

不同叶菜品种镉积累评价及降低镉积累的措施

陈志琴, 刘奇珍, 林强, 陆利民, 陆萍, 金海洋, 黄璐璐, 杨肖娥

引用本文:

陈志琴, 刘奇珍, 林强, 陆利民, 陆萍, 金海洋, 黄璐璐, 杨肖娥. 不同叶菜品种镉积累评价及降低镉积累的措施[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(8): 1671–1681.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1362>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同小麦品种灌浆期生长和镉积累的差异研究

潘建清, 陆敏, 杨肖娥

农业环境科学学报. 2021, 40(4): 756–765 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0967>

京津冀地区设施土壤中不同蔬菜对镉的累积特征

高鑫, 颜蒙蒙, 曾希柏, 白玲玉, 王亚男, 陈清, 赵会薇, 苏世鸣

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2541–2548 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0908>

长江中下游麦区不同小麦品种镉积累差异研究

易超, 史高玲, 陈恒强, 姚澄, 潘云俊, 石月红, 李标, 高岩

农业环境科学学报. 2022, 41(6): 1164–1174 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1373>

不同玉米品种对镉的富集和转运特性

辛艳卫, 梁成华, 杜立宇, 吴岩, 张亚男, 胡悦

农业环境科学学报. 2017, 36(5): 839–846 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1668>

氮肥对双季稻根表铁膜形成及双季稻镉积累的影响

张玉盛, 周亮, 肖欢, 匡瑜, 敖和军, 田伟, 肖峰, 向焱赞, 张小毅

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 260–268 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0873>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈志琴, 刘奇珍, 林强, 等. 不同叶菜品种镉积累评价及降低镉积累的措施[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(8): 1671–1681.

CHEN Z Q, LIU Q Z, LIN Q, et al. Evaluation of cadmium accumulation in different leafy vegetable cultivars and approaches for reducing accumulation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(8): 1671–1681.



开放科学 OSID

不同叶菜品种镉积累评价及降低镉积累的措施

陈志琴¹, 刘奇珍¹, 林强¹, 陆利民³, 陆萍⁴, 金海洋², 黄璐璐², 杨肖娥^{1*}

(1. 浙江大学环境与资源学院污染环境修复与生态健康教育部重点实验室, 杭州 310058; 2. 上海市农业技术推广服务中心, 上海 201103; 3. 上海市浦东新区农业技术推广中心, 上海 201201; 4. 上海市嘉定区农业技术推广服务中心, 上海 201899)

摘要:为探明不同叶菜品种在镉污染条件下对镉的吸收、转运与积累特征, 选取适宜上海地区种植的 13 个叶菜品种[菠菜 (*Spinacia oleracea* L.)、青菜 (*Brassica rapa* var. *chinensis* (L.) Kitam.) 和生菜 (*Lactuca sativa* var. *ramosa* Hort.) 3 个种类], 比较其在镉污染农田中的镉积累差异, 并分析影响可食部位镉积累的相关因素, 同时探究土壤重金属钝化肥和重金属叶面阻控营养强化肥单独和联合施用对降低上海矮青 (*Brassica rapa* var. *chinensis* (L.) Kitam.) 镉积累的效果。结果表明: 不同叶菜品种地上部和根部镉含量存在显著差异, 总体分布规律为地上部 > 根部, 变化范围分别为 1.58~12.80 mg·kg⁻¹ (以干质量计) 和 0.24~3.54 mg·kg⁻¹ (以干质量计); 不同叶菜品种根部向可食部位转运镉的能力存在显著差异, 其中品种 V3 (新夏青 6 号) 转运系数最低, 转运系数最高品种是最低品种的 6 倍。相关性分析表明, 叶菜可食部位镉含量受根部镉含量影响最大, 受土壤总镉影响最小。叶菜具有较强的镉富集能力, 供试叶菜品种可食部位的富集系数均大于 1。施用土壤重金属钝化肥和重金属叶面阻控营养强化肥能够显著降低上海矮青可食部位镉的积累、吸收和转运。综合考虑叶菜可食部位镉含量、产量、转运系数和富集系数, 适合在该地区种植的叶菜品种为 V4 (金品鸡毛菜 3 号)、V2 (新夏青 3 号) 和 V6 (夏福), 同时, 采取合理的农艺/化学措施是降低污染土壤中重金属积累、保障农产品安全生产的有效策略。

关键词: 叶菜; 品种; 镉; 积累特征; 污染修复

中图分类号: X173; X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2022)08-1671-11 doi:10.11654/jaes.2021-1362

Evaluation of cadmium accumulation in different leafy vegetable cultivars and approaches for reducing accumulation

CHEN Zhiqin¹, LIU Qizhen¹, LIN Qiang¹, LU Limin³, LU Ping⁴, JIN Haiyang², HUANG Lulu², YANG Xiaoe^{1*}

(1. Key Laboratory of Environmental Remediation and Ecosystem Health, Ministry of Education (MOE), College of Environmental and Resources Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Shanghai Agricultural Technology Extension Service Center, Shanghai 201103, China; 3. Shanghai Pudong New District Agricultural Technology Extension Center, Shanghai 201201, China; 4. Shanghai Jiading District Agricultural Technology Extension Service Center, Shanghai 201899, China)

Abstract: Thirteen leafy vegetable varieties of three species including *Spinacia oleracea* L., *Brassica rapa* var. *chinensis* (L.) Kitam., and *Lactuca sativa* var. *ramosa* Hort. that were suitable for local cultivation planted in Cd-contaminated fields were selected to study differences in Cd accumulation and the factors influencing Cd accumulation in the edible parts. Additionally, the effects of combined treatments of soil amendments and foliage fertilizer on Cd accumulation in Shanghai Aiqing (*Brassica rapa* var. *chinensis* (L.) Kitam.) were investigated. The results showed that among the 13 leafy vegetable cultivars, there were significant differences in the Cd content in the edible parts and roots;

收稿日期: 2021-11-23 录用日期: 2022-02-17

作者简介: 陈志琴 (1997—), 女, 安徽安庆人, 硕士研究生, 从事土壤重金属修复研究。E-mail: chen_zhiqin@zju.edu.cn

*通信作者: 杨肖娥 E-mail: xeyang@zju.edu.cn

基金项目: 中轻度重金属污染土壤“边生产边修复”技术模式研究 (201902080008F01134)

Project supported: Researches on Technology Modes of Phytoremediation Coupled with Agro-production for the Moderately and Lightly Metal Contaminated Soils (201902080008F01134)

the distribution pattern generally was edible part > root. The Cd translocation ability varied clearly among the different leafy vegetable cultivars, and V3 (Xinxiaqing-6) exhibited the lowest root to edible part translocation factors. Correlation analysis showed that the Cd content of the edible part was most affected by the Cd concentration in the roots and least affected by the total Cd content of the soil. Leafy vegetables had strong Cd enrichment ability, and the bioaccumulation coefficients of the edible parts of the tested leafy vegetables were greater than 1. Soil amendment or foliage fertilizer treatments showed positive influence on reducing Cd absorption, translocation, and accumulation in Shanghai Aiqin. Considering the Cd concentration in edible parts, yield, translocation factors, and bioaccumulation coefficients, V4 (Jinpin Chinese green vegetable-3), V2 (Xinxiaqing-3), and V6 (Xiafu) are suitable varieties to be planted in this region, and the application of reasonable agronomic / chemical measures is an efficient strategy to reduce heavy metals accumulation in contaminated soil to produce safe products.

Keywords: leafy vegetable; cultivar; Cd; accumulation characteristic; contamination remediation

镉(Cd)作为一种非必需金属元素,不仅对动物和植物有一定的毒害作用,而且可以通过受污染的食物链进入人体,长期积累会对人体健康造成威胁^[1-2]。土壤中镉污染浓度过高会导致种植在该土壤上的农作物产量下降与品质降低^[3]。蔬菜不仅是人类的主要食物来源,同时也是镉摄入的主要途径之一^[4]。在众多蔬菜品种中,叶菜在我国种植范围广、消费量大,同时其对镉的积累能力最强^[5]。因此,减少毒性镉在食用部位的积累对保障食品安全生产至关重要。

为了生产可食用部分重金属含量低于最大允许浓度的安全农产品,国内外采取了许多农业措施对金属污染土壤进行修复治理,其中包括应用有机/无机改良剂,外源施用微生物肥料、生长调节剂,以及改变种植模式等^[6-8]。对于中等和轻微污染农田,由于发展中国家对粮食生产的高需求而无法采用休耕土地的方法进行修复,最好的措施是生产和种植可食部位重金属低积累的作物品种^[9]。同时还可以结合有利于降低蔬菜重金属吸收的农艺措施和化学调节剂^[10]。这种结合能够充分利用自然资源,最大限度减少重金属在土壤-植物系统间的转移,为农产品安全生产提供一种经济高效、普遍接受的边生产边修复模式。因此,筛选和培育重金属低积累的蔬菜品种能够为直接在重金属污染土壤中栽培提供适宜的蔬菜品种或为重金属低积累蔬菜品种的培育提供遗传材料。

近年来,研究者在不同蔬菜品种镉积累差异上进行了诸多研究。涂春艳等^[11]通过实地调查适宜南丹矿区种植的蔬菜品种的污染情况发现,不同蔬菜品种镉富集规律为叶菜类>茄科类>块根类>瓠果类>豇豆类,研究证实叶菜类蔬菜比其他蔬菜更容易积累重金属。此外,同属不同种叶菜也会因种间差异产生镉积累的差异,如刘桂华等^[12]用酸性黄壤进行盆栽试验比较了苋菜、油菜、芹菜 12 个蔬菜品种对镉的吸收差

异,不同蔬菜品种镉富集能力表现为苋菜>油菜>芹菜,结合聚类分析初步筛选出四季小香芹为低积累叶菜类蔬菜品种。镉在同属同基因型叶菜品种的不同部位也会存在显著差异,如大白菜、青菜和菠菜等蔬菜对重金属的吸收与积累存在物种、品种和同一作物不同器官间的显著差异^[13-14]。李学德^[15]发现菠菜镉含量在各部位中分布规律为叶>根>茎,在青菜中为叶>茎。FENG 等^[16]在田间条件下,研究了赤泥、硅钙肥、磷酸钠和钙镁肥 4 种添加剂和 2 种叶面肥(钙和锌)对 2 个品种小白菜镉毒性降低的影响,表明种植低积累作物品种的同时结合使用不同的农业措施,能够降低植物对镉的吸收和积累。

不同基因型农作物间可食部位重金属积累的差异可能导致不同的健康风险,例如,即使在轻度或非污染土壤中种植高积累水稻品种,其镉含量也可能超过食品安全标准^[17]。因此,必须对新开发或广泛种植品种的重金属积累能力进行评价,以确保重金属低积累蔬菜品种的应用,特别是在中、轻微污染农田上的种植,从而保障蔬菜安全生产。本研究采用大田试验研究了适宜上海地区广泛种植的 13 个不同叶菜品种在镉污染农田中的生长情况,镉吸收、积累与转运差异,并筛选出适合当地种植的镉低积累叶菜品种;阐明了环境和品种对蔬菜可食部位重金属含量的影响及其相互关系;同时确定了土壤重金属稳定调理剂与重金属叶面阻控营养强化肥对降低叶菜可食部位镉积累的作用。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

研究地点位于上海市浦东新区大团镇团新村某镉污染试验农田,在蔬菜种植前,按照五点取样法,采集耕层(0~20 cm)土壤样品并测定其理化性质。土壤

基本理化性质采用鲍士旦^[18]的方法测定。表层土壤阴干后磨碎过1 mm和0.149 mm筛,混匀备用。过1 mm筛土样:采用PB-10型酸度计在1:2.5的土壤/水悬浮液水土界面测定pH值;采用碱解扩散法测定土壤碱解氮含量;用中性1 mol·L⁻¹ NH₄OAc提取土壤速效钾,振荡30 min后,采用火焰光度法测定土壤速效钾含量;用0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃(pH=8.5)提取土壤有效磷,振荡30 min,采用钼锑抗比色法测定土壤有效磷含量;利用DTPA-TEA-CaCl₂(HJ 804—2016)浸提液提取(pH=7.3±0.2),采用ICP-OES测定土壤有效态镉含量。过0.149 mm筛土样:采用重铬酸钾容量法测定土壤有机质含量;采用NaOH熔融,钼锑抗比色法测定土壤全磷含量;采用NaOH熔融,火焰光度法测定土壤全钾含量;采用HNO₃-HF-HClO₄湿法消解(GB 15618—2018),ICP-MS(7500a, Agilent, 美国)测定土壤重金属全量。土壤基本理化性质见表1。

1.2 试验处理

品种筛选试验:试验共计15个叶菜品种,具体如表2所示,其中品种10(V10,常丰)与品种15(V15,华美)未出苗舍弃,共计13个处理,每个处理生物学重复3次,共39个小区,每个小区面积7.8 m²,随机区组排列。根据当地种植习惯,于2019年9月初规划小区并整好田块,叶菜种子人工撒播。蔬菜生长期间水肥管理和其他田间管理措施均按当地原有的种植习惯进行,2019年11月4日收获。

施肥试验:在品种筛选的同时进行蔬菜土壤重金属稳定调理剂和重金属叶面阻控营养强化肥单独与联合效果试验。土壤重金属稳定调理剂由兰溪欣森肥业有限公司配制,主要成分为石灰+沸石+生物炭+堆肥(菇渣有机肥),针对该试验地为碱性土壤,肥料有所改良。重金属叶面阻控营养强化肥由湖州康寿生物科技有限公司配制,主要成分为锌+铁+纳米硅+氨基酸,是一种叶面锌肥。两种肥料均为前期筛选所得,土壤重金属稳定调理剂用量为4 500 kg·hm⁻²,作基肥,重金属叶面阻控营养强化肥为15 L·hm⁻²。蔬菜选取广泛种植的叶菜品种上海矮青为研究对象,试验设4个处理,即不施土壤重金属稳定调理剂和重金

属叶面阻控营养强化肥处理(T1),单施土壤重金属稳定调理剂处理(T2),单施重金属叶面阻控营养强化肥处理(T3),土壤重金属稳定调理剂与重金属叶面阻控营养强化肥联合施用处理(T4)。每个处理重复3次,共12个小区,每个小区面积约29 m²,随机区组排列。其他操作同品种筛选试验。

1.3 样品采集与分析

叶菜成熟期,分别在品种筛选与施肥试验小区采用五点取样法共采集51份植株-土壤配对样品,每份样品均为混合样品(10株植株样品,表层0~20 cm混合土壤约1 kg)。品种筛选试验每小区割取1 m²植株,施肥试验每小区割取2 m²植株,测定产量。将植株样品分为根部和地上部,根部用20 mmol·L⁻¹ EDTA-Na₂浸泡15 min以去除吸附在根表面的元素,再用自来水冲洗干净后用去离子水润洗3次。样品置于烘箱,105 ℃杀青30 min后在65 ℃下烘干至质量恒定,称质量。将样品用粉碎机研磨过100目筛后装袋、编号、备用。植株中重金属镉采用HNO₃:H₂O₂(V:V=5:1)消解(GB/T 17141—1997)后,使用ICP-MS

表2 供试蔬菜品种
Table 2 Tested leafy vegetables cultivars

编号 Number	品种 Cultivar	种类 Variety
V1	征夏	青菜(<i>Brassica rapa</i> var. <i>chinensis</i> (L.) Kitam.)
V2	新夏青3号	青菜(<i>Brassica rapa</i> var. <i>chinensis</i> (L.) Kitam.)
V3	新夏青6号	青菜(<i>Brassica rapa</i> var. <i>chinensis</i> (L.) Kitam.)
V4	金鸡毛菜3号	青菜(<i>Brassica rapa</i> var. <i>chinensis</i> (L.) Kitam.)
V5	虹桥五号	青菜(<i>Brassica rapa</i> var. <i>chinensis</i> (L.) Kitam.)
V6	夏福	青菜(<i>Brassica rapa</i> var. <i>chinensis</i> (L.) Kitam.)
V7	华王	青菜(<i>Brassica rapa</i> var. <i>chinensis</i> (L.) Kitam.)
V8	益农	生菜(<i>Lactuca sativa</i> var. <i>ramosa</i> Hort.)
V9	种都	生菜(<i>Lactuca sativa</i> var. <i>ramosa</i> Hort.)
V10	常丰	生菜(<i>Lactuca sativa</i> var. <i>ramosa</i> Hort.)
V11	金申	菠菜(<i>Spinacia oleracea</i> L.)
V12	博丰	菠菜(<i>Spinacia oleracea</i> L.)
V13	大力士	菠菜(<i>Spinacia oleracea</i> L.)
V14	富贵快菜	青菜(<i>Brassica rapa</i> var. <i>chinensis</i> (L.) Kitam.)
V15	华美	青菜(<i>Brassica rapa</i> var. <i>chinensis</i> (L.) Kitam.)

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Selected physico-chemical properties of the tested soils

pH	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Available N/ (mg·kg ⁻¹)	总氮 Total N/ (g·kg ⁻¹)	有效磷 Available P/ (mg·kg ⁻¹)	总磷 Total P/ (g·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/ (mg·kg ⁻¹)	总钾 Total K/ (g·kg ⁻¹)	总镉 Total Cd/ (mg·kg ⁻¹)	有效镉 DTPA-Cd/ (mg·kg ⁻¹)
8.29	18.85	113.17	3.17	40.16	2.08	219.96	17.87	1.75	0.62

(7500a, Agilent, 美国)进行分析测定。

土壤样品自然风干后磨细过0.149 mm和1 mm筛,混匀备用。过0.149 mm筛土壤用于测定土壤重金属全量,采用 $\text{HNO}_3\text{--HF--HClO}_4$ 湿法消解(GB 15618—2018) 10 h后采用ICP-MS(7500a, Agilent, 美国)测定。过1 mm筛土壤用于测定土壤有效态镉含量,利用DTPA-TEA- CaCl_2 (HJ 804—2016)提取($\text{pH}=7.3\pm 0.2$) 2 h后过滤,采用ICP-OES测定。同时对土壤和植物标准样品进行消化和分析以保证准确性,土壤标准样品GBW07429[(0.21 ± 0.02) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]测定结果为(0.22 ± 0.02) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,植物标准样品GBW100351[(0.42 ± 0.02) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]测定结果为(0.41 ± 0.02) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。土壤基本理化性质采用鲍士旦^[18]的方法测定。

1.4 数据处理

采用SPSS 19.0进行单因素方差分析,Duncan新复极差法检验不同叶菜品种间植株镉含量、土壤重金属含量、产量和生物量等所有相关数据间的差异显著性($P<0.05$)。所有数据的平均值以及标准误差均采用Excel 2010软件处理,采用Origin 2021制图。

2 结果与分析

2.1 叶菜不同部位镉含量特征

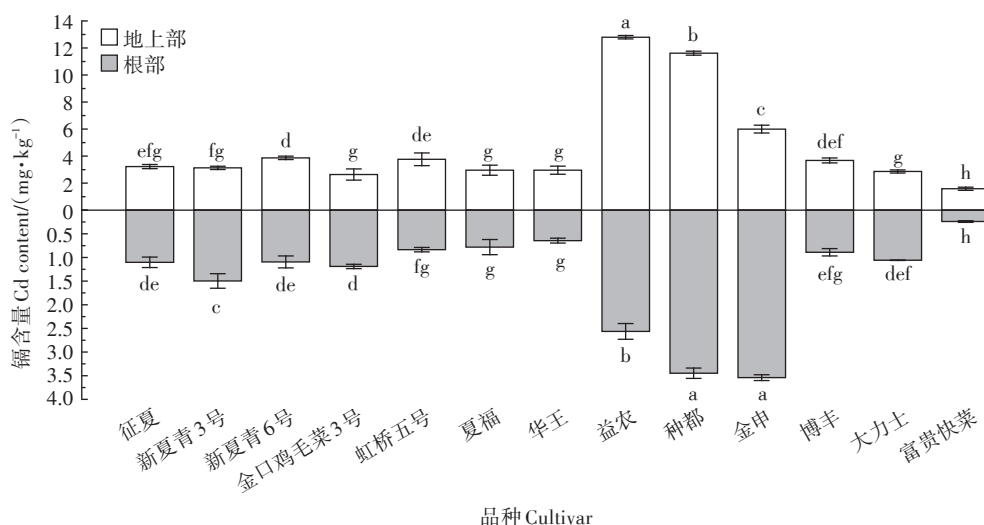
不同品种叶菜镉含量存在显著差异,同一品种叶菜不同部位的镉含量也存在显著差异,总体分布规律为地上部高于根部(图1)。所有叶菜品种的地上部镉含量范围为1.58~12.80 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (以鲜质量计,下

同),平均值为4.70 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,最高值为最低值的8.1倍。不同品种叶菜表现出生菜地上部镉含量显著高于青菜和菠菜的规律,供试生菜品种中,品种V8(益农)地上部镉含量最高,品种V9(种都)含量次之,分别为12.80 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和11.61 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。青菜地上部镉含量均低于平均镉含量,其中品种V14(富贵快菜)地上部镉含量最低,为1.58 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著低于其他叶菜品种。根据食品中污染物限量标准(GB 2762—2017),叶菜可食部位镉标准限值为0.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (以鲜质量计),不同品种叶菜可食部位镉含量超标情况如表3所示:供试生菜和菠菜镉含量均超出了限量标准,且生菜超标程度显著高于菠菜,而供试的所有青菜品种均未出现超标情况。

不同品种叶菜根部镉含量变化范围为0.24~3.54 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为1.45 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,根部镉含量表现为生菜品种普遍高于青菜和菠菜。在供试生菜品种中,品种V9(种都)根部镉含量(3.45 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)显著高于品种V8(益农)(2.56 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。在所有叶菜品种中,品种V11(金申)菠菜根部镉含量最高,达到3.54 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其他菠菜品种与青菜品种根部镉含量均普遍低于平均根部镉含量。根部镉含量最低的品种是V14(富贵快菜),为青菜品种(0.24 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),显著低于镉含量最高品种93%。

2.2 不同品种叶菜镉的转运与富集特征

叶菜的转运系数(TF)是地上部与根部镉含量的比值,反映叶菜根部向可食部位的转运能力。如图2



不同小写字母表示不同品种之间差异显著($P<0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments. The same below

图1 不同叶菜品种地上部和根部镉含量

Figure 1 Cd contents in shoot and root among 13 leafy vegetables cultivars

表3 不同叶菜品种可食部位镉超标情况
Table 3 Excess Cd content in different varieties of leafy vegetables

编号 Number	含水率 Moisture content/ %	镉含量 (以干质量计) Cd content/ (DW, mg·kg ⁻¹)	镉含量 (以鲜质量计) Cd content/ (FW, mg·kg ⁻¹)
V1	97	3.23	0.10
V2	96	3.13	0.13
V3	96	3.87	0.15
V4	96	2.64	0.11
V5	95	3.77	0.19
V6	97	2.96	0.09
V7	95	2.96	0.15
V8	96	12.80	0.51
V9	95	11.61	0.58
V11	93	6.00	0.42
V12	92	3.68	0.29
V13	93	2.86	0.20
V14	96	1.58	0.06
GB 2762—2017			0.2

所示,供试叶菜品种的转运系数范围为0.65~4.01,平均值为1.73。在所有供试叶菜品种中,品种V3(新夏青6号)转运系数最低,为0.65,其次为品种V4(金品鸡毛菜3号)、V1(征夏)和V2(新夏青3号),4种均为青菜品种。品种V8(益农)转运系数最高,为4.01,是转运系数最低品种的6.1倍。生菜品种中V8(益农)和V9(种都)以及菠菜品种V12(博丰)、V13(大力士)和V11(金申)的转运系数均较高,青菜品种中V14(富贵快菜)显著高于其他青菜品种,生菜类、菠菜类和青菜类品种之间存在显著差异。

叶菜的富集系数(BCF)根据地上部镉含量与其

对应的土壤镉含量的比值计算,叶菜地上部富集系数能够在一定程度上反映叶菜可食部位对镉的吸收积累情况。13个叶菜品种的富集系数变幅在1.2~9.4之间,平均值为3.9。菠菜和生菜的富集系数普遍高于青菜。其中,菠菜品种V11(金申)富集系数最高,达到9.4,青菜品种V4(金品鸡毛菜3号)富集系数最低,为1.2。所有供试生菜类和菠菜类蔬菜的转运系数与富集系数均大于1,说明这两类叶菜吸收的镉易向可食部位迁移,且在可食部位的积累能力较强。青菜品种V4(金品鸡毛菜3号)、V2(新夏青3号)和V6(夏福)同其他叶菜品种相比表现出较低的镉富集能力和较低的根部向可食部位转运能力。

2.3 不同叶菜品种的产量差异

从图3可以看出,13个品种叶菜产量存在一定的差异,产量变化幅度为16 540~38 268 kg·hm⁻²,平均值为29 286 kg·hm⁻²。不同属叶菜产量之间存在显著差异,青菜的产量普遍高于菠菜和生菜,所有青菜产量均高于平均产量,菠菜和生菜产量均低于平均产量。青菜品种中V5(虹桥五号)产量最低,为34 321 kg·hm⁻²,显著低于V14(富贵快菜)。在所有叶菜品种中,产量最高的品种是V14(富贵快菜),其次为品种V2(新夏青3号),产量分别为38 268 kg·hm⁻²与36 302 kg·hm⁻²,V13(大力士)产量最低,为16 540 kg·hm⁻²,最高产量是最低产量的2.3倍。

2.4 叶菜可食部位镉含量相关分析

将叶菜可食部位镉含量与叶菜产量、根部镉含量、可食部位转运系数、可食部位富集系数、土壤pH、全量镉和有效态镉进行相关分析,结果如图4所示。可食部位镉含量与土壤pH、转运系数、可食部位镉富集系数呈显著正相关,相关系数分别为0.65、0.63和

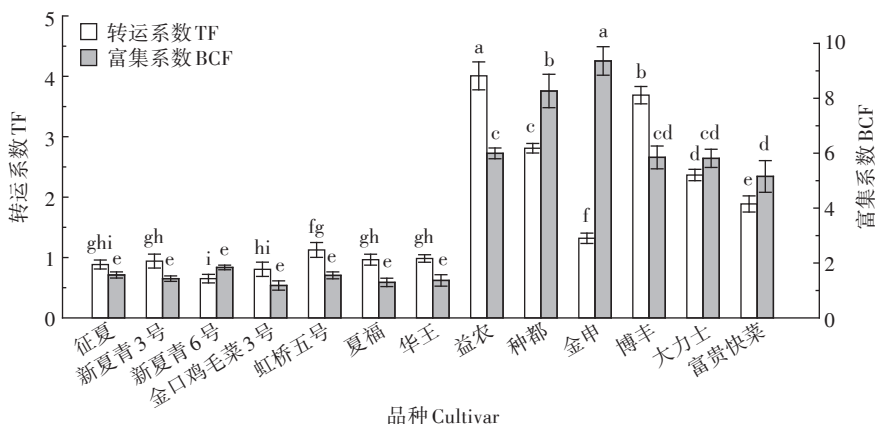


图2 不同叶菜品种转运系数与富集系数

Figure 2 Cd translocation factor(TF) of rice and Cd bioaccumulation factor(BCF) among 13 leafy vegetables cultivars

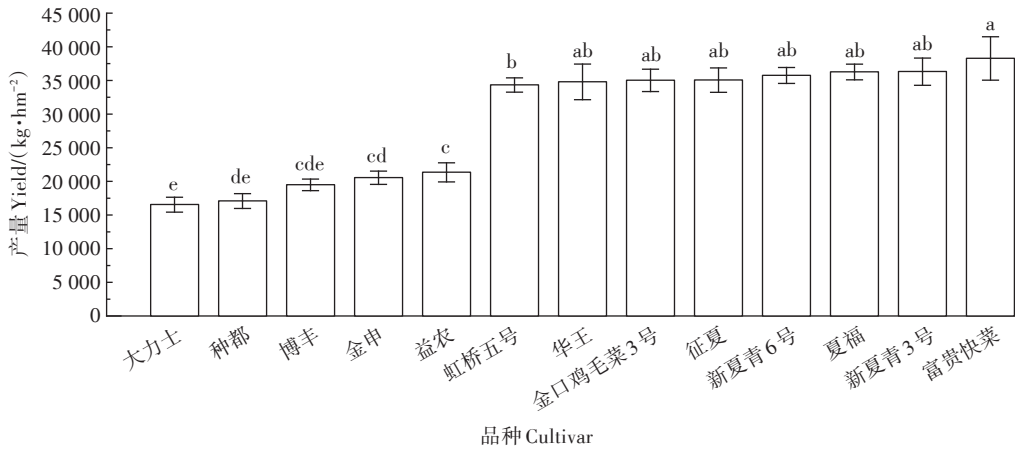


图3 不同叶菜品种产量

Figure 3 Yield of different leafy vegetables cultivars

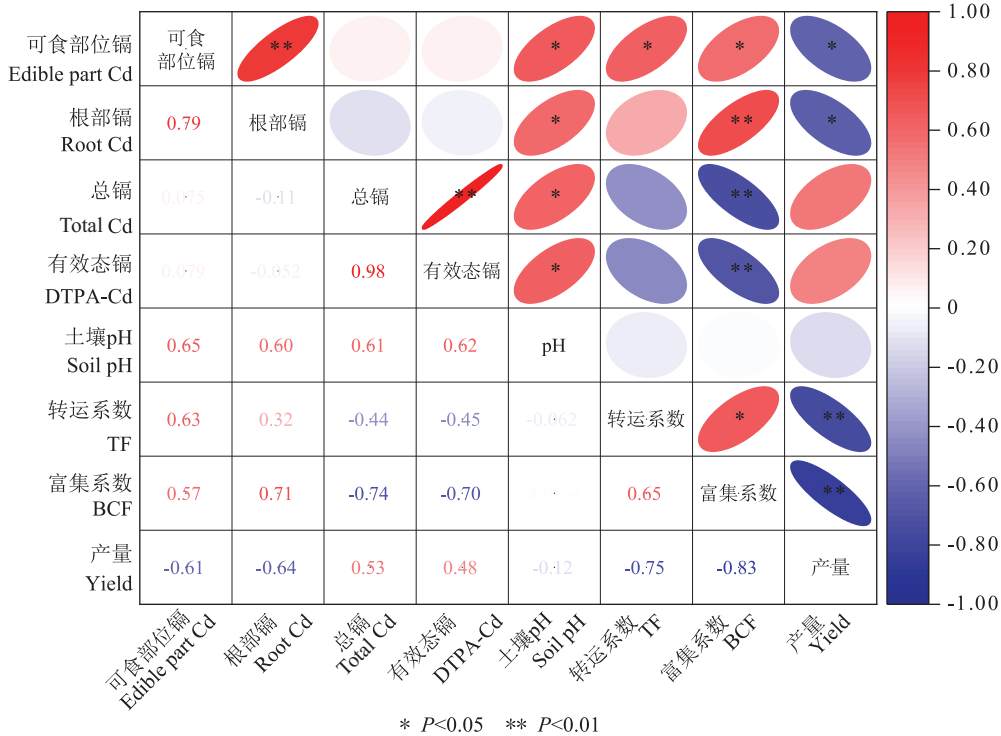


图4 叶菜可食部位镉含量相关分析

Figure 4 Correlation analysis of Cd content in edible parts

0.57;可食部位镉含量与叶菜产量呈显著负相关,相关系数为-0.61;可食部位镉含量与根部镉含量呈极显著正相关,相关系数为0.79。说明在所有指标中,叶菜可食部位镉含量主要受叶菜产量、转运系数、可食部位镉富集系数、根系镉含量和土壤pH的影响,其中,受根部镉含量的影响最大。

2.5 土壤重金属稳定调理剂与重金属叶面阻控营养强化肥单独或联合施用对上海矮青生长及镉积累的影响

从图5可以看出,施用土壤重金属稳定调理剂与

重金属叶面阻控营养强化肥对降低上海矮青可食部位镉含量有一定效果,单独或联合施用均可显著降低上海矮青可食部位镉含量,T2、T3、T4处理分别较T1处理($4.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)降低49%、31%和70%。在所有处理中T4处理降低上海矮青可食部位镉含量的效果最显著,可食部位镉含量达到最低,为 $1.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。不同处理对上海矮青根部镉含量也有一定的影响,4个处理下上海矮青的根部镉含量差异显著,T2处理根部镉含量最高,达到 $1.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,T3处理根部镉含量最低,为 $0.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,较T1处理显著降低24%。根

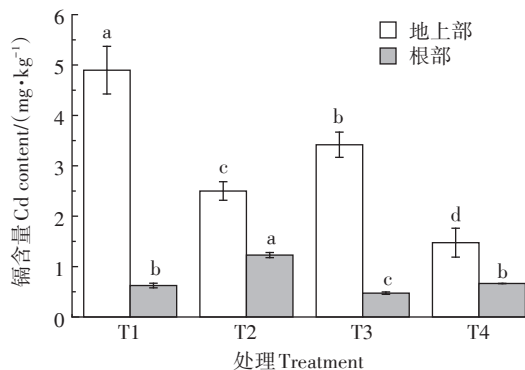


图5 不同处理上海矮青地上部和根部镉含量

Figure 5 Cd contents in shoot and root of Shanghai Aiqing under different treatments

据图6可知,T2、T3和T4处理显著降低了上海矮青的富集系数,与T1处理相比分别降低了55%、69%、89%,其中T4处理富集系数最低,为0.6,该处理降低富集系数的效果最显著。施用调理剂对转运系数也产生一定影响,T2、T3和T4处理转运系数均显著低于T1处理,T4处理转运系数较T1处理显著降低了80%。T2处理转运系数最低,较T1处理低86%。除此之外,单独或者联合施用调理剂对上海矮青的产量也产生了一定的影响(图7)。T2处理产量最高,为39 602 kg·hm⁻²,较T1处理提高5%。T3产量次之,为38 597 kg·hm⁻²,较T1处理高2%。T4处理产量最低,可能是由于撒播的出苗问题。

3 讨论

蔬菜,尤其是叶菜类蔬菜相较于其他类型的农作物更易吸收和积累重金属^[19]。陈永等^[20]研究南京市郊区蔬菜基地64个蔬菜样品对重金属的富集能力规律,结果表现为叶菜类>根茎类>茄果类。杨晖等^[21]

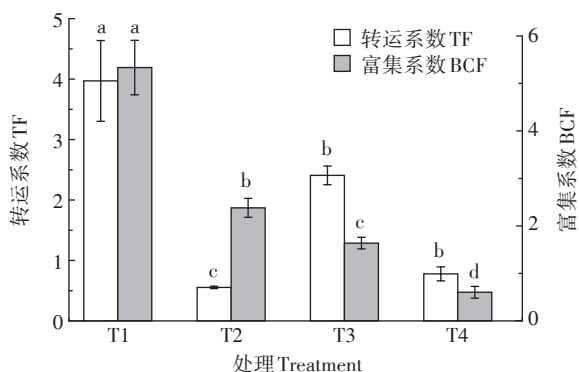


图6 不同处理上海矮青转运系数和富集系数

Figure 6 TF and BCF of Shanghai Aiqing under different treatments

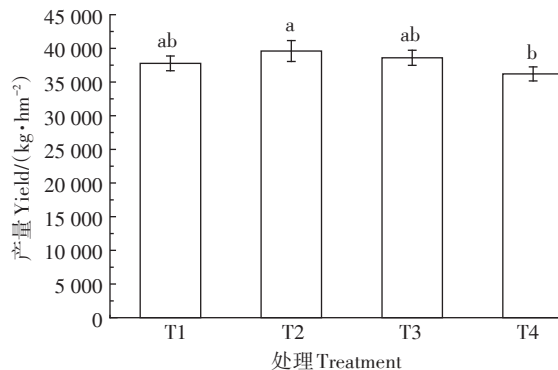


图7 不同处理上海矮青产量

Figure 7 Yield of Shanghai Aiqing under different treatments

采集了云南省丽水市周边蔬菜基地的5类7种蔬菜,发现蔬菜对重金属元素的积累表现为叶菜类>花菜类>根茎类>茄果类。可见温室菜地镉污染已成为茎叶类蔬菜可持续生产的一大限制。植物基因型是影响植物吸收重金属最重要的植物因子^[22-23],同一植物的不同基因型品种对重金属的吸收、转运和积累能力具有显著差异^[24-25]。因此,在重金属污染农田种植低积累基因型品种,可能是减少重金属向可食部位迁移并进一步保障人体健康的有效策略^[26]。

近年来许多研究者在低积累品种筛选方面进行了大量研究。WANG等^[27]在低镉污染土壤(0.66 mg·kg⁻¹)中进行田间试验,比较了21个大白菜品种的镉耐受、地上部镉浓度、镉富集因子和转运因子等指标,筛选出7个安全基因型品种。TANG等^[28]分别在松阳轻度镉铅污染农田和衢州中度镉铅污染农田上比较了17个蚕豆品种对镉和铅的植物修复潜力,最终筛选出10个高产且可食部位重金属低积累的蚕豆品种。QIU等^[29]通过盆栽实验从31个花椰菜品种中筛选并验证出了6个镉低积累品种。根据叶菜类蔬菜镉的最高允许含量为0.2 mg·kg⁻¹(GB 2762—2017),本研究供试的13种叶菜类蔬菜中生菜和菠菜均超出镉最大限量标准,且生菜可食部位受污染程度显著高于菠菜,这可能是因为生菜对镉有较高的吸收和转运能力,因此被认为是镉积累作物^[30-31]。所有供试青菜品种地上部镉含量均未超标,且显著低于供试生菜品种。品种V14(富贵快菜)地上部镉含量最低,各青菜品种可食部位镉含量依次为V14(富贵快菜)<V4(金品鸡毛菜3号)<V6(夏福)<V7(华王)<V2(新夏青3号)<V1(征夏)<V5(虹桥五号)<V3(新夏青6号)。研究表明,不同种类、不同品种的叶菜类蔬菜存在明显不同的抗重金属胁迫能力和重金属积累水平^[32],这主

要与某些通道蛋白有关,金属通道蛋白基因的表达量能够影响镉转运蛋白量,进而影响作物对镉的吸收^[33];同时,不同蔬菜作物基因造成的根际氧化膜、根际分泌物、细胞壁结合位点、原生质成分、液泡中的化学成分等的差异^[34-35],使得蔬菜对重金属镉的吸收、积累能力不同。重金属的积累不仅在物种和品种之间存在较大差异,在同一植物的各器官之间也存在差异。重金属离子通过土壤进入蔬菜根系后,首先在根系中积累,随后通过木质部转运至茎部,再通过木质部和韧皮部从茎部转运至可食部位^[36]。不同转运系数造成蔬菜各个器官重金属含量的差异,一般为吸收器官>输导器官、同化器官>繁殖器官^[37]。但本研究中供试叶菜品种镉在不同部位的分布规律为地上部>根部,这可能是由于叶菜吸收的重金属不仅来源于土壤中重金属,植物叶片还能通过其表面气孔吸收大气粉尘中携带的重金属^[38]。叶菜即使生长在非污染的土壤上,镉也主要分配在叶片中^[39]。

生物量是反映植物对重金属耐性的重要指标之一,不同叶菜品种对镉的耐受性不同,叶菜产量因品种耐性差异受到的影响也不同,所以进行不同品种镉积累差异评价时除了要关注可食部位镉含量,也要考虑该胁迫环境条件下作物产量的差异^[40-41]。MI等^[42]报道,35个不同基因型的大白菜鲜质量表现出明显差异,重金属高积累的大白菜品种总体上生物量较低。不同基因型芹菜在同一地块上的生长状况存在明显差异,最高的可食部位生物量是最低的8.30倍^[43]。TANG等^[44]研究发现97个不同基因型芥菜的产量差异较大,范围在32.57~62.00 t·hm⁻²,最高产量是最低产量的1.9倍。本研究结果显示不同叶菜品种之间产量差异显著,叶菜品种产量的规律表现为青菜产量高于生菜和菠菜,依次为V14(富贵快菜)>V2(新夏青3号)>V6(夏福)>V3(新夏青6号)>V1(征夏)>V4(金品鸡毛菜3号)>V7(华王)>V5(虹桥5号)>V8(益农)>V11(金申)>V12(博丰)>V9(种都)>V13(大力士)。

目前,低积累品种筛选尚未形成系统而完整的标准,BAKER等^[45]认为镉低积累作物应具备可食部位镉含量低于国家限量标准和转移系数小于1两个条件。刘维涛等^[46]综合前人研究,将可食部位低吸收镉且镉含量低于国家标准、作物本身镉耐性较强不会受到胁迫、在较高污染条件下生物量不下降仍能正常生长、可食部位-土壤富集系数及可食部位-根部转运系数均小于1这4个条件作为筛选镉低积累作物的标

准。转移系数小于1也可作为低积累作物早期筛选的一个重要因素,且相关性分析表明(图4),叶菜可食部位镉含量与转运系数存在显著正相关关系。在本研究中V1(征夏)、V2(新夏青3号)、V3(新夏青6号)、V4(金品鸡毛菜3号)、V6(夏福)和V7(华王)转运系数均小于1。综合可食部位镉含量、叶菜产量和转运系数,V4(金品鸡毛菜3号)、V2(新夏青3号)和V6(夏福)3个品种既能保证叶菜安全生产,又能保证产量不受影响,且具有较低的根部-可食部位镉转运系数。

相关性分析表明,富集系数与地上部镉含量显著正相关,在本研究中各供试叶菜品种富集系数均大于1,这可能是由该菜地镉污染程度较高,而叶菜类蔬菜对镉的富集能力较强所致。刘桂华等^[12]的研究表明,随土壤镉污染浓度增加,3类叶菜类蔬菜地上部对镉的累积呈明显的增加趋势,说明植物对镉的吸收积累在很大程度上依赖于外界镉的浓度。姚春霞等^[47]通过比较14种蔬菜中铬、镉、汞和砷的富集含量证实了叶菜类蔬菜相比于其他蔬菜更容易积累重金属。研究发现,有机肥、生物炭、锌肥、谷胱甘肽、硅和铁能显著降低作物对重金属的吸收和转运^[3,38,48]。重金属叶面阻控营养强化肥是一种叶面锌肥,叶面喷施后一方面植物体内锌含量提高,锌与镉离子存在拮抗作用,增强了光合产物向作物的转运;另一方面可溶性蛋白的浓度提高,增加可溶性蛋白对活性氧的清除作用以及对镉的螯合作用,增强膜的稳定性,减少镉向地上部的转运^[49]。生物炭比表面积大、孔隙结构好、阳离子交换量高,能够抑制重金属和营养物质向地下水的浸出,提高营养物质的有效性^[50-51]。堆肥中含有的丰富有机质,对改善土壤结构起着至关重要的作用^[52]。石灰和沸石作为无机改良剂,因为自身碱性较高而与大量的阳离子主要通过固定重金属的方式促进作物生长^[53-54]。这些物质以适当比例配制成的土壤重金属稳定调理剂,能够改善土壤的理化或生物特性,从而促进植物吸收土壤中的养分^[55-56]。因此,本研究在单独或联合施用含有这些成分的土壤重金属稳定调理剂和重金属叶面阻控营养强化肥后,高污染条件下上海矮青在保证产量的同时降低了可食部位镉含量,其转运系数和富集系数也均降低,联合施用条件下上海矮青富集系数降至0.6,且可食部位镉含量在最大允许限量范围内。

4 结论

(1)综合考虑叶菜可食部位镉含量、产量、转运系数和富集系数,适合在上海地区种植的叶菜品种为金

品鸡毛菜3号、新夏青3号和夏福,以上品种既能安全保障可食部位镉含量,又能保证叶菜高产。

(2)叶菜有较强的镉富集能力,不同叶菜品种及同一叶菜品种不同部位吸收、积累镉的能力存在显著差异。青菜比生菜和菠菜积累镉的能力更低,不同部位镉总体分布规律为可食部位>根部。

(3)相关性分析表明,可食部位镉含量与土壤pH、叶菜转运系数、可食部位镉富集系数呈显著正相关,与叶菜产量呈显著负相关,与根部镉含量呈极显著正相关。叶菜可食部位镉含量受根部镉含量影响最大,受土壤总镉影响最小。

(4)单独或联合施用土壤重金属稳定调理剂和重金属叶面阻控营养强化肥在保证上海矮青产量的条件下降低了可食部位镉含量、转运系数和富集系数,联合施用条件下上海矮青富集系数降至0.6,同时可食部位镉含量在最大允许限量范围内。

(5)综上,利用低积累品种,并采取合理的农艺/化学措施,是降低中轻度甚至是重度污染土壤中重金属积累,保障农产品安全生产的有效策略。

参考文献:

- [1] GRANT C, CLARKE J, DUGUID S, et al. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 390:301-310.
- [2] CHANEY R L. How does contamination of rice soils with Cd and Zn cause high incidence of human Cd disease in subsistence rice farmers [J]. *Current Pollution Reports*, 2015, 1: 13-22.
- [3] CAO F J, WANG R F, CHENG W D, et al. Genotypic and environmental variation in cadmium, chromium, lead and copper in rice and approaches for reducing the accumulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 496:275-281.
- [4] BALDANTON D, MORRA L, ZACCARDELLI M. Cadmium accumulation in leaves of leafy vegetables[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 123:89-94.
- [5] 杜俊杰,李娜,吴永宁,等. 蔬菜对重金属的积累差异及低积累蔬菜的研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(6):1193-1201. DU J J, LI N, WU Y N, et al. Variation in accumulation of heavy metals in vegetables and low accumulation vegetable varieties: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(6):1193-1201.
- [6] SHAN H, SU S, LIU R, et al. Cadmium availability and uptake by radish(*Raphanus sativus*) grown in soils applied with wheat straw or composted pig manure[J]. *Environmental Science Pollution Research*, 2016, 23:15208-15217.
- [7] WAEL M S, MOSTAFA M R, TAIA A A E M, et al. Alleviation of cadmium toxicity in common bean(*Phaseolus vulgaris* L.) plants by the exogenous application of salicylic acid[J]. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2015, 90(1):83-91.
- [8] TANG L, HAMID Y, ZEHR A, et al. Fava bean intercropping with *Sedum alfredii* inoculated with endophytes enhances phytoremediation of cadmium and lead cocontaminated field[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 265:114861.
- [9] BHARGAVA A, CARMONA F F, BHARGAVA M, et al. Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 105:103-120.
- [10] CHEN Y, LI T Q, HAN X, et al. Cadmium accumulation in different pakchoi cultivars and screening for pollution-safe cultivars[J]. *Journal of Zhejiang University- Science B*, 2013, 13(6):494-502.
- [11] 涂春艳,陈婷婷,廖长君,等. 矿区农田蔬菜重金属污染评价和富集特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(8):1713-1722. TU C Y, CHEN T T, LIAO C J, et al. Pollution assessment and enrichment characteristics of heavy metals in farmland vegetables near a mining area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(8):1713-1722.
- [12] 刘桂华,胡岗,秦松,等. 贵州典型酸性黄壤中3种叶菜类蔬菜对Cd累积特性及低累积品种筛选[J]. *安全与环境学报*, 2018,18(1):396-401. LIU G H, HU G, QIN S, et al. On the Cd accumulation risk features in the 3 leaf vegetables in the typical acid brown soil of Guizhou and the corresponding choice for better lower accumulated cultivars instead[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, 18(1):396-401.
- [13] 宗良纲,孙静克,沈倩宇,等. Cd、Pb污染对几种叶类蔬菜生长的影响及其毒害症状[J]. *生态毒理学报*, 2007, 2(1):63-68. ZONG L G, SUN J K, SHEN Q Y, et al. Impacts of cadmium and lead pollution in soil on leaf vegetables growth and toxic-symptoms[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2007, 2(1):63-68.
- [14] 刘维涛,周启星,孙约兵,等. 大白菜对铅积累与转运的品种差异研究[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(1):63-67. LIU W T, ZHOU Q X, SUN Y B, et al. Variety difference of lead accumulation and translocation in Chinese cabbage(*Brassica pekinensis* L.) [J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(1):63-67.
- [15] 李学德. 典型磺胺类抗生素在土壤-蔬菜系统中的环境行为研究[D]. 南京:南京大学,2015. LI X D. Study on environmental behavior of typical sulfonamide antibiotics in soil-vegetable systems[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.
- [16] FENG R, QIU W, LIAN F, et al. Field evaluation of *in situ* remediation of Cd-contaminated soil using four additives, two foliar fertilisers and two varieties of pakchoi[J]. *Environmental Management*, 2013, 124:17-24.
- [17] CHEN F, DONG J, WANG F, et al. Identification of barley genotypes with low grain Cd accumulation and its interaction with four microelements[J]. *Chemosphere*, 2007, 67:2082-2088.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000:264-278. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000:264-278.
- [19] LIU H Y, PROBST A, LIAO B H. Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill (Hunan, China) [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 339(1/2/3):153-166.
- [20] 陈永,黄标,胡文友,等. 设施蔬菜生产系统重金属积累特征及生

- 态效应[J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 693-702. CHEN Y, HUANG B, HU W Y, et al. Heavy metals accumulation in greenhouse vegetable production systems and its ecological effects[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(4): 693-702.
- [21] 杨晖, 梁巧玲, 赵鹏, 等. 7种蔬菜型作物重金属累积效应及间作鸡眼草对其重金属吸收的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 209-214. YANG H, LIANG Q L, ZHAO L, et al. The cumulative effect on heavy metal of seven kinds of vegetable crops and effects on heavy metal absorption of intercropping *Kummerowia striata*[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(6): 209-214.
- [22] BHARGAVA A, CARMONA F F, BHARGAVA M, et al. Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 105: 103-120.
- [23] 王欢. 马铃薯吸收与积累重金属的基因型与环境效应[D]. 杭州: 浙江大学, 2017. WANG H. Genotype and environmental effects of potato uptake and accumulation of heavy metals[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [24] NABULO G, BLACK C R, CRAIGON J, et al. Does consumption of leafy vegetables grown in peri-urban agricultural pose a risk to human health? [J]. *Environmental Pollution*, 2012, 162: 389-398.
- [25] DING C, ZHANG T, WANG X. Prediction model for cadmium transfer from soil to carrot (*Daucus carota* L.) and its application to derive soil thresholds for food safety[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(43): 10273-10282.
- [26] 冯英, 马璐瑶, 王琼, 等. 我国土壤-蔬菜作物系统重金属污染及其安全生产综合农艺调控技术[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2359-2370. FENG Y, MA L Y, WANG Q, et al. Heavy-metal pollution and safety production technologies of soil-vegetable crop systems in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11): 2359-2370.
- [27] WANG X, SHI Y, CHEN X, et al. Screening of Cd-safe genotypes of Chinese cabbage in field condition and Cd accumulation in relation to organic acids in two typical genotypes under long-term Cd stress[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22: 16590-16599.
- [28] TANG L, HAMID Y, ZEHRA A, et al. Characterization of fava bean (*Vicia faba* L.) genotypes for phytoremediation of cadmium and lead co-contaminated soils coupled with agro-production[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 171: 190-198.
- [29] QIU Q, WANG Y, YANG Z, et al. Responses of different Chinese flowering cabbage (*Brassica parachinensis* L.) cultivars to cadmium and lead exposure: Screening for Cd+Pb pollution-safe cultivars[J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2011, 39(11): 925-932.
- [30] PEIJNENBURG W, BAERSELMAN R, GROOT A, et al. Quantification of metal bioavailability for lettuce (*Lactuca sativa* L.) in field soils [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2000, 39: 420-430.
- [31] European Trace Elements Network Influence of sludge and wastes products on trace elements inputs and environmental effects[R]. Denmark: FAO, 1983.
- [32] ZHANG K, YUAN J, KONG W, et al. Genotype variations in cadmium and lead accumulations of leafy lettuce (*Lactuca sativa* L.) and screening for pollution-safe cultivars for food safety[J]. *Environmental Science-Processes & Impacts*, 2013, 15: 1245-1255.
- [33] 陈艳芳, 李取生, 何宝燕, 等. 高/低Cd累积蔬菜品种金属累积特性与关键转运基因表达的关系[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(6): 1041-1046. CHEN Y F, LI Q S, HE B Y, et al. Metal accumulation and expressions of root two key transporter genes, HMA4 and IRT1, of high/low Cd-accumulating amaranth cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(6): 1041-1046.
- [34] 杭小帅, 周健民, 王火焰. 常熟高风险区水稻籽粒重金属污染特征及评价[J]. 中国环境科学, 2009, 29(2): 130-135. HANG X S, ZHOU J M, WANG H Y. Heavy metal pollution characteristics and assessment of rice grain from a typical high risk area of Changshu City, Jiangsu Province[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(2): 130-135.
- [35] 刘恩玲, 王亮, 孙继, 等. 不同蔬菜对土壤Cd、Pb的累积能力研究[J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 758-762. LIU E L, WANG L, SUN J, et al. Uptake and accumulation of Cd and Pb in different vegetables from soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(3): 758-762.
- [36] WANG J L, YUAN J G, YANG Z Y, et al. Variation in cadmium accumulation among 30 cultivars and cadmium subcellular distribution in 2 selected cultivars of water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.) [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(19): 8942-8949.
- [37] 杨梦昕. 湘江长沙段重金属在主要蔬菜中富集规律与环境相关性分析[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015. YANG M X. Enrichment and environmental correlation analysis of heavy metal in vegetable by Changsha section of Xiangjiang River[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2015.
- [38] 刘丽. 重金属在土壤-蔬菜系统中的迁移转运与调控及其健康风险评估[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018. LIU L. Migration transshipment and regulation of heavy metals in soil-vegetable systems and risk assessment of their health[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2018.
- [39] BALDANTONI D, MORRA L, ZACCARDELLI M, et al. Cadmium accumulation in leaves of leafy vegetables[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 123: 89-94.
- [40] 王刚, 孙梦飞, 钟雪梅, 等. 镉胁迫下不同水稻品种镉的累积与产量差异比较[J]. 中国农学通报, 2017, 33(17): 76-81. WANG G, SUN M F, ZHONG X M, et al. Cadmium accumulation and yield difference of different rice varieties under cadmium stress[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(17): 76-81.
- [41] MAGDA P, ESZTER H, TIBOR J, et al. Physiological changes and defense mechanisms induced by cadmium stress in maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2006, 169(2): 239-246.
- [42] MI B, LIU F, XIE L L, et al. Evaluation of the uptake capacities of heavy metals in Chinese cabbage[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 171(30): 511-517.
- [43] 周其耀. 低积累品种与叶面阻控剂对镉污染设施菜地蔬菜作物安全生产的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2021. ZHOU Q Y. Effects of low accumulation varieties combined with foliar control agents on

- safety production of vegetable crops in cadmium polluted greenhouse [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [44] TANG L, HAMID Y, ZEHRA A, et al. Comparative assessment of *Brassica pekinensis* L. genotypes for phytoavoidance of nitrate, cadmium and lead in multi-pollutant field[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2020, 22:972-985.
- [45] BAKER A J M, WHITING S N. In search of the holy grail: A further step in understanding metal hyperaccumulation[J]. *New Phytologist*, 2002, 155: 1-7.
- [46] 刘维涛, 周启星. 重金属污染预防品种的筛选与培育[J]. 生态环境学报, 2010, 19(6): 1452-1458. LIU W T, ZHOU Q X. Selection and breeding of heavy metal pollution-safe cultivars[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(6): 1452-1458.
- [47] 姚春霞, 陈振楼, 张菊, 等. 上海浦东部分蔬菜重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(4): 761-765. YAO C X, CHEN Z L, ZHANG J, et al. Heavy metal pollution assessment of vegetables in Pudong zone of Shanghai[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(4): 761-765.
- [48] RIZWAN M, ALI S, ADDRESS M, et al. A critical review on effects, tolerance mechanisms and management of cadmium in vegetables[J]. *Chemosphere*, 2017, 182: 90-105.
- [49] SARWAR N, ISHAQ W, FARID G, et al. Zinc-cadmium interactions: Impact on wheat physiology and mineral acquisition[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 122: 528-536.
- [50] SALAM A, BASHIR S, KHAN I, et al. Biochar induced Pb and Cu immobilization, phytoavailability attenuation in Chinese cabbage, and improved biochemical properties in naturally co-contaminated soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19: 2381-2392.
- [51] ZHANG M, WANG J, BAI S H, et al. Assisted phytoremediation of a co-contaminated soil with biochar amendment: Contaminant removals and bacterial community properties[J]. *Geoderma*, 2019, 348: 115-123.
- [52] VAN HERWIJNEN R, HUTCHINGS T R, AL-TABBAA A, et al. Remediation of metal contaminated soil with mineral-amended composts [J]. *Environmental Pollution*, 2007, 150: 347-354.
- [53] BRALLIER S, HARRISON R B, HENRY C L, et al. Liming effects on availability of Cd, Cu, Ni and Zn in a soil amended with sewage sludge 16 years previously[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 1996, 86: 195-206.
- [54] OSTE L A, LEXMOND T M, VAN RIEMSDIJK W H. Metal immobilization in soils using synthetic zeolites[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31: 813-821.
- [55] YOUNIS U, MALIK S A, RIZWAN M, et al. Biochar enhances the cadmium tolerance in spinach (*Spinacia oleracea*) through modification of Cd uptake and physiological and biochemical attributes[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23: 21385-21394.
- [56] AHMAD M, LEE S S, LEE S E, et al. Biochar-induced changes in soil properties affected immobilization/mobilization of metals/metalloids in contaminated soils[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17: 717-730.

(责任编辑:李丹)