

矿区农田蔬菜重金属污染评价和富集特征研究

涂春艳, 陈婷婷, 廖长君, 曹斐姝, 张超兰, 周永信, 谢湉

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1401>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大宝山污灌区土壤-蔬菜系统重金属污染现状及其风险评价

曹春, 张松, 张鹏, 刘雨晨, 陈勋文, 王俊坚

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1521–1531 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0001>

稳定化处理对底泥利用后土壤重金属形态及蔬菜重金属含量的影响

李翔, 刘永兵, 程言君, 臧振远, 罗楠, 王佳佳

农业环境科学学报. 2016, 35(7): 1278–1285 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.07.008>

Cd Hg Pb胁迫下不同作物可食部分重金属含量及累积特征研究

焦位雄, 杨虎德, 冯丹妮, 林大松, 李崇霄

农业环境科学学报. 2017, 36(9): 1726–1733 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0225>

广西某铅锌矿影响区农田土壤重金属污染特征及修复策略

张云霞, 宋波, 杨子杰, 王佛鹏, 周浪, 周子阳, 宾娟

农业环境科学学报. 2018, 37(2): 239–249 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1134>

农田Cd和Hg污染的来源解析与风险评价研究

李霞, 张慧鸣, 徐震, 金聪颖, 白宏涛, 汪磊, 赵祯, 孙红文

农业环境科学学报. 2016, 35(7): 1314–1320 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.07.013>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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 Chun-yan, CHEN Ting-ting, LIAO Chang-jun, 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.



开放科学 OSID

矿区农田蔬菜重金属污染评价和富集特征研究

涂春艳^{1,3}, 陈婷婷^{1,3}, 廖长君^{1*}, 曹斐姝¹, 张超兰^{1,2}, 周永信^{1,3}, 谢湉¹

(1. 广西博世科环保科技股份有限公司, 南宁 530007; 2. 广西大学资源环境与材料学院, 南宁 530004; 3. 湖南博世科环保科技股份有限公司, 长沙 410000)

摘要:为明确南丹矿区周边农田不同种类蔬菜污染情况, 筛选适宜本区域种植的蔬菜品种, 降低生态风险, 通过实地采样调查, 运用单因子污染指数、综合污染指数、富集系数及系统聚类分析法, 评价及比较不同蔬菜可食部位中Cd、As、Pb污染状况及富集特征, 同时选取叶菜类及萝卜进行不同部位重金属累积情况分析。结果表明, 研究区域农田土壤为Cd、As重度污染, Cd是蔬菜的主要污染因子, 不同种类蔬菜对Cd的富集能力大小表现为叶菜类>茄科类>块根类>瓠果类>豇豆类。叶菜类、豇豆类及茄科类蔬菜对3种重金属的富集能力大小为Cd>Pb>As, 块根类和瓠果类的大体趋势为Cd>As>Pb, 其中抗热尖叶油麦菜对Cd、Pb的富集能力最强, 生姜对As富集能力最强。通过对叶菜类及萝卜不同部位重金属浓度分析, Cd、As、Pb浓度表现为可食部位<不可食部位。研究表明, 不同种类蔬菜的重金属富集能力不同, 大部分易受Cd污染, 其中叶菜类对Cd的富集能力基本强于其他类蔬菜, 为保障村民蔬菜食用安全, 建议规避叶菜类蔬菜种植, 推荐种植苦瓜、香芋南瓜、七寸人参红萝卜、紫薯等瓠果及块根类蔬菜。

关键词:农田土壤; 蔬菜; 重金属; 污染评价; 富集特征; 累积能力

中图分类号: X53; X825 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)08-1713-10 doi:10.11654/jaes.2019-1401

Pollution assessment and enrichment characteristics of heavy metals in farmland vegetables near a mining area

TU Chun-yan^{1,3}, CHEN Ting-ting^{1,3}, LIAO Chang-jun^{1*}, CAO Fei-shu¹, ZHANG Chao-lan^{1,2}, ZHOU Yong-xin^{1,3}, XIE Tian¹

(1. Guangxi Bossco Environmental Protection Technology Co., Ltd, Nanning 530007, China; 2. College of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Hunan Bossco Environmental Protection Technology Co., Ltd, Changsha 410000, China)

Abstract: To clarify the pollution of different vegetables in a farmland near the Nandan mining area in China, varieties of vegetables suitable for planting in the area were selected to reduce ecological risks. Based on in situ sampling, the Cd, As, and Pb pollution status and enrichment characteristics in the edible parts of these vegetables were evaluated and compared using a single-factor pollution index, comprehensive pollution index, bioconcentration factor, and systematic cluster analysis. Leaf vegetables and radishes were also selected to analyze heavy metal enrichment in different plant parts. The results showed that the farmland soil in this area was heavily polluted with Cd and As, and the edible parts of the vegetables were mainly polluted with Cd. The Cd-enrichment capacity of different vegetables followed the order of: leafy vegetables > solanaceous vegetables > root vegetables > gourds > cowpea vegetables. The order of the enrichment capacity of similar species, namely leafy, cowpea, and solanaceous vegetables, for the three heavy metals studied was Cd > Pb > As, and the general trend of the enrichment capacity of root vegetables and gourd vegetables for heavy metals was Cd>As>Pb. Among these vegetables,

收稿日期: 2019-12-19 录用日期: 2020-04-29

作者简介: 涂春艳(1991—), 女, 江西赣州人, 硕士研究生, 中级工程师, 从事重金属污染土壤修复研究。E-mail: 747772286@qq.com

*通信作者: 廖长君 E-mail: hjxfy@bossco.cc

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0801300, 2018YFD0800705); 广西重点研发计划项目(桂科 AB18281002)

Project supported: National Key R & D Program of China (2017YFD0801300, 2018YFD0800705); Key Research & Development Program of Guangxi Province (Guike AB18281002)

the heat-resistant sharp-leaf lettuce exhibited the strongest capacity for Cd and Pb enrichment, while ginger had the strongest capacity for As-enrichment. Based on an analysis of the accumulation of heavy metals in different parts of leafy vegetables and radishes, the trends of Cd, As, and Pb concentrations showed that heavy metal concentrations in the edible parts of the plants were lower than those within the inedible parts. Overall, different species of vegetables had different enrichment capacities for heavy metals, and vegetables were more susceptible to Cd contamination. Among the analyzed vegetables, leafy vegetables had the strongest capacity to accumulate Cd. Therefore, to ensure the safety of those consuming vegetables grown in this area, leafy vegetables should not be planted. Furthermore, the study recommend the growing of momordica charantia, taro pumpkins, seven-inch ginseng carrots, purple sweet potatoes, and other gourd or root vegetables.

Keywords: farmland soil; vegetables; heavy metals; pollution assessment; pollutant enrichment characteristics; accumulation capacity

近年来,我国长期的矿产开采、加工以及工业化带来的社会和环境问题开始逐渐显露,重金属特大污染事件呈高发态势,对生态环境和群众健康构成了严重威胁^[1-3]。南丹县被誉为“有色金属之乡”,境内有芒场和大厂矿田,分别位于芒场镇和大厂镇、车河镇。由于掠夺性开发及产业技术落后,长期粗放的开采、冶炼、加工过程中累积形成的重金属污染问题已对当地居民的正常生产生活构成了威胁。据《南丹县重金属污染综合防治“十二五”规划》资料统计,南丹县受重金属污染农田超过 300 hm²,其中被迫完全荒弃的超过 20 hm²,主要分布在刁江流域各个支流两岸,其中南丹县水田中 Cd、As 和 Hg 超标率分别达 42.1%、26.8% 和 7.3%,旱地中 Cd 和 As 超标率分别达 77.8%、74.1%。有关南丹矿区农田重金属污染情况的研究主要集中在污染来源、分布特征以及健康风险评价等,对矿区周边蔬菜污染情况、富集特征等相关研究主要集中于对玉米及不同蔬菜类别的重金属风险评价^[4-6],如陆素芬等^[6]研究表明,南丹矿区蔬菜对 Cd 的富集系数最大,且各类蔬菜对重金属的富集系数表现为叶菜类>根茎类>瓜果类,但大部分研究仅对蔬菜类别进行研究,而未细化到品种筛选^[7-8]。我国人均耕地紧缺,无法完全停止重金属污染农田农作,也无法进行长期的高成本修复,如何合理利用这些污染土壤具有重要的理论与现实意义,如果无法有效地在短时间内将重金属从土壤中移走,同时又要避免蔬菜中的重金属对人体造成伤害,那么了解不同蔬菜的污染情况和富集特征,选择重金属低积累型蔬菜进行种植就非常必要。本文选取南丹县车河镇某铅锌矿周边具有代表性的重金属污染农田为研究对象,对菜地土壤、不同蔬菜类别及蔬菜品种重金属污染情况进行分析,利用单因子污染指数、内梅罗综合污染指数和富集系数评价不同蔬菜可食部位的 Cd、As、Pb 污染程度及富集特征,从

中筛选适合当地种植的低累积蔬菜品种,为提高受污染土地安全利用率和保障当地蔬菜质量安全提供一定的参考依据,同时对推动当地农业可持续发展具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 采样区概况

研究区域位于广西河池市南丹县车河镇,刁江支流车河河流域五一矿至亢马段内,农田调查面积为 66.7 hm²(图 1),其上游为五一矿矿厂,地块河对岸曾是铅锌矿选矿厂。当地种植习惯为春夏种植玉米和蔬菜,秋冬种植油菜和蔬菜,2017 年 10 月对该区域进行农田与农产品安全协同调查得知,土壤为酸性土, pH 4.45~6.25,污染物为 Cd、As、Pb,平均浓度分别为 4.17、686.53、218.70 mg·kg⁻¹,部分蔬菜可食部位重金属 Cd、As 分别超过《食品安全国家标准 食品中污染物的限量》(GB 2762—2017)污染限量的 1、2~3 倍。

1.2 样品采集及处理

为更系统了解该区域内蔬菜污染情况,根据当地蔬菜种植情况及时令,分别于 2018 年 8 月 12 日和 2018 年 11 月 25 日在调查区域内采集时令蔬菜,具体采样时间、对应的地块和蔬菜品种信息详见表 1,每个蔬菜品种采集 3 个重复样。土壤按蔬菜地块采集,每个地块采集 3 个样品,每个土壤及蔬菜样品均采用 S 形采样法采集,其中土壤样品采集深度为 0~20 cm,混合均匀后装于自封袋;蔬菜样品主要采集可食部位,混合后装于自封袋,并放入保温箱中保证运输过程中蔬菜的新鲜。采集的土壤样品置于干燥通风处自然风干,剔除石块根系,充分混匀后过 20 目筛,并采用四分法取部分样品过 100 目筛保存待测。蔬菜样品先用自来水冲洗干净,再用去离子水清洗 3 次以上,用滤纸吸干表面水分后用食品加工机打成匀浆,储存于样品瓶并存放于冰箱中待测^[9]。

1.3 样品分析方法

土壤分析指标的检测:土壤pH采用电位法,参照《土壤pH的测定》(NY/T 1377—2007);土壤Cd、Pb全量及有效态测定分别参照《土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法》(GB/T 17141—1997)及《土壤质量 有效态铅和镉的测定 原子吸收法》(GB/T 23739—2009);土壤总As及有效态测定分别参照《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法》(GB/T 22105.2—2008)和《酸性土壤中有有效砷、有效汞的测定原子荧光法》(DB35/T 1459—2014)。蔬菜样品中

表 1 蔬菜调查信息
Table 1 Investigation information of vegetables

蔬菜种类 Vegetable types	采样地块 Sampling fields	蔬菜品种 Vegetable varieties	采样时间 Time
叶菜类 Leafy vegetables	#2	京丰1号甘蓝(<i>Brassica oleracea</i> L.var. <i>capitata</i> L.)、YR-绿优甘蓝(<i>Brassica oleracea</i> L.var. <i>capitata</i> L.)、极品绿圆甘蓝(<i>Brassica oleracea</i> L.var. <i>capitata</i> L.)、新育黄心白(<i>Brassica rapa</i> var. <i>Glabra</i>)、新抗病鲁白六(<i>Brassica rapa</i> var. <i>Glabra</i>)、奶油小白菜(<i>Brassica rapa</i> var. <i>Glabra</i>)、新改良小杂56(<i>Brassica rapa</i> var. <i>Glabra</i>)、黑叶白梗菜(<i>Brassica rapa</i> var. <i>Glabra</i>)、澳洲多枝甜菜心(<i>Brassica parachinensis</i> L.)、抗热尖叶油麦菜(<i>Lactuca sativa</i> var <i>longifolia</i> f. Lam)、芥菜[<i>Brassica juncea</i> (L.) Czern. et Coss]	2018年11月25日
	#3	京丰1号甘蓝(<i>Brassica oleracea</i> L.var. <i>capitata</i> L.)、YR-绿优甘蓝(<i>Brassica oleracea</i> L.var. <i>capitata</i> L.)、中甘590甘蓝(<i>Brassica oleracea</i> L.var. <i>capitata</i> L.)	
豇豆类 Cowpea vegetables	#3	农丰长豆角(<i>Vigna unguiculata</i>)、金美绿紫红豆角(<i>Vigna unguiculata</i>)	2018年8月12日
	#1	华信春秋红长豆角(<i>Vigna unguiculata</i>)	
茄科类 Solanaceous vegetables	#1	番茄1(<i>Lycopersicon esculentum</i>)、番茄2(<i>Lycopersicon esculentum</i>)、茄子1(<i>Solanum melongena</i> L.)、茄子2(<i>Solanum melongena</i> L.)、五彩椒(<i>Capsicum annuum</i> L.)、指天椒(<i>Capsicum annuum</i> L.)、线椒(<i>Capsicum annuum</i> L.)、野山椒(<i>Capsicum annuum</i> L.)、辣椒(<i>Capsicum annuum</i> L.)	
瓠果类 Gourd vegetables	#1	苦瓜1(<i>Momordica charantia</i> L.)、苦瓜2(<i>Momordica charantia</i> L.)、桂研一号毛节瓜(<i>Benincasa hispida</i> var. <i>chieh-qu</i> a)、香芋南瓜(<i>Cucurbita moschata</i> Duch.)	2018年11月25日
块根类 Root vegetables	#1	生姜1(<i>Zingiber officinale</i> Roscoe)、生姜2(<i>Zingiber officinale</i> Roscoe)	
	#2	改良胭脂红萝卜(<i>Raphanus sativus</i> L.)、七寸人参红萝卜(<i>Raphanus sativus</i> L.)、马尔早包萝卜(<i>Raphanus sativus</i> L.)	
	#3	紫薯1(<i>Solanum tubersm</i>)、紫薯2(<i>Solanum tubersm</i>)	

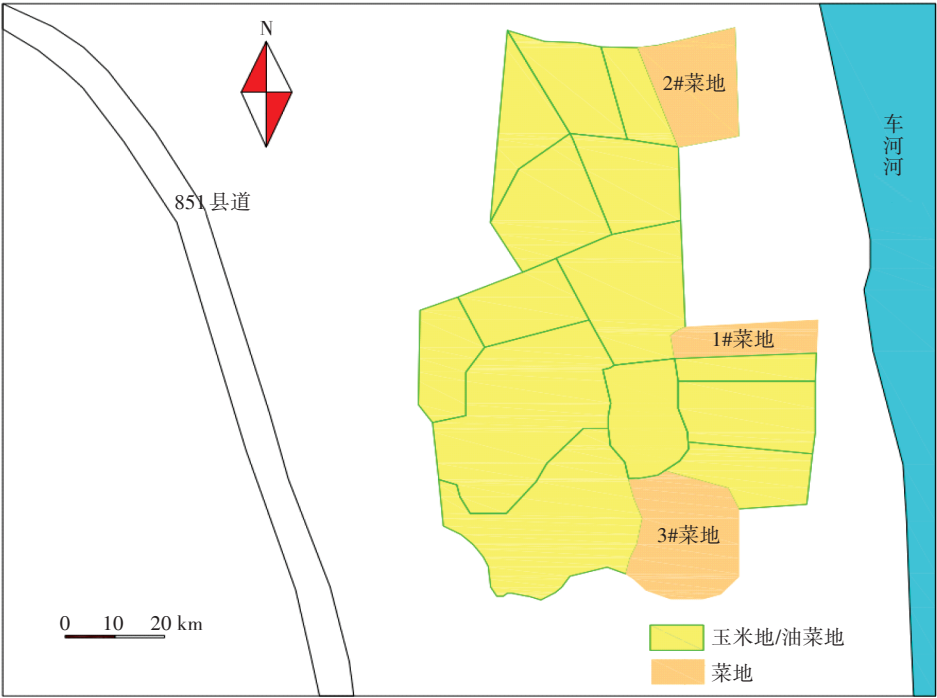


图 1 研究区地块分布图
Figure 1 The location of the study field

Cd和Pb的测定采用石墨炉原子吸收光谱测定方法《食品安全国家标准 食品中镉的测定》(GB 5009.15—2014)《食品安全国家标准 食品中铅的测定》(GB 5009.12—2017);蔬菜样品As的测定采用原子荧光光度法,参照《食品安全国家标准 食品中总砷及无机砷的测定》(GB 5009.11—2014)。

1.4 数据处理

应用Microsoft Excel 2003和SPSS 19.0软件对试验数据进行处理分析。

1.5 数据处理

蔬菜重金属污染评价方法采用单因子污染指数法和综合污染指数法^[10-13],具体计算公式如下。

(1)单因子污染指数计算公式:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$

式中: P_i 为单因子污染指数; C_i 为农产品中重金属质量分数, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; S_i 为食品中重金属污染物限量标准, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;每种重金属在不同蔬菜中的限量标准参照《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)。当 $P_i\leq 1$ 时,表示蔬菜未受污染;当 $P_i > 1$ 时,表示蔬菜受到污染。

(2)综合污染指数法计算公式:

$$P = \sqrt{\frac{(C_i/S_i)_{\max}^2 + (C_i/S_i)_{\text{ave}}^2}{2}}$$

式中: P 为重金属污染综合指数; $(C_i/S_i)_{\max}$ 为单因子污染指数最大值; $(C_i/S_i)_{\text{ave}}$ 为各单因子污染指数的平均值。通常设定 $P\leq 0.7$ 为安全等级, $0.7 < P\leq 1.0$ 为警戒限, $1.0 < P\leq 2.0$ 为轻度污染, $2.0 < P\leq 3.0$ 为中度污染, $P > 3.0$ 为重度污染。

(3)蔬菜可食部位重金属的富集系数计算公式:

$$BCF = C_{\text{蔬菜可食部位}}/C_{\text{土壤}}$$

式中: BCF 为蔬菜可食部位的重金属富集系数; $C_{\text{蔬菜可食部位}}$ 和 $C_{\text{土壤}}$ 分别为蔬菜可食部位和对应土壤中重金属全量,其中富集系数值越小表明蔬菜吸收累积重金属的能力越差。

2 结果与分析

2.1 菜地土壤污染情况

由表2可知,依据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018),3块菜地土壤中Cd、As、Pb的全量值分别是风险筛选值的8.3~9.7、22.3~24.3、1.3~2.6倍,其中Cd、As含量均超过风险管控值。

土壤重金属的生物可利用性是指土壤中重金属毒性程度或可被生物体吸收、积累程度,可有效揭示重金属在土壤-植物系统间的迁移信息,能够更准确地评估重金属元素的迁移性及土壤生态环境风险,目前该指标多采用化学浸提法得到的有效态来表征。由于同一土壤中不同重金属或同一重金属在不同土壤中的有效态可能会存在数量级上的差异,因此采用土壤重金属有效态系数(重金属有效态与全量的比值)来表征重金属有效性强弱^[14]。由表2可知,土壤中重金属有效态并非与重金属全量呈正比关系,其中土壤中Cd的有效态系数最大,As有效态系数最小。

2.2 蔬菜可食部位重金属污染评价及富集能力分析

由表3可知,各种蔬菜主要受重金属Cd污染,受污染蔬菜达到68.3%,其次为Pb(31.7%),蔬菜As污染最小(14.6%)。污染程度处于安全范围内的蔬菜有苦瓜、香芋南瓜、七寸人参红萝卜、紫薯;重度污染的有茄子、五彩椒、野山椒、辣椒、奶油小白菜和抗热

表2 菜地土壤污染情况
Table 2 Situation of soil pollution

项目 Items		菜地#1 Field#1	菜地#2 Field#2	菜地#3 Field#3
重金属全量 Heavy metal concentrations in soil/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Cd	2.76±0.21	2.49±0.36	2.85±0.51
	As	962.00±15.56	906.79±98.47	890.70±82.52
	Pb	167.50±13.44	115.17±2.53	185.91±30.11
重金属有效态 Extractable heavy metal concentrations in soil/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Cd	0.86±0.08	1.94±0.10	1.84±0.12
	As	17.42±3.39	20.60±0.55	13.00±2.12
	Pb	16.88±3.24	28.67±1.34	39.10±5.56
重金属有效态系数 Heavy metal extractable index	Cd	0.34	0.68	0.63
	As	0.02	0.02	0.01
	Pb	0.15	0.15	0.22
pH		6.14±0.05	5.52±0.51	5.24±0.17
有机质 Organic matter/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)		18.80±0.45	28.60±0.56	19.50±0.17

表3 蔬菜重金属污染评价及富集能力分析

Table 3 Analysis pollution index and enrichment factor for heavy metals in vegetables

蔬菜种类 Vegetable types	蔬菜品种 Vegetable varieties	单因子污染指数 Single factor pollution index			综合污染指数 Comprehensive pollution index	污染程度评判 Contamination level	重金属富集系数 Bioconcentration factor		
		Cd	As	Pb			Cd	As	Pb
叶菜类 Leafy vegetables	2#京丰1号甘蓝 (<i>Brassica oleracea</i> L.var. <i>capitata</i> L.)	2.10	0.60	0.67	1.68	轻度	0.168 67	0.000 33	0.001 74
	2#极品绿圆甘蓝 (<i>Brassica oleracea</i> L.var. <i>capitata</i> L.)	2.60	0.46	0.77	2.05	中度	0.208 84	0.000 25	0.002 00
	YR-绿优甘蓝(<i>Brassica oleracea</i> L.var. <i>capitata</i> L.)	2.95	0.90	1.00	2.38	中度	0.236 95	0.000 50	0.002 60
	3#京丰1号甘蓝(<i>Brassica oleracea</i> L.var. <i>capitata</i> L.)	2.50	0.50	1.47	2.06	中度	0.175 44	0.000 26	0.002 02
	3#极品绿圆甘蓝(<i>Brassica oleracea</i> L.var. <i>capitata</i> L.)	1.95	0.52	0.93	1.60	轻度	0.136 84	0.000 27	0.001 28
	中甘590甘蓝(<i>Brassica oleracea</i> L.var. <i>capitata</i> L.)	1.45	0.48	0.65	1.19	轻度	0.101 75	0.000 27	0.001 05
	新育黄心白(<i>Brassica rapa</i> var. <i>glabra</i>)	1.15	0.54	1.13	1.05	轻度	0.092 37	0.000 30	0.002 95
	新抗病鲁白六号(<i>Brassica rapa</i> var. <i>glabra</i>)	2.00	0.84	2.23	1.98	轻度	0.160 64	0.000 46	0.005 82
	奶油小白菜(<i>Brassica rapa</i> var. <i>glabra</i>)	3.70	2.32	3.27	3.41	重度	0.297 19	0.001 28	0.008 51
	新改良小杂56(<i>Brassica rapa</i> var. <i>glabra</i>)	1.20	0.50	0.93	1.05	轻度	0.096 39	0.000 28	0.002 43
	黑叶白梗菜(<i>Brassica rapa</i> var. <i>glabra</i>)	1.40	1.18	2.17	1.90	轻度	0.112 45	0.000 65	0.005 64
	澳洲多枝甜菜心(<i>Brassica parachinensis</i> L.)	3.25	0.68	1.33	2.61	中度	0.261 04	0.000 37	0.003 47
	抗热尖叶油麦菜(<i>Lactuca sativa</i> var. <i>longifolia</i> Lam)	4.30	1.58	4.10	3.84	重度	0.345 38	0.000 87	0.010 68
	芥菜[<i>Brassica juncea</i> (L.) Czern. et Coss.]	0.80	0.46	1.41	1.18	轻度	0.057 97	0.000 24	0.002 53
	均值 Mean						0.177 00	0.000 45	0.003 76
豇豆类 Cowpea vegetables	华信春秋红长豆角(<i>Vigna unguiculata</i>)	0.80	2.20	2.30	2.05	中度	0.028 99	0.001 14	0.002 75
	农丰长豆角(<i>Vigna unguiculata</i>)	0.74	0.26	1.09	0.91	警戒限	0.025 96	0.000 16	0.001 37
	金美绿紫红豆角(<i>Vigna unguiculata</i>)	0.80	0.28	1.31	1.08	轻度	0.028 07	0.000 17	0.001 64
	均值 Mean						0.027 67	0.000 49	0.001 92
茄科类 Solanaceous vegetables	番茄1(<i>Lycopersicon esculentum</i>)	1.20	0.04	0.00	0.90	警戒限	0.021 74	0.000 02	0.000 00
	番茄2(<i>Lycopersicon esculentum</i>)	1.00	0.04	0.00	0.75	警戒限	0.018 12	0.000 02	0.000 00
	茄子1(<i>Solanum melongena</i> L.)	6.20	0.22	0.27	4.66	重度	0.112 32	0.000 11	0.000 16
	茄子2(<i>Solanum melongena</i> L.)	7.00	0.14	0.00	5.23	重度	0.126 81	0.000 07	0.000 00
	五彩椒(<i>Capsicum annuum</i> L.)	4.60	0.06	0.00	3.44	重度	0.083 33	0.000 03	0.000 00
	指天椒(<i>Capsicum frutescens</i> L.)	3.93	0.08	0.00	2.94	中度	0.071 26	0.000 04	0.000 00
	线椒(<i>Capsicum annuum</i> L.)	1.60	0.04	0.20	1.21	轻度	0.028 99	0.000 02	0.000 12
	野山椒(<i>Capsicum annuum</i> L.)	4.60	0.06	0.40	3.46	重度	0.083 33	0.000 03	0.000 24
	辣椒(<i>Capsicum annuum</i> L.)	5.80	0.04	0.60	4.37	重度	0.105 07	0.000 02	0.000 36
	均值 Mean						0.072 33	0.000 04	0.000 10
瓠果类 Gourd vegetables	苦瓜1(<i>Momordica charantia</i> L.)	0.60	0.28	0.20	0.49	安全	0.010 87	0.000 15	0.000 12
	苦瓜2(<i>Momordica charantia</i> L.)	0.80	0.30	0.00	0.62	安全	0.014 49	0.000 16	0.000 00
	桂研一号毛节瓜(<i>Benincasa hispida</i> var. <i>chieh-qua</i>)	1.20	0.20	0.00	0.91	警戒限	0.021 74	0.000 10	0.000 00
	香芋南瓜(<i>Cucurbita moschata</i> Duch.)	0.20	0.08	0.00	0.16	安全	0.072 46	0.000 08	0.000 00
	均值 Mean						0.029 89	0.000 12	0.000 03
块根类 Root vegetables	紫薯1(<i>Solanum tuberosum</i>)	0.19	0.18	0.00	0.19	安全	0.006 67	0.000 10	0.000 00
	紫薯2(<i>Solanum tuberosum</i>)	0.19	0.20	0.00	0.19	安全	0.006 67	0.000 11	0.000 00
	生姜1(<i>Zingiber officinale</i> Roscoe)	1.40	2.40	1.43	1.40	中度	0.050 72	0.001 25	0.000 86
	生姜2(<i>Zingiber officinale</i> Roscoe)	2.30	3.00	2.18	2.30	中度	0.083 33	0.001 56	0.001 31
	改良胭脂红萝卜(<i>Raphanus sativus</i> L.)	0.85	0.38	0.58	0.85	警戒限	0.068 27	0.000 21	0.001 52
	七寸人参红萝卜(<i>Raphanus sativus</i> L.)	0.65	0.84	0.00	0.65	安全	0.052 21	0.000 46	0.000 00
	马尔早白萝卜(<i>Raphanus sativus</i> L.)	1.00	0.42	0.00	1.00	警戒限	0.080 32	0.000 23	0.000 00
	均值 Mean						0.049 74	0.000 56	0.000 53

尖叶油麦菜,其中茄子2受污染程度最重,综合污染指数达5.23。除豇豆类、苦瓜、芥菜、萝卜类、香芋南瓜和紫薯未受Cd污染外,其余蔬菜均不同程度受Cd污染。

所有蔬菜可食部位Cd的富集系数最大,不同种类蔬菜对Cd的富集能力大小为叶菜类>茄科类>块根类>瓠果类>豇豆类,对Pb的富集能力大小为叶菜类>豇豆类>块根类>茄科类>瓠果类,对As的富集能力大小为块根类>豇豆类>叶菜类>瓠果类>茄科类。从同类蔬菜对不同重金属元素的富集能力分析,叶菜类、豇豆类及茄科类蔬菜对3种重金属的富集能力大小为Cd>Pb>As,块根类和瓠果类的大体趋势为Cd>As>Pb。同茄科类的不同蔬菜对Cd和As的富集能力基本表现为茄子>辣椒>番茄,不同甘蓝及辣椒品种的重金属富集能力亦存在一定差异。从均值分析,叶菜类蔬菜对Cd的富集能力基本强于其他类蔬菜,其中抗热尖叶油麦菜对Cd和Pb的富集能力最强,富集系数分别为0.345 38和0.010 68,生姜2对As富集能力最强,富集系数达到0.001 56,紫薯对Cd的富集系数最小,为0.006 67。

为更好地说明Cd、Pb、As 3种重金属元素对本区域蔬菜重金属污染的贡献率水平,进一步反应蔬菜中重金属污染程度的高低,采用因子分析法对蔬菜各重金属单因子污染指数进行分析^[9]。由表4可知,3种重金属元素在蔬菜样品重金属污染中的贡献水平为Cd>Pb>As。

2.3 不同种类蔬菜可食部位重金属富集能力差异分析

采用系统聚类分析法对不同种类蔬菜可食部位的重金属富集能力进行比较^[15]。从图2可知,茄果类、豇豆类、瓠果类和块根类对土壤Cd吸收能力可分为一类,为低吸收类,平均富集系数为0.042,叶菜类为较高吸收类,平均富集系数为0.178;针对Pb元素可分为3类,第一类由茄果类、瓠果类、块根类组成,为低吸收能力,平均富集系数为0.000 2,第二类为豇豆类,中等吸收能力,平均富集系数为0.001 9,第三

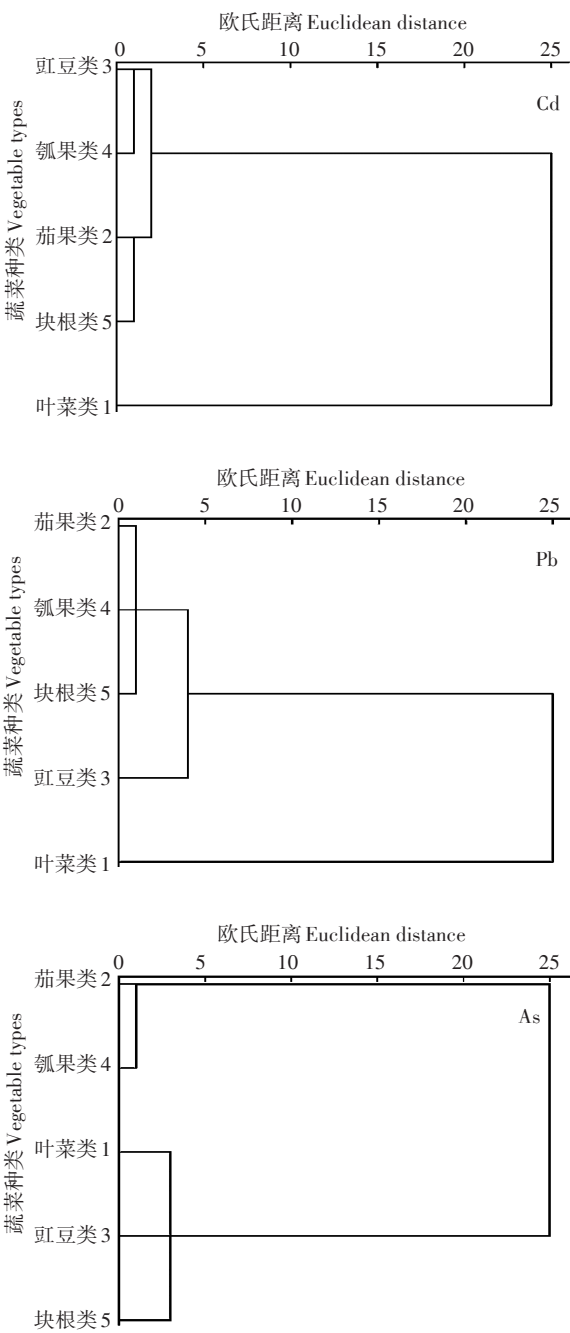


图2 不同种类蔬菜对重金属富集能力的聚类分析结果

Figure 2 Cluster analysis on enrichment capacities of different vegetables for heavy metals

表4 蔬菜中各重金属元素污染程度

Table 4 The contribution of different heavy metals in vegetables pollution

重金属元素 Heavy metal elements	均值 Mean	标准误 Standard error	标准差 Standard deviation	最小值 Minimum	最大值 Maximum	25%分位点 25% of the quantile	50%分位点 50% of the quantile	75%分位点 75% of the quantile	因子得分 Factor score	污染程度 Contamination degree
Cd	2.284 6	0.248 1	1.789 0	0.190 0	2.300 0	0.825 0	1.600 0	3.475 0	1.140 6	1
As	0.605 8	0.098 4	0.709 7	0.040 0	3.000 0	0.158 0	0.460 0	0.640 0	-0.726 0	3
Pb	0.816 5	0.135 1	0.974 1	0	2.300 0	0	0.600 0	1.319 2	-0.416 0	2

类为叶菜类,为较高吸收能力,平均富集系数为0.003 6; As元素可分为两类,第一类由茄果类、瓠果类组成,为低吸收能力,平均富集系数为0.000 09,第二类由叶菜类、豇豆类和块根类组成,为较高吸收能力,平均富集系数为0.000 5。

2.4 蔬菜地上部及地下部的重金属浓度分析

由表5可知,3种重金属在叶菜类不同部位的浓度基本表现为地上部<地下部,而萝卜则表现为地上部>地下部,2类蔬菜中Cd、As、Pb浓度变化趋势为可食部位<非可食部位。同类蔬菜的不同品种可食部位重金属浓度存在差异,萝卜可食部位Cd浓度大小为马尔早白萝卜>改良胭脂红萝卜>七寸人参红萝卜,As为七寸人参红萝卜>马尔早白萝卜>改良胭脂红萝卜,Pb为改良胭脂红萝卜大于其他两种;叶菜类中Cd、Pb浓度最高的为抗热尖叶油麦菜,As含量最高的为奶油小白菜。但叶菜类和萝卜可食部位Cd含量均超过标准线,部分叶菜品种As和Pb超标,萝卜可食部位中As和Pb均超标。

3 讨论

本研究结果表明蔬菜可食部位受3种重金属污

染程度大小为Cd>Pb>As,这与土壤中3种重金属有效态系数大小Cd>Pb>As规律相对应,说明不同重金属在土壤-作物系统中的迁移转化与重金属性质及其在土壤中赋存形态有关,这与邹天森等^[16]研究结果一致,相关研究^[17-20]指出植物从土壤吸收和富集重金属的多少与土壤中重金属的有效态直接相关,对大部分重金属而言,土壤中重金属的有效态含量越高,蔬菜吸收累积的重金属含量也越大。但不同种类蔬菜及同属不同基因型蔬菜受重金属污染程度不同,叶菜类主要受Cd、Pb污染,茄科类主要受Cd污染,豇豆类主要受Pb污染,采集的5大类蔬菜中对Cd的富集能力大小顺序为叶菜类>茄科类>茎块类>瓠果类>豇豆类,其中茄子>辣椒>番茄,此结果与前人研究结果一致^[21-24],相关研究指出蔬菜因自身的生理特性、遗传特性及栽培特点不同,其吸收重金属的生理生化机制各异,造成对重金属元素的积累量差异较大^[25-28]。此外,本研究中同一地块种植的3种甘蓝可食部位Cd、Pb积累量为京丰1号甘蓝>极品绿圆>中甘509甘蓝,3种萝卜可食部位Cd含量为马尔早白萝卜>改良胭脂红萝卜>七寸人参红萝卜,相关研究指出蔬菜不同品种间的重金属累积差异是由于蔬菜品种间生物机制

表5 叶菜类及萝卜类蔬菜地上及地下部重金属浓度(mg·kg⁻¹)

Table 5 Concentrations of heavy metal in leafy and radish vegetables(mg·kg⁻¹)

蔬菜种类 Vegetable types	蔬菜品种 Vegetable varieties	地上部(茎叶)重金属浓度 Concentrations of heavy metal in above ground(stems and leaves)			地下部(根块)重金属浓度 Concentrations of heavy metal in below ground(root block)		
		Cd	As	Pb	Cd	As	Pb
叶菜 Leafy vegetables	#2京丰1号甘蓝(<i>Brassica oleracea</i> L.var. <i>capitata</i> L.)	0.42±0.04e	0.30±0.03ef	0.20±0.03g	1.10±0.01b	2.40±0.06a	1.09±0.08b
	#2极品绿圆(<i>Brassica oleracea</i> L.var. <i>capitata</i> L.)	0.52±0.03d	0.23±0.04g	0.23±0.06fg	0.82±0.05d	0.65±0.04gh	0.43±0.08g
	YR-绿优甘蓝(<i>Brassica oleracea</i> L.var. <i>capitata</i> L.)	0.59±0.03c	0.45±0.05d	0.30±0.04ef	0.94±0.05c	1.10±0.07e	0.69±0.07def
	新育黄心白(<i>Brassica rapa</i> var. <i>glabra</i>)	0.23±0.02f	0.27±0.03fg	0.34±0.05e	0.35±0.03g	0.80±0.06fg	0.17±0.01h
	新抗病鲁白六号(<i>Brassica rapa</i> var. <i>glabra</i>)	0.40±0.04e	0.42±0.06d	0.67±0.06c	0.69±0.03e	0.63±0.03gh	0.58±0.05fg
	奶油小白菜(<i>Brassica rapa</i> var. <i>glabra</i>)	0.74±0.07b	1.16±0.01a	0.98±0.07b	0.97±0.05c	1.28±0.08d	0.83±0.16cd
	新改良小杂56(<i>Brassica rapa</i> var. <i>glabra</i>)	0.24±0.03f	0.25±0.05fg	0.28±0.04ef	1.10±0.03b	1.50±0.16c	0.77±0.16cde
	黑叶白梗菜(<i>Brassica rapa</i> var. <i>glabra</i>)	0.28±0.06f	0.59±0.04c	0.65±0.05c	0.55±0.05f	0.71±0.05fgh	0.41±0.09g
	澳洲多枝甜菜心(<i>Brassica parachinensis</i> L.)	0.65±0.01c	0.34±0.02e	0.41±0.03d	0.98±0.01c	1.70±0.20b	0.52±0.10fg
	抗热尖叶油麦菜(<i>Lactuca sativa</i> var. <i>longifolia</i> Lam)	0.86±0.08a	0.79±0.03b	1.23±0.02a	1.50±0.02a	1.80±0.18b	1.79±0.15a
萝卜 Radish vegetables	#3京丰1号甘蓝(<i>Brassica oleracea</i> L.var. <i>capitata</i> L.)	0.50±0.03d	0.25±0.05fg	0.44±0.03d	0.62±0.03f	0.56±0.05h	0.80±0.09cde
	#3极品绿圆(<i>Brassica oleracea</i> L.var. <i>capitata</i> L.)	0.39±0.03e	0.26±0.04fg	0.28±0.03ef	0.35±0.03g	0.60±0.08h	0.63±0.06ef
	中甘590甘蓝(<i>Brassica oleracea</i> L.var. <i>capitata</i> L.)	0.29±0.05f	0.24±0.01fg	0.20±0.04g	0.61±0.04f	0.85±0.07f	0.90±0.03c
	改良胭脂红萝卜(<i>Raphanus sativus</i> L.)	0.39±0.04a	0.52±0.02c	0.66±0.07a	0.17±0.01b	0.19±0.02b	0.18±0.01a
	七寸人参红萝卜(<i>Raphanus sativus</i> L.)	0.27±0.05b	0.72±0.05b	0.52±0.02b	0.13±0.01c	0.42±0.01a	<0.01±<0.01b
	马尔早白萝卜(<i>Raphanus sativus</i> L.)	0.33±0.05ab	0.86±0.07a	0.49±0.02b	0.20±0.01a	0.21±0.01b	<0.01±<0.01b

注:同列不同小写字母表示不同类蔬菜不同品种间蔬菜各部位的重金属含量差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate that there are significant differences in heavy metal content in the parts of vegetables among different varieties of the similar vegetable types($P<0.05$).

不同,而对重金属表现出不同的吸收能力^[15,29-30]。根据内梅罗综合因子污染指数法判定,叶菜类蔬菜较其他蔬菜更容易累积重金属,本次调查结果中除芥菜外,其余叶类蔬菜 P_{Cd} 均大于1,此结论与大部分研究结果一致^[31-33],故在重金属污染严重的地区应尽量避免种植叶菜类蔬菜,以降低蔬菜的污染风险。同时,本研究结果显示苦瓜、香芋南瓜可在该区域内实现安全种植,由此可知,在重金属重度污染的农田中并不一定不能生产安全蔬菜,为确保蔬菜的安全生产,明确不同蔬菜品种的重金属累积情况及安全阈值是关键。

本研究对叶菜类和萝卜进行了地上和地下部重金属含量分析,叶菜类中重金属含量表现为根>叶,萝卜表现为叶>根,此研究结果与杨晖等^[34]研究结果一致。其原因是不同蔬菜品种由于外部形态及内部结构不同,吸收重金属元素的生理生化机制各异,表现在蔬菜不同器官部位中的重金属浓度不同,其中新陈代谢旺盛器官(根和叶)的重金属含量基本大于营养贮存器官(果实、籽粒、块根)^[23,35]。相关研究指出不同土壤生长条件虽可改变蔬菜对重金属的绝对累积量,但各器官对重金属元素的累积规律不受影响^[36]。如需在污染农田实现蔬菜安全生产,在选择蔬菜类型时需兼顾蔬菜不同器官对重金属的富集特点,保证可食部位的食用安全性,保障人体安全。

4 结论

(1)因土壤环境复杂性及空间异质性,土壤中不同重金属的生物有效性不同,本研究区域土壤Cd的生物有效性显著强于Pb和As。

(2)蔬菜受Cd、As、Pb污染程度与重金属在土壤中的生物有效性有关,本研究中Cd是造成蔬菜重金属污染的主要因子,这是由于酸性条件下Cd活性较强,易被作物吸收,因而多数蔬菜对Cd的富集能力场高于其他重金属元素。

(3)5类蔬菜中叶菜类对Cd、As、Pb的富集能力最强,瓠果类富集能力最低,在发挥农用地土壤最大利用价值的基础上,本研究区域内村民可根据不同蔬菜种类对重金属富集和吸收的差异,合理调整种植布局,避免种植叶类蔬菜,而选择种植苦瓜、南瓜、紫薯、红萝卜等瓠果及根块类蔬菜,以达到有效控制蔬菜重金属污染的目的,亦可实现重度污染农田土壤中有限条件下蔬菜的安全种植,从而保障农产品安全生产,有效降低人体健康受损的潜在风险。

(4)蔬菜的不同部位吸收和累积重金属的能力不同,本研究中叶菜类重金属的浓度大小表现为地下部>地上部,萝卜中重金属浓度表现为地上部>地下部,2类蔬菜不同部位中Cd、As、Pb的浓度大小均表现为可食部位<不可食部位。

参考文献:

- [1] 徐友宁, 张江华, 柯海玲, 等. 某金矿区农田土壤重金属污染的人体健康风险[J]. 地质通报, 2014, 33(8): 1239-1252.
XU You-ning, ZHANG Jiang-hua, KE Hai-ling, et al. Human health risk under the condition of farmland soil heavy metals pollution in a gold mining area[J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(8): 1239-1252.
- [2] 丛鑫, 雷旭涛, 付玲, 等. 海州煤矿研石山周边土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 地球与环境, 2017, 45(3): 329-335.
CONG Xin, LEI Xu-tao, FU Ling, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in soils around the gangue heap of Haizhou coal mine, China[J]. *Earth and Environment*, 2017, 45(3): 329-335.
- [3] 谢团辉, 郭京霞, 陈炎辉, 等. 福建省某矿区周边土壤-农作物重金属空间变异特征与健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(3): 544-554.
XIE Tuan-hui, GUO Jing-xia, CHEN Yan-hui, et al. Spatial variability and health risk assessment of heavy metals in soils and crops around the mining area in Fujian Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(3): 544-554.
- [4] 金枚. 大厂矿区农产品安全性分析[D]. 南宁: 广西师范学院, 2013.
JIN Mei. Analysis of the safety of agricultural products from Dachang Mining Area[D]. Nanning: Nanning Normal University, 2013.
- [5] 邹素芬, 张云霞, 余元元, 等. 广西南丹土壤-玉米重金属劣迹特征及其健康风险[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(8): 706-714.
ZOU Su-fen, ZHANG Yun-xia, YU Yuan-yuan, et al. Characteristics of heavy metal accumulation in soil-corn system contents and their health risks in Nandan, Guangxi[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(8): 706-714.
- [6] 陆素芬, 宋波, 伏凤艳, 等. 南丹矿业活动影响区蔬菜重金属含量及健康风险[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(3): 478-485.
LU Su-fen, SONG Bo, FU Feng-yan, et al. Heavy metal content in vegetable and its health risk as affected by mining activities in Nandan County[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(3): 478-485.
- [7] 宋书巧, 吴欢, 黄钊, 等. 刁江沿岸土壤重金属污染特征研究[J]. 生态环境, 2005, 14(1): 34-37.
SONG Shu-qiao, WU Huan, HUANG Zhao, et al. The characteristics of heavy metals in soils along Diaojiang River[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(1): 34-37.
- [8] 蔡刚刚, 张学洪, 梁美娜, 等. 南丹大厂矿区周边农田土壤重金属健康风险评价[J]. 桂林理工大学学报, 2014, 34(3): 554-559.
CAI Gang-gang, ZHANG Xue-hong, LIANG Mei-na, et al. Health risk assessment of heavy metals pollution in farmland soil surrounding

- Dachang ore district in Nandan[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2014, 34(3):554-559.
- [9] 邹素敏, 杜瑞英, 文典, 等. 不同品种蔬菜重金属污染评价和富集特征研究[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(4):714-720.
- ZOU Su-min, DU Rui-ying, WEN Dian, et al. Enrichment characteristics analysis and assessment on heavy metal contamination of different vegetables[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(4):714-720.
- [10] 罗松英, 柯思茵, 王嘉琦, 等. 湛江市郊蔬菜地土壤重金属空间分布特征及来源分析[J]. *南方农业学报*, 2019, 50(8):1709-1717.
- LUO Song-ying, KE Si-yin, WANG Jia-qi, et al. Spatial distribution and source analysis of heavy metals content in vegetable field soils in suburb of Zhanjiang[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2019, 50(8):1709-1717.
- [11] 高杨, 李琦, 许东升. 煤矿区果类蔬菜重金属富集特征及污染风险评价[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2018, 35(5):64-70.
- GAO Yang, LI Qi, XU Dong-sheng. Enrichment characteristics and pollution risk assessment of heavy metals in fruit vegetable around coal mine[J]. *J Shanxi Agric Univ(Natural Science Edition)*, 2018, 35(5):64-70.
- [12] 张鹏帅, 朱旭彬, 苏雪玲, 等. 福州市郊农田土壤与蔬菜重金属污染状况分析[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 34(3):85-94.
- ZHANG Peng-shuai, ZHU Xu-bin, SU Xue-ling, et al. Analysing the pollution of heavy metal contamination in soils and vegetables in Fuzhou suburb[J]. *Journal of Fujian Normal University(Natural Science Edition)*, 2018, 34(3):85-94.
- [13] 刘辉, 邹继颖, 边红枫, 等. 菜地土壤重金属污染状况及对蔬菜安全性分析[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(22):175-180.
- LIU Hui, ZOU Ji-ying, BIAN Hong-feng, et al. Heavy metal pollution in vegetable soils and analysis of vegetable safety[J]. *Food Research and Development*, 2018, 39(22):175-180.
- [14] 杨军, 陈同斌, 郑袁明, 等. 北京市凉水河灌区小麦重金属含量的动态变化及健康风险分析[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(12):1661-1668.
- YANG Jun, CHEN Tong-bin, ZHENG Yuan-ming, et al. Dynamic of heavy metals in wheat grains collected from the Liangfeng Irrigated Area, Beijing and a discussion of availability and human health risks [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(12):1661-1668.
- [15] 欧阳喜辉, 赵玉杰, 刘凤枝, 等. 不同种类蔬菜对土壤镉吸收能力的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 27(1):67-70.
- OUYANG Xi-hui, ZHAO Yu-jie, LIU Feng-zhi, et al. Absorption ability of different types of vegetables for soil Cd in Beijing[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1):67-70.
- [16] 邹天森, 潘丽波, 吕占禄, 等. 某废弃铅冶炼场周边蔬菜重金属污染水平及来源解析[J]. *环境污染与防治*, 2019, 41(10):1218-1226.
- ZOU Tian-sen, PAN Li-bo, LÜ Zhan-lu, et al. Contents and source appointment of heavy metal in vegetables in the area of abandoned lead smelting site[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, 41(10):1218-1226.
- [17] 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 Ying, MA Lu-yao, WANG Qiong, 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.
- [18] Fairbrother A, Wenstel R, Sappington K, et al. Framework for metals risk assessment[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2007, 68(2):145-227.
- [19] 李其林. 重庆市土壤-作物系统重金属特性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2008.
- LI Qi-lin. On characteristics of heavy metals of soil-crop system in Chongqing, China[D]. Chongqing:Southwest University, 2008.
- [20] 张景茹, 周永章, 叶脉, 等. 土壤-蔬菜中重金属生物可利用性及迁移系数[J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(12):256-266.
- ZHANG Jing-ru, ZHOU Yong-zhang, YE Mai, et al. Bioavailability of heavy metal and transfer factors in a regional soil-to-crops system [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(12):256-266.
- [21] 郭海涛. 不同蔬菜吸收累积镉的差异研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2009.
- GUO Hai-tao. Differences of absorption and accumulation of cadmium by vegetables[D]. Beijing:Capital Normal University, 2009.
- [22] Yang J, Guo H, Ma Y, et al. Genotypic variations in the accumulation of Cd exhibited by different vegetables[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(8):1246-1252.
- [23] 张泽锦, 唐丽, 李跃建, 等. 四川地区低镉富集蔬菜品种分析及安全性评估[J]. *西南农业学报*, 2016, 29(10):2483-2487.
- ZHANG Ze-jin, TANG Li, LI Yue-jian, et al. Analysis of low cadmium collection capacity vegetables and food safety assessment of vegetables in Sichuan Province[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29(10):2483-2487.
- [24] 李富荣, 李敏, 杜应琼, 等. 茄果类蔬菜对其产地土壤重金属的吸收富集与安全阈值研究[J]. *农产品质量与安全*, 2018(1):52-58.
- LI Fu-rong, LI Min, DU Ying-qiong, et al. Solanaceous vegetable's absorption and accumulation of heavy metal in soil of producing area and its safety threshold[J]. *Quality and Safety of Agro-products*, 2018(1):52-58.
- [25] 陈志良, 黄玲, 周存宇, 等. 广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价[J]. *环境科学*, 2017, 38(1):389-398.
- CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, et al. Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in vegetables in Guangzhou[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(1):389-398.
- [26] 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.
- [27] 刘霞, 刘树庆, 唐兆宏. 河北主要土壤中 Cd、Pb 形态与油菜有效性的关系[J]. *生态学报*, 2002, 22(10):1688-1694.
- LIU Xia, LIU Shu-qing, TANG Zhao-hong. The relationship between Cd and Pb forms and their availability to rape in major soils of Hebei

- Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(10):1688-1694.
- [28] 邹日, 沈镒, 柏新富, 等. 重金属对蔬菜的生理影响及其富集规律研究进展[J]. 中国蔬菜, 2011(4):1-7.
- ZOU Ri, SHEN Di, BAI Xin-fu, et al. Research progress on physiological effect of heavy metals in vegetables and their accumulation rule[J]. *China Vegetables*, 2011(4):1-7.
- [29] 张海波. 不同辣椒品种镉积累差异及外源物质对镉富集的调控效应[D]. 重庆:西南大学, 2013.
- ZHANG Hai-bo. Studies on the difference of Cd accumulation in different varieties of peppers (*Capsicum annum* L.) and the regulation effects of allogenic material[D]. Chongqing:Southwest University, 2013.
- [30] 刘维涛, 周启星, 孙约兵, 等. 大白菜 (*Brassica pekinensis* L.) 对镉富集基因型差异的研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(2):226-236.
- LIU Wei-tao, ZHOU Qi-xing, SUN Yue-bing, et al. Genotypic variation of cadmium accumulation in Chinese cabbage (*Brassica pekinensis* L.) [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2010, 18(2):226-236.
- [31] 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 Chun-xia, CHEN Zhen-lou, ZHANG Ju, et al. Heavy metal pollution assessment of vegetables in Pudong zone of Shanghai[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(4):761-765.
- [32] 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 Jun-jie, LI Na, WU Yong-ning, 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.
- [33] 胡文友, 黄标, 马宏卫, 等. 南方典型设施蔬菜生产系统镉和汞累积的健康风险[J]. 土壤学报, 2014, 51(5):1045-1055.
- HU Wen-you, HUANG Biao, MA Hong-wei, et al. Health risk of accumulation of cadmium and mercury in greenhouse vegetable production systems typical of south China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(5):1045-1055.
- [34] 杨晖, 梁巧玲, 赵鹏, 等. 7种蔬菜型作物重金属积累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 Hui, LIANG Qiao-ling, ZHAO Li, 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.
- [35] 王焕校. 污染生态学[M]. 北京:高教出版社, 2000:18-19.
- WANG Huan-xiao. Pollution ecology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000:18-19.
- [36] 吴琦, 杨菲, 季辉, 等. 土壤重金属 Pb 和 Cd 在蕹菜中的累积特征及产地环境安全临界值[J]. 中国蔬菜, 2010, 1(10):29-34.
- WU Qi, YANG Fei, JI Hui, et al. Soil Pb and Cd accumulative characteristics in swamp cabbage (*Ipomoea aquatica* Forsk.) and their environmental critical values in production area for food security[J]. *China Vegetables*, 2010, 1(10):29-34.