在消解管里加高纯水定容至 50mL,过滤到 15mL 离心管中,样品标记待后续测定.使用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS 7700; Agilent Technologies,美国)测定消解液中元素的浓度,测定过程中采用标准物质(GBW 07456 张家港长江沉积物;GBW 10049 大葱)和空白样品进行全程质量控制,元素测定回收率范围为 82%~118%.

### 1.4 数据处理

富集系数(BCF)用于表示樱桃萝卜根部对重金属的富集能力,计算公式如下:

$$BCF=C_{\text{root}}/C_{\text{soil}} \quad (1)$$

式中: $C_{\text{root}}$  表示樱桃萝卜根部重金属含量,mg/kg; $C_{\text{soil}}$  表示土壤中重金属总量(外源添加重金属含量与背景值含量之和),mg/kg.

转移系数(TF)用于表示樱桃萝卜将重金属从根部转移到地上部的能力,计算公式如下:

$$TF=C_{\text{shoot}}/C_{\text{root}} \quad (2)$$

式中: $C_{\text{shoot}}$  表示樱桃萝卜地上部重金属含量,mg/kg; $C_{\text{root}}$  表示樱桃萝卜根部重金属含量,mg/kg.

樱桃萝卜重金属污染评价采用单因子污染指数法,具体计算公式如下:

$$P_i=C_i/S_i \quad (3)$$

式中: $P_i$  为单因子污染指数; $C_i$  为污染物的实测含量,mg/kg; $S_i$  为食品中污染物限量标准,mg/kg.当  $P_i \leq 1$  时,表示樱桃萝卜未受污染;当  $P_i > 1$  时,表示樱桃萝卜受到污染.

试验数据采用 Microsoft Excel 2016 进行预处理,使用 SPSS 22.0 进行方差分析(多重比较采用

Duncan 法),使用 Origin 2024 进行图形的绘制.

## 2 结果与分析

### 2.1 樱桃萝卜生物量和微量元素含量

生物量是衡量植物生长状况的重要指标之一,能够直观地反映出重金属对植物生长的影响.在受到 Cd、As 和 Pb 复合污染土壤中,樱桃萝卜地上部和根部生物量随污染程度的变化如图 1 所示.结果表明,在不同污染程度土壤中,樱桃萝卜地上部和根部生物量范围分别为 1.07~11.77g/株和 0.31~12.56g/株.当土壤添加重金属浓度达到或超过风险管制值时(对应 S5 和 S6 土壤),樱桃萝卜表现出明显的毒害作用,主要表现为植株矮小和生长缓慢.与 S1 土壤相比,S5 和 S6 土壤中樱桃萝卜地上部生物量分别显著下降了 61.6%和 89.9%,根部生物量分别显著下降了 42.4%和 97.6%( $P < 0.05$ ).在风险管制值以下的土壤中,虽然樱桃萝卜地上部和根部生物量没有显著差异,但随着污染程度的增加,根部生物量呈现出下降趋势.

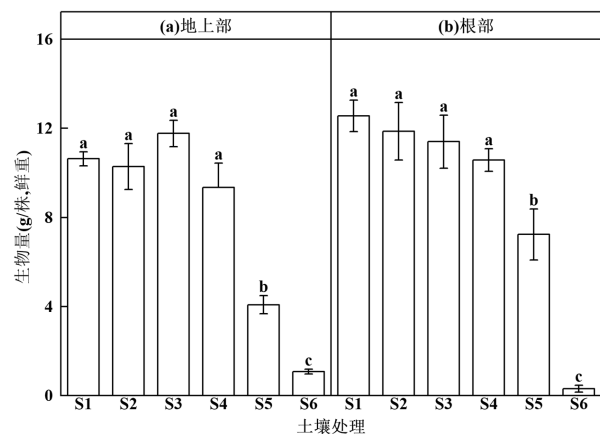


图1 樱桃萝卜地上部(a)与根部(b)的生物量

Fig.1 Biomass of shoot (a) and root (b) in cherry radish  
数据表示均值±标准误差( $n=3$ ),不同小写字母表示不同处理间具有显著性差异( $P < 0.05$ )

从图2可以看出,复合重金属污染土壤对樱桃萝卜根部 Fe、Cu 和 Zn 含量的影响基本一致,均表现为先增加后降低的趋势.在 S2 处理组中,根部 Fe、Cu 和 Zn 元素含量分别达到峰值,分别为 14.70、0.23 和 4.04mg/kg,随后随外源重金属浓度的进一步增加有所下降,其中 Fe 和 Zn 含量下降至低于 S1 组,而 Cu 含量则仍高于 S1 组.樱桃萝卜地上部 Zn 含量受复合重金属污染处理的影响较小,地上部 Fe 和 Cu 含量的变化与根部相似,地上部 Fe 和 Cu 含量分别在

S4 和 S5 处理组中达到峰值,显著高于 S1 处理组 ( $P<0.05$ ).与此同时,与 S1 组相比,S4、S5 和 S6 处理组中樱桃萝卜根部中的 Mn 元素含量显著增加了

3.1、4.2 和 7.2 倍, ( $P<0.05$ ),地上部 Mn 含量的变化与根部类似,与 S1 组相比,地上部 Mn 元素含量显著增加了 4.0、3.5 和 2.8 倍 ( $P<0.05$ ).

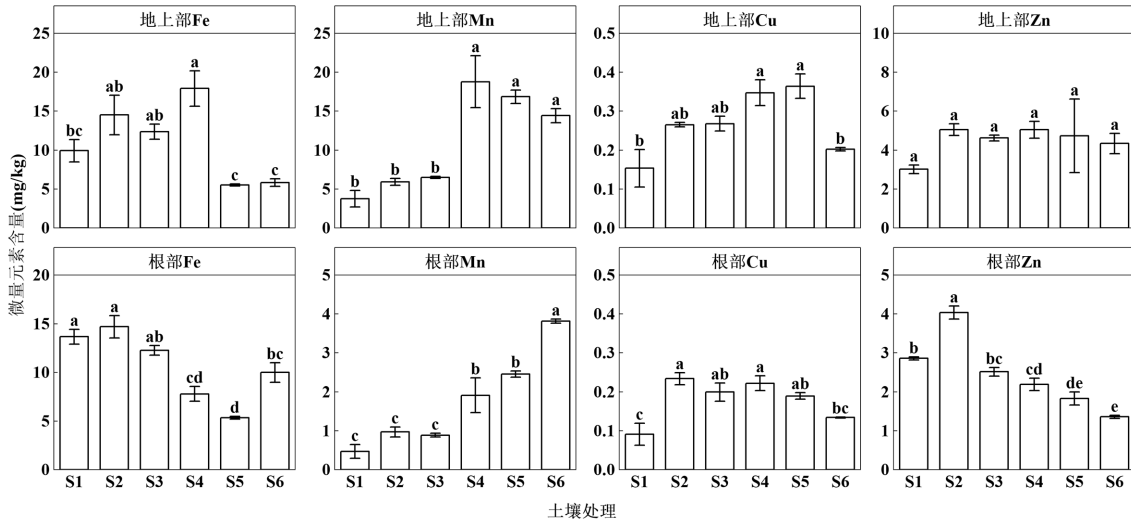


图 2 樱桃萝卜地上部和根部微量元素含量

Fig.2 Trace elements content in shoot and root of cherry radish

数据表示均值±标准误差( $n=3$ ),不同小写字母表示不同处理间具有显著性差异( $P<0.05$ )

### 2.2 樱桃萝卜不同部位重金属含量及污染评价

樱桃萝卜在不同污染程度的土壤中各部位重金属含量如图 3(a)所示,樱桃萝卜地上部 Cd、As 和 Pb 含量范围分别为 0.03~9.32,0.01~7.77 和 0.12~1.60mg/kg,根部 Cd、As 和 Pb 含量范围分别为 0.01~1.68,0.02~

8.39 和 0.02~2.80mg/kg.结果表明,在污染程度较低的处理组中(S1、S2 和 S3),樱桃萝卜植株中重金属含量没有显著的差异,而在较高浓度下才表现出显著的差异,与 S1 土壤相比,S5 和 S6 土壤中樱桃萝卜地上部和根部中三种重金属含量显著增加 ( $P<0.05$ ).

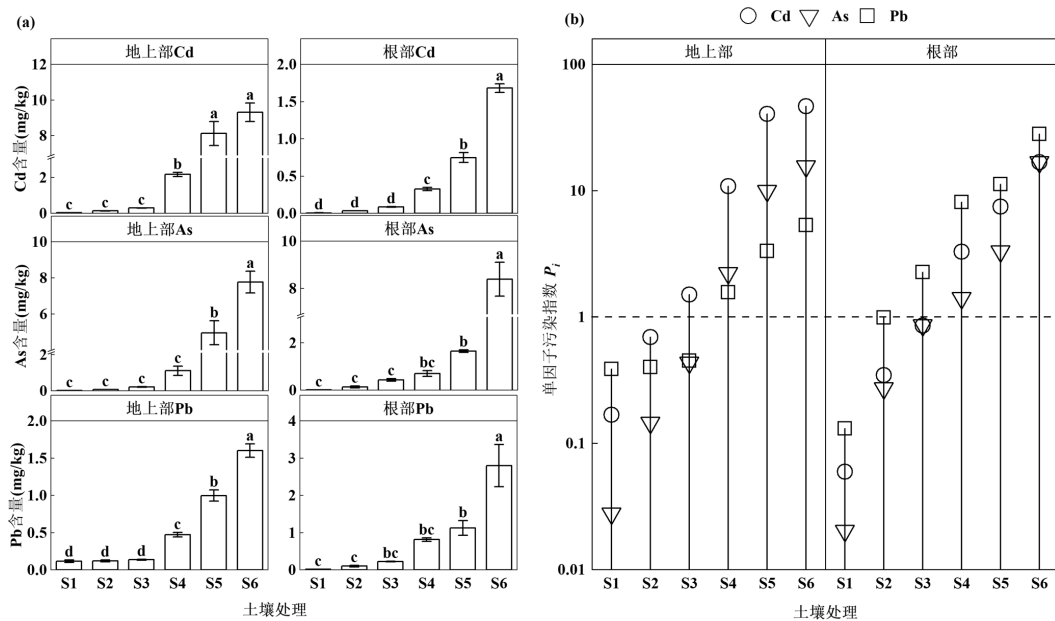


图 3 樱桃萝卜地上部和根部的重金属含量(a)以及重金属单因子污染指数(b)

Fig.3 Heavy metals content of shoot and root in cherry radish (a) and single factor pollution index of heavy metals in the shoot and root of cherry radish (b)

数据表示均值±标准误差( $n=3$ ),不同小写字母表示不同处理间具有显著性差异( $P<0.05$ )

由于地上部和根部可食用安全性评价参考的限值不同,本研究采用单因子污染指数法对樱桃萝卜地上部和根部在相同污染程度土壤中的主要污染元素进行识别(图 3(b)).根据食品安全国家标准(GB 2762—2022),根部限量指标参考块根类蔬菜限值(Cd:0.10mg/kg; As:0.50mg/kg; Pb:0.10mg/kg),地上部限量指标参考叶菜类蔬菜限值(Cd:0.20mg/kg; As:0.50mg/kg; Pb:0.30mg/kg).从图 3b 可以看出,在 S4 以及污染程度更高的 S5 和 S6 污染土壤中,樱桃萝卜地上部和根部中 3 种元素全部超标,樱桃萝卜地上部 Cd 更容易超标,而根部 Pb 更容易超标.例如,当土壤重金属浓度达到风险筛选值时(S3 土壤),樱桃萝卜地上部 Cd 超标而根部不超标,地上部的  $P_{Cd}$  达到 1.50,而此时根部  $P_{Cd}$  为 0.80;地上部的  $P_{Pb}$  为 0.45,而此时根部  $P_{Pb}$  达到 2.26.在污染土壤中(不包括 S1),地上部  $P_{Cd}$  是对应根部的 1.8~5.5 倍,而根部  $P_{Pb}$  是对应地上部的 2.5~5.2 倍.

### 2.3 樱桃萝卜对重金属的富集、转移和分配特征

樱桃萝卜根部在不同污染程度的土壤中的重金属富集系数(BCF)和转移系数(TF)如表 3 所示.结果表明,樱桃萝卜根部对 Cd、As 和 Pb 的富集系数和转移系数在不同污染程度土壤上存在一定的差异,BCF 范围分别为 0.0372~0.3464,0.0010~0.0399 和 0.0006~0.0027,TF 范围分别为 3.54~11.46,0.76~3.01 和 2.92~13.28.整体而言,樱桃萝卜根部对 Cd 的富集能力和转移最强,Cd 的 BCF 平均值分别是 As 和 Pb 的 18.6 和 115 倍,TF 平均值分别是 Pb 和 As 的 4.02 和 2.41 倍.此外,樱桃萝卜根部对重金属的富集以及转移能力也受土壤中重金属浓度的影响,其富集能力随着土壤中重金属浓度的增加而增加,在 S5 土壤中的 BCF-Cd 最高(0.3464),在 S6 土壤中的 BCF-As(0.0399)和 BCF-Pb(0.0027)最高.樱桃萝卜根部对重金属的转移能力在有外源添加的重金属的土壤上表现出了较低的转移系数,其中 S1 土壤上的 TF-Cd 和 TF-Pb 最高,分别为 11.46 和 13.28.

表 3 樱桃萝卜对重金属的富集系数和转移系数

Table 3 The bioconcentration factor and transfer factor of heavy metals of cherry radish

处理	BCF			TF		
	Cd	As	Pb	Cd	As	Pb
S1	0.0372±0.0122c	0.0010±0.0003c	0.0006±0.0002b	11.46±5.94a	1.95±0.65ab	13.28±3.70a
S2	0.1331±0.0031b	0.0045±0.0012bc	0.0014±0.0003ab	3.98±0.23a	0.76±0.30b	1.45±0.35b
S3	0.1862±0.0105b	0.0085±0.0011b	0.0020±0.0001a	3.54±0.16a	0.53±0.07b	0.60±0.05b
S4	0.2824±0.0189a	0.0064±0.0011bc	0.0025±0.0002a	6.77±0.73a	1.62±0.34ab	0.58±0.01b
S5	0.3464±0.0311a	0.0103±0.0004b	0.0022±0.0004a	10.88±0.10a	3.01±0.41a	0.96±0.16b
S6	0.3257±0.0111a	0.0399±0.0034a	0.0027±0.0006a	5.54±0.20a	0.94±0.08b	0.63±0.10b

注:数据表示均值±标准误差( $n=3$ ),同列中不同小写字母代表不同处理间的重金属富集系数或转移系数具有显著性差异( $P<0.05$ ).

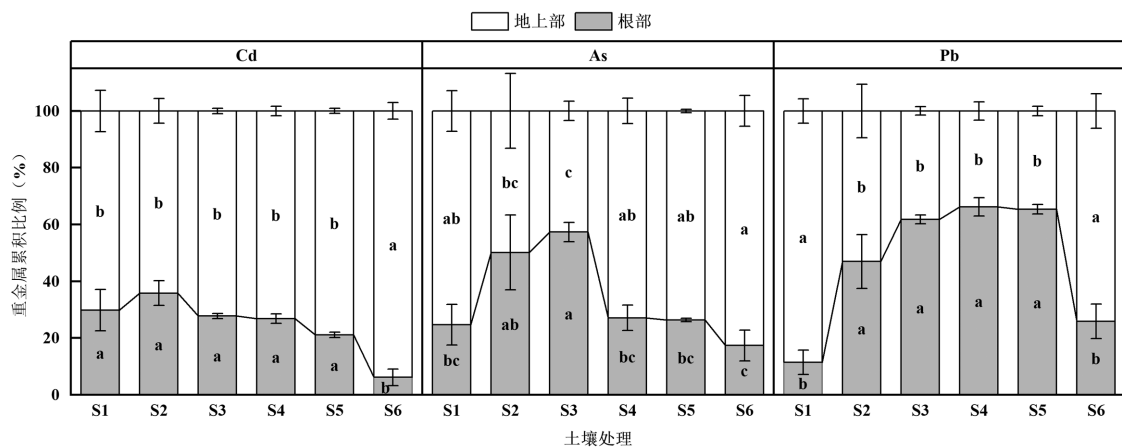


图 4 樱桃萝卜中重金属在天上部和根部的累积比例

Fig.4 The distribution of heavy metals in the shoot and root of cherry radish

数据表示均值±标准误差( $n=3$ ),不同小写字母表示同一部位不同处理间具有显著性差异( $P<0.05$ )

樱桃萝卜植株中 3 种重金属(Cd、As、Pb)的分配比例随土壤处理中外源重金属添加量的变化如图 4 所示。Cd、As 和 Pb 在地上部的累积比例分别为 64.2%~93.9%、42.7%~82.7%和 33.75%~88.52%,在根部的累积比例分别为 6.1%~35.8%、17.4%~57.3%和 11.48%~66.25%。随着 3 种外源重金属添加量的增加,重金属在根部的累积比例呈现出先增加后降低的趋势,根部 Cd、As 和 Pb 累积比例分别在 S2、S3 和 S4 处理中达到峰值。与相应的 S1 处理相比,As 和 Pb 在根部的累积比例显著增加。而与相应的累积比例最高的处理组相比,S6 处理中根部 Cd、As 和 Pb 累积比例分别显著降低了 82.9%、69.7%和 61.0% ( $P<0.05$ )。

#### 2.4 樱桃萝卜安全生产的土壤镉、砷和铅阈值推导

本研究采用线性回归方法,将土壤中重金属含量(外源添加重金属含量与土壤背景值含量之和)与樱桃萝卜地上部或根部中重金属含量进行拟合(因

S5 和 S6 处理中樱桃萝卜受毒害较严重,不纳入拟合),将食品安全国家标准(GB 2762—2022)中的限量指标分别代入拟合方程中,得出樱桃萝卜地上部和根部安全生产的土壤 Cd、As 和 Pb 阈值(图 5)。结果表明,樱桃萝卜可食用部位重金属含量与土壤中重金属含量呈极显著的线性关系( $P<0.01$ ),拟合优度范围为 0.74~0.97。

具体而言,反推出的酸性土壤中樱桃萝卜地上部安全生产的土壤 Cd、As 和 Pb 阈值分别为 0.30, 171.1 和 73.8mg/kg,根部安全生产的土壤 Cd、As 和 Pb 阈值分别为 0.46, 214.1mg/kg 和 27.5mg/kg。根部的 Cd 和 As 的阈值高于根部,而 Pb 的阈值低于地上部,樱桃萝卜根部的 Cd 和 As 阈值分别是地上部的 1.53 和 1.25 倍,而地上部 Pb 的阈值是根部的 2.68 倍。考虑到地上部和根部均为可食用部位,为生产出符合安全性的樱桃萝卜,其安全生产的土壤 Cd、As 和 Pb 的阈值分别为 0.30, 171.1mg/kg 和 27.5mg/kg。

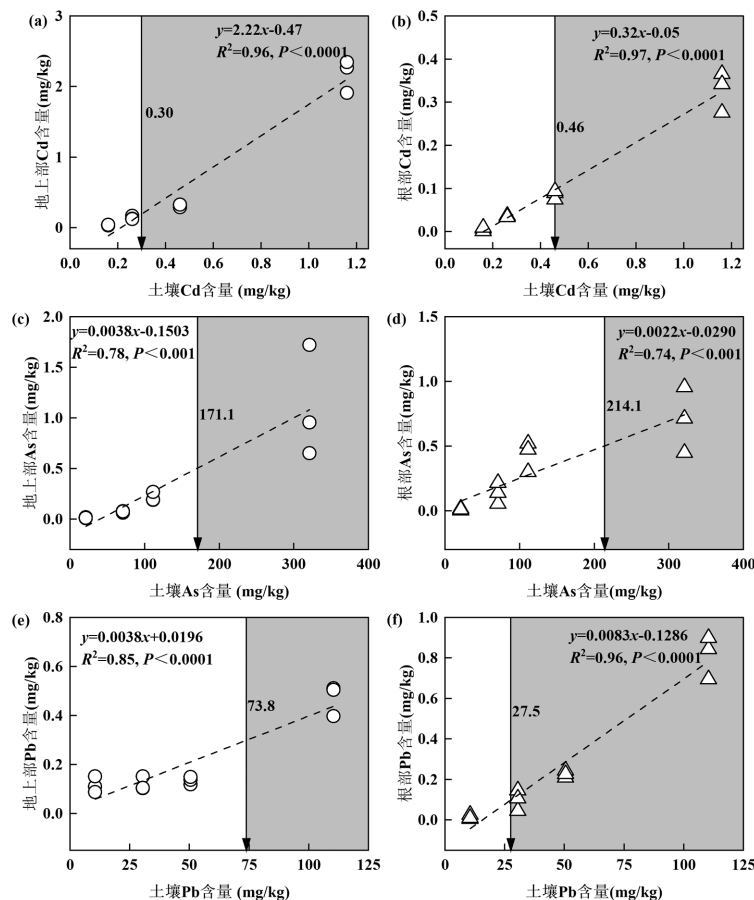


图 5 樱桃萝卜不同部位重金属含量与土壤重金属含量的线性关系及安全生产阈值

Fig.5 Linear relationship between heavy metals content in different parts of cherry radish and soil heavy metals content, and safe production thresholds

### 3 讨论

#### 3.1 不同污染程度的复合重金属胁迫对樱桃萝卜生物量的影响

本研究表明,当土壤外源添加重金属浓度达到土壤风险管制值时,樱桃萝卜地上部和根部均表现出明显的毒害症状,生物量显著降低.对植物而言,重金属是导致有害影响的重要非生物胁迫之一,过量重金属的积累会对植物造成毒性.许多研究表明,过量吸收的重金属会干扰植物的多种生化、生理过程和结构,导致其生长受到抑制甚至导致死亡<sup>[18-21]</sup>.重金属毒性的一个常见后果是活性氧(ROS)的过度积累,这可能导致酶失活、DNA 损伤及与植物细胞其他重要成分的相互作用<sup>[22]</sup>.

然而,在本研究中,当重金属浓度低于土壤风险管制值时,虽然樱桃萝卜生物量没有受到明显的抑制,但此时植物中的重金属含量大多处于较高的水平,并且对于重金属的富集能力较强,由此所带来的安全风险不容忽视,这也说明了樱桃萝卜对于中轻度复合重金属污染土壤具有比较高的耐受性.一些研究也发现低浓度的重金属不会对植物产生明显的危害<sup>[23-25]</sup>,因此在实际生产中不能仅仅依据蔬菜的长势或产量来判断蔬菜被重金属所污染的程度.本研究还发现,当土壤中重金属处理浓度超过风险筛选值时,樱桃萝卜植株中的重金属累积量才呈现出显著差异,这说明土壤中低浓度重金属对植株中重金属累积量的影响不大,但随着土壤中重金属浓度的增加可能会显著提高植株对重金属的累积量,进而危及农产品安全.

#### 3.2 不同污染程度的复合重金属胁迫对樱桃萝卜微量元素吸收的影响

本研究发现,在复合重金属污染胁迫下,樱桃萝卜根部和地上部的 Mn 含量显著增加(图 2),樱桃萝卜根部 Mn 含量的增加可能与其作为抗氧化剂的角色有关,植物可能通过增加根部 Mn 的吸收和分配来增强抗氧化防御能力,以维持细胞稳态和降低氧化损伤<sup>[26]</sup>.同样,樱桃萝卜地上部 Mn 含量也显著增加,这与 Ramos 等<sup>[27]</sup>的研究结果类似,Cd 浓度的增加导致了莴苣芽中 Mn 含量的增加,Mn 含量的增加可能是植物在叶绿体水平上对 Cd 毒性耐受的一种可能机制.铁(Fe)、锰(Mn)、铜(Cu)和锌(Zn)是植物必需

的微量元素,它们在植物中的含量较少,但在植物的生理活动、生长发育及成分形成和累积中起着重要作用<sup>[28]</sup>.在重金属胁迫下,植物可能通过增加营养供给,来补偿因重金属干扰而导致的矿质营养代谢紊乱,或通过增加对某些具有解毒作用的矿质营养元素的吸收,来增强其对重金属的解毒能力.

此外,土壤外源添加的重金属也有可能与其他矿质元素发生竞争作用从而使其解吸下来,土壤溶液中矿质元素升高使得植物体内矿质元素升高.然而,当土壤中重金属浓度过高时,大量的重金属可能抑制植物根系对矿质元素的吸收和转运<sup>[29]</sup>,这也解释了本研究中樱桃萝卜根部中的 Fe、Cu 和 Zn 含量随污染程度的升高先增加后减少.微量元素是多种酶的重要成分,细胞通过调控这些微量元素参与的代谢来缓解重金属毒害,然而,各种重金属如何同时影响微量元素在植株中的累积机制尚不完全清楚,有待后续研究证明.

#### 3.3 樱桃萝卜对重金属的富集转移和累积分配特征

本研究结果表明,在较高浓度的复合重金属污染土壤中,樱桃萝卜地上部(萝卜缨)中的重金属含量高于根部(图 3a).尽管萝卜缨中富含人体必需的 Na、K、Mg、Fe 和 Ca 等微量元素,但在高污染土壤环境下,其富集的更多的重金属可能会对食用安全性带来潜在风险.通常大部分植物吸收的重金属主要累积在植物的根部,地上部累积的重金属较少,而董克虞等<sup>[30]</sup>的研究发现,双子叶作物对于重金属的累积能力不完全遵循根>茎叶>果实这一规律,双子叶作物的生命活动旺盛部位容易积累更多的重金属,其营养物质的储存器官中的重金属含量反而更低,樱桃萝卜的营养物质储存器官主要为肉质根,这与本研究结果一致.同样,费新东等<sup>[31]</sup>的研究也表明,在相对稳定的土壤体系下,同样为双子叶植物的萝卜,其叶中 Cd 含量是根部中 Cd 含量的 3 倍左右.

富集系数的结果表明,樱桃萝卜根部对 Cd 的富集能力最强(表 3).从不同元素性质的角度来分析,镉、砷、铅、铬和汞五种元素中,由于镉的水溶性和迁移率最强,因而更容易被根系所吸收<sup>[32]</sup>.此外,樱桃萝卜具有较强的重金属转移能力,尤其是 Cd 的转移能力最强,与转移能力的结果一致,樱桃萝卜植株内 Cd 主要分布在地上部(表 3),这可能是由于 Cd<sup>2+</sup>与大量元素 Ca<sup>2+</sup>之间的竞争,Ca<sup>2+</sup>比其他金属更容易被

Cd 取代,因为它们具有相同的离子半径和化合价<sup>[33-34]</sup>,此外,钙是作物的必需元素,它可以通过主动运输进入植物组织,而大多数重金属(作为非必需元素)只能通过被动方法(如浓度扩散和渗透)进入植物组织<sup>[35]</sup>。相比之下,As 和 Pb 的转移能力较弱,且其在植物体内的分布规律较为复杂,可能与其在植物体内的化学形态和结合形式有关。然而,樱桃萝卜在重金属浓度相对较低的情况下(风险管制值以下)可能已经出现毒害作用,虽然其在生物量上的表现不显著(图 1),但其内部的生物化学和细胞层面可能已经受到比较严重的抑制效果,根部代谢受损,对于重金属的转运能力下降<sup>[23]</sup>。

此外,在污染程度较低的处理组中(S1、S2 和 S3),樱桃萝卜植株中重金属含量没有显著的差异,而在较高浓度下才表现出显著的差异,这可能是由于不同重金属元素之间的相互作用所导致。已有研究表明,复合重金属污染的效应主要表现在加合、拮抗和协同 3 种交互作用,这些交互作用可能在单一污染的情况下表现不同<sup>[36]</sup>。一方面重金属离子之间可能在土壤化学水平上产生竞争效应,从而导致重金属在土壤固相和液相之间的分配表现出差异。如梁晶等<sup>[37]</sup>的研究发现,As 的添加可以使红壤对 Cd 的吸附量和解吸量增加,并且随着 As 加入量的增加,红壤对 Cd 的吸附增量和解吸增量也增加。另一方面,这种交互作用可能体现在植物的吸收过程。赵迪<sup>[38]</sup>的研究表明,As 显著抑制了小麦根部对 Cd 的吸收。胡莹等<sup>[39]</sup>的研究表明,添加 Pb 可以显著促进 As 由根表铁膜向根系中的转运,同时,添加 As 也可以促进水稻根系对 Pb 的吸收,Pb 和 As 的交互作用明显的促进了水稻根系对 Pb 和 As 的吸收。

### 3.4 樱桃萝卜安全生产的土壤镉、砷和铅阈值

樱桃萝卜地上部和根部的 Cd、As 和 Pb 含量与土壤中镉、砷和铅含量的呈现出显著的正相关关系(图 5)。考虑到樱桃萝卜地上部和根部均可食用以及二者的重金属累积特征的不同,以食品安全国家标准(GB 2762—2022)为依据,结合不同部位的重金属的累积量与土壤重金属总量的相关方程,得出酸性土壤中樱桃萝卜安全生产的土壤 Cd、As 和 Pb 阈值分别为 0.30,171.1mg/kg 和 27.5mg/kg。结果显示,土壤 Pb 和 As 的临界值要明显高于 Cd 的临界值,这进

一步表明了樱桃萝卜对于 Cd 的累积能力要大于对于 Pb 和 As 的累积能力。与《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中  $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$  时其他用地的风险筛选值(Cd、As 和 Pb 分别为 0.3,40 和 90mg/kg)相比,本研究推导出的 Cd 阈值与国家标准相当,As 阈值是国家标准的 4.3 倍,而 Pb 则远低于国家标准,说明现行的国家标准对于樱桃萝卜种植的 As 的产地安全评价过于严格,而对于 Pb 则偏宽松。在实际农田管理中应综合考虑植物不同部位的重金属富集特征,并根据土壤污染状况和作物种类调整种植结构或制定合理的种植规范,从而降低农产品的重金属安全风险。

本研究基于盆栽试验,所添加的水溶性重金属盐的生物有效性不可避免的与大田的存在区别,这对于阈值的推导存在一定的局限性。目前,对于蔬菜安全生产阈值的推导大多仅采用作物的单一部位的重金属限量值进行反推预测,对于一些地上部和根部均可食用的蔬菜,如胡萝卜、樱桃萝卜、莴笋、甜菜和芥菜等,忽略了不同部位的重金属累积差异,这在对于此类蔬菜的安全性评价上存在一定的局限性,可能导致对实际种植环境中的风险评估出现偏差。因此,有必要针对这类蔬菜,充分考虑其不同部位的重金属累积差异来制定更加细化的安全评估标准,以确保全面的食品安全。通过更精确的评估方法,可以减少农产品安全管理中的偏差,保障消费者的健康。

## 4 结论

4.1 樱桃萝卜对于中轻度复合重金属污染土壤具有较高的耐受性,当外源重金属浓度低于土壤风险管制值时,虽然樱桃萝卜生物量没有受到明显的抑制,但高重金属含量所带来的安全风险不容忽视。

4.2 樱桃萝卜根部对重金属的富集以及转移能力会受土壤中重金属浓度的影响,地上部是富集镉(Cd)、砷(As)和铅(Pb)的主要部位,樱桃萝卜地上部 Cd 更容易超标,而根部 Pb 更容易超标。

4.3 通过回归方程计算出酸性土壤( $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$ )条件下,樱桃萝卜安全生产时土壤中 Cd、As 和 Pb 总量安全阈值分别为 0.30mg/kg、171.1mg/kg 和 27.5mg/kg,现行标准对樱桃萝卜种植中的 As 评价过于严格,而对 Pb 评价较为宽松。

## 参考文献:

- [1] Liang H, Wu W, Zhang Y, et al. Levels, temporal trend and health risk assessment of five heavy metals in fresh vegetables marketed in Guangdong Province of China during 2014~2017 [J]. *Food Control*. 2018,92:107-120.
- [2] Hou D, O Connor D, Igalavithana A D, et al. Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2020,1(7):366-381.
- [3] Ma Y, Wang Y, Chen Q, et al. Assessment of heavy metal pollution and the effect on bacterial community in acidic and neutral soils [J]. *Ecological Indicators*. 2020,117:106626.
- [4] Yang L, Huang B, Mao M, et al. Trace metal accumulation in soil and their phytoavailability as affected by greenhouse types in north China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*. 2015,22(9):6679-6686.
- [5] Tian K, Huang B, Xing Z, et al. Geochemical baseline establishment and ecological risk evaluation of heavy metals in greenhouse soils from Dongtai, China [J]. *Ecological Indicators*. 2017,72:510-520.
- [6] Kianpoor Kalkhajeh Y, Huang B, Hu W, et al. Environmental soil quality and vegetable safety under current greenhouse vegetable production management in China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2021,307:107230.
- [7] Chen Z, Muhammad I, Zhang Y, et al. Transfer of heavy metals in fruits and vegetables grown in greenhouse cultivation systems and their health risks in Northwest China [J]. *Science of the Total Environment*. 2021,766:142663.
- [8] Vejvodová K, Ash C, Dajčl J, et al. Assessment of potential exposure to As, Cd, Pb and Zn in vegetable garden soils and vegetables in a mining region [J]. *Scientific Reports*, 2022,12(1):13495.
- [9] Hu W, Zhang Y, Huang B, et al. Soil environmental quality in greenhouse vegetable production systems in eastern China: Current status and management strategies [J]. *Chemosphere*, 2017,170:183-195.
- [10] Wang B, Gao F, Qin N, et al. A comprehensive analysis on source-distribution-bioaccumulation-exposure risk of metal(loid)s in various vegetables in peri-urban areas of Shenzhen, China [J]. *Environmental Pollution*. 2022,293:118613.
- [11] 祁浩,庄坚,庄重,等.不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险 [J]. *环境科学*, 2023,44(6):3600-3608.
- Qi H, Zhuang J, Zhuang Z, et al. Enrichment characteristics of heavy metals and health risk in different vegetables [J]. *Environmental Science*, 2023,44(6):3600-3608.
- [12] 杜新民.氮锌肥配施对樱桃萝卜产量和品质的影响 [J]. *农业与技术*, 2009,29(6):69-72.
- Du X M. Effect of combined nitrogen and zinc fertilization on yield and quality of cherry radish [J]. *Agriculture & Technology*, 2009,29(6):69-72.
- [13] 李海民,叶枢华,王晋娟,等.生物炭基猪粪堆肥对土壤-樱桃萝卜系统的影响及其生态安全风险评价 [J]. *环境污染与防治*, 2023,45(8):1138-1143.
- Li X M, Ye S H, Wang J J, et al., Effects of application with biochar-based pig manure compost on soil - cherry radish system and ecological risk assessment [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2023,45(8):1138-1143.
- [14] 顾燕青,顾优丽,白倩,等.杭州市菜地蔬菜对土壤重金属的富集特性研究 [J]. *农业资源与环境学报*, 2015,(4):401-410.
- Gu Y Q, Gu Y L, Bai Q. Heavy metals accumulation characteristics of vegetables in Hangzhou city, China [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015,32(4):401-410.
- [15] 吴琦,杨菲,季辉,等.土壤重金属 Pb 和 Cd 在小萝卜中的富集特征及产地环境安全临界值 [J]. *江苏农业科学*, 2010,(4):322-325.
- Wu Q, Yang F, Ji H, et al. Accumulation characteristics of soil heavy metals Pb and Cd in radish and environmental safety thresholds of production areas [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2010,(4):322-325.
- [16] GB 15618—2018 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行) [S].
- GB 15618—2018 Soil environmental quality. Risk control standard for soil contamination of agricultural land (on trial) [S].
- [17] 张好,董春雨,杨海婵,等.昭通市农田土壤和蔬菜重金属污染评价及相关性分析 [J]. *环境科学*, 2024,45(2):1090-1097.
- Zhang H, Dong C Y, Yang H C, et al. Analysis of heavy metal pollution evaluation and correlation of farmland soil and vegetables in Zhaotong City [J]. *Environmental Science*, 2024,45(2):1090-1097.
- [18] Chatterjee J, Chatterjee C. Phytotoxicity of cobalt, chromium and copper in cauliflower [J]. *Environmental Pollution*, 2000,109(1):69-74.
- [19] öncel I, Keles Y, üstün A S. Interactive effects of temperature and heavy metal stress on the growth and some biochemical compounds in wheat seedlings [J]. *Environmental Pollution*, 2000,107(3):315-320.
- [20] Chibuikwe G U, Obiora S C. Heavy metal polluted soils: Effect on plants and bioremediation methods [J]. *Applied and Environmental Soil Science*, 2014,2014:1-12.
- [21] 杨世勇,王方,谢建春.重金属对植物的毒害及植物的耐性机制 [J]. *安徽师范大学学报(自然科学版)*, 2004,27(1):71-74,90.
- Yang S Y, Wang F, Xie J C. Toxicity of heavy metals to plants and plant tolerance mechanisms [J]. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*. 2004,27(1):71-74,90.
- [22] 张然然,张鹏,都韶婷.镉毒害下植物氧化胁迫发生及其信号调控机制的研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2016,27(3):981-992.
- Zhang R R, Zhang P, Du S T. Oxidative stress-related signals and their regulation under Cd stress: A review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*. 2016,27(3):981-992.
- [23] 潘攀,刘贝贝,吴琳,等.香蕉对砷镉铅的富集转运特征及土壤重金属安全阈值 [J]. *热带作物学报*, 2021,42(1):267-274.
- Pan P, Liu B B, Wu L, et al. Accumulation and transformation of arsenic, cadmium and lead in banana (*Musa* spp.) and their safety thresholds in soil [J]. *热带作物学报*, 2021,42(1):267-274.
- [24] 王丽香,陈虎,郭峰,等.镉胁迫对花生生长和矿质元素吸收的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2013,32(6):1106-1110.
- Wang L X, Chen H, Guo F, et al. Effects of cadmium on peanut growth and mineral nutrient uptake. *Journal of Agro-Environment Science*. 2013,32(6):1106-1110.
- [25] 张丽娜,宗良纲,任德,等.硅对低镉污染水平下水稻幼苗生长及吸收镉的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2007,26(2):494-499.
- Zhang L N, Zong L G, Ren C, et al. Effects of Si on rice seedling growth and uptake of Cd in the low level of Cd pollution. *Journal of*

- Agro-Environment Science, 2007,26(2):494-499.
- [26] Rahman A, Hossain M S, Mahmud J, et al. Manganese-induced salt stress tolerance in rice seedlings: regulation of ion homeostasis, antioxidant defense and glyoxalase systems [J]. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 2016,22(3):291-306.
- [27] Ramos I, Esteban E, Lucena J J, et al. Cadmium uptake and subcellular distribution in plants of *Lactuca* sp. Cd-Mn interaction [J]. *Plant Science (Limerick)*, 2002,162(5):761-767.
- [28] 赵国华,陈炳禄,张云霓. Cd 对蔬菜生物量和主要矿质元素吸收量的影响 [J]. *土壤通报*, 2014,45(3):722-727.  
Zhao G H, Chen B L, Zhang Y N. Effects of Cd on the biomass and mineral element absorption of four vegetables [J]. *Chinese Journal of Soil Science*. 2014,45(3):722-727.
- [29] 宋正国,徐明岗,李菊梅,等. 钙对土壤镉有效性的影响及其机理 [J]. *应用生态学报*, 2009,20(7):1705-1710.  
Song Z G, Xu M G, Li J M, et al. Effects of calcium on cadmium bioavailability in lateritic red soil and related mechanisms [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009,20(7):1705-1710.
- [30] 董克虞,陈家梅,邓小莹. 农作物对镉的吸收累积规律 [J]. *环境科学*, 1981,(3):6-11.  
Dong K Y, Chen J M, Deng X Y. Absorption and accumulation patterns of cadmium in crops [J]. *Environmental Science*, 1981, (3):6-11.
- [31] 费新东,郝国辉. 萝卜、青菜对土壤中重金属镉的累积试验初报 [J]. *南方农业*, 2020,14(36):143-144.  
Fei X D, Hao G H. Preliminary report on the accumulation of heavy metal cadmium in radish and choy sum from soil [J]. *South China Agriculture*, 2020,14(36):143-144.
- [32] Chang C Y, Yu H Y, Chen J J, et al. Accumulation of heavy metals in leaf vegetables from agricultural soils and associated potential health risks in the Pearl River Delta, South China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014,186(3):1547-1560.
- [33] Kim Y Y, Yang Y Y, Lee Y. Pb and Cd uptake in rice roots [J]. *Physiologia Plantarum*, 2002,116(3):368-372.
- [34] Chen X, Ouyang Y, Fan Y, et al. The pathway of transmembrane cadmium influx via calcium-permeable channels and its spatial characteristics along rice root [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2018,69(21):5279-5291.
- [35] Costa G, Morel J L. Cadmium uptake by *Lupinus albus* (L.): Cadmium excretion, a possible mechanism of cadmium tolerance [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1993,16(10):1921-1929.
- [36] 周启星. 复合污染生态学 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995.  
Zhou Q X. Combined-pollution ecology [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1995.
- [37] 梁 晶,徐仁扣,赵安珍,等. 砷酸根促进红壤吸附 Cd(II)的机制 [J]. *环境化学*, 2007,(4):483-486.  
Liang J, Xu R K, Zhao A Z, et al. Effect of arsenate on the mechanism of cadmium sorption onto a red soil [J]. *Environmental Chemistry*, 2007,(4):483-486.
- [38] 赵 迪. 小麦镉砷交互作用的研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2004.  
Zhao D. The study of cadmium-arsenic interaction in wheat [D]. Beijing: China Agricultural University, 2004.
- [39] 胡 莹,段桂兰,刘云霞,等. 砷-铅交互作用对水稻根表铁膜富集及根系吸收砷铅的影响 [J]. *环境化学*, 2012,31(12):1968-1973.  
Hu Y, Duan G L, Liu Y X, et al. Effects of arsenic and lead interaction on arsenic and lead accumulation in iron plaque and uptake by rice roots. [J]. *Environmental Chemistry*, 2012,31(12):1968-1973.

**作者简介:** 祁 浩(1999-),男,山西临汾人,中国农业大学博士研究生,主要从事土壤重金属污染与修复研究,qihao\_blake@163.com.