

高鑫, 颜蒙蒙, 曾希柏, 等. 京津冀地区设施土壤中不同蔬菜对镉的累积特征[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2541–2548.

GAO Xin, YAN Meng-meng, ZENG Xi-bai, et al. Cadmium accumulation characteristics of different vegetables in greenhouse soils in the Beijing, Tianjin, and Hebei(BTH) Area, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(11): 2541–2548.

京津冀地区设施土壤中不同蔬菜对镉的累积特征

高鑫^{1,2}, 颜蒙蒙¹, 曾希柏¹, 白玲玉¹, 王亚男¹, 陈清², 赵会薇³, 苏世鸣^{1*}

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所/农业部农业环境重点实验室, 北京 100081; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 3. 国家半干旱农业工程技术研究中心, 石家庄 050051)

摘要:为通过种植替代方式保障京津冀地区农产品安全和居民健康,开展该地区设施蔬菜对土壤镉累积特征研究,从而获得镉低累积蔬菜品种。基于京津冀地区种植的典型蔬菜类型和品种,采用野外调查和田间小区试验相结合的方式开展研究。结果表明:叶类蔬菜相对瓜果类具有更高的镉累积风险,瓜果类蔬菜是京津冀地区镉污染设施土壤上推荐种植的蔬菜类型;当土壤镉含量为 $0.76\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,不同种类叶菜地上部镉含量大小排序依次为芝麻菜>油麦菜>菠菜>芥菜>苋菜>生菜>菜心>苦苣>小白菜>咖啡菜>茼蒿,其中芝麻菜地上部镉含量最高,为 $0.13\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 鲜质量,茼蒿最低为 $0.005\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 鲜质量;进一步对64种叶菜品种累积镉特征研究发现,茼蒿、汉堡速生咖啡菜、翠英256和特选板叶茼蒿等对镉的累积量较低,其地上部镉含量 $<0.01\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 鲜质量,远低于《食品安全国家标准》(GB 2762—2017)规定的 $0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 鲜质量,适合在镉污染设施土壤上开展替代种植;物种敏感性分布曲线(SSD)评价该64种叶菜品种对土壤镉毒性的敏感程度发现,咖啡麦当菜、蔬菠2号、芝麻菜和佳园芥蓝对土壤镉的毒性最为敏感,而茼蒿属于不敏感品种。研究表明,不同种类以及相同种类不同品种蔬菜间镉累积能力差异明显,筛选镉低累积蔬菜品种,在镉污染土壤上开展替代种植具有科学意义。

关键词:京津冀;设施土壤;镉;叶菜;替代种植;物种敏感性分布曲线

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2018)11-2541-08 **doi:** 10.11654/jaes.2018-0908

Cadmium accumulation characteristics of different vegetables in greenhouse soils in the Beijing, Tianjin, and Hebei(BTH) Area, China

GAO Xin^{1,2}, YAN Meng-meng¹, ZENG Xi-bai¹, BAI Ling-yu¹, WANG Ya-nan¹, CHEN Qing², ZHAO Hui-wei³, SU Shi-ming^{1*}

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agro-Environment, Ministry of Agriculture of China, Beijing 100081, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3. The Semi-arid Agriculture Science and Technology Research Center of China, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: It is very important to understand cadmium (Cd) accumulation in greenhouse vegetables in the Beijing, Tianjin, and Hebei (BTH) Area, where Cd low-cumulative vegetable varieties have been screened out, to ensure the safety of agricultural products and the health of residents through substitution plantations. Based on the vegetable types and varieties planted in the BTH, this study involved outdoor surveys and field plot experiments. The results indicated that leafy vegetables had a higher risk of Cd accumulation than melon and fruit; the latter was recommended for planting in Cd-contaminated greenhouse soils. When the Cd content in the soils reached $0.76\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, the Cd content in different leafy vegetables decreased in the following order: Arugula (*Eruca sativa* Mill.), Oil wheat (*Lactuca sativa* var *longifolia* Lam), Spinach (*Spinacia oleracea* L.), Mustard (*Brassica juncea* (L.) Czern. et Coss.), Chives (*Amaranthus tricolor* L.),

收稿日期: 2018-07-11 录用日期: 2018-09-17

作者简介: 高鑫(1996—),山西运城人,硕士研究生,主要从事农业面源和重金属污染防治技术研究。E-mail: natie2017@163.com

*通信作者: 苏世鸣 E-mail: sushiming@caas.cn

基金项目: 国家重点研发课题(2016YFD0801003); 现代农业产业技术体系专项资金项目(CARS-23-B16)

Project supported: The National Key R&D Program of China (2016YFD0801003); Special-funds Project of China Agriculture Research System (CARS-23-B16)

Lettuce (*var. ramosa* Hort.), Dish heart (*Brassica campestris* L.), Chicory (*Sonchus oleraceus* L.), Chinese cabbage (*Brassica campestris* L.), Coffee dish (*Brassica pekinensis* R.), Crowndaisy chrysanthemum (*Chrysanthemum coronarium* L.). The highest Cd content was $0.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ by leaf fresh weight (Arugula), while the lowest Cd content was $0.005 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Crowndaisy chrysanthemum). Further studies of Cd accumulation in 64 leafy vegetable cultivars showed that the Cd contents in the Artemisia, Coffee dish, Cuiying 256 and Texuan Artemisia scoparia were lower than $0.01 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ by fresh weight, which is below the limit ($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) specified by National Food Safety Quality Standards. Furthermore, the sensitivity of the 64 leaf vegetable cultivars to soil Cd was evaluated using a species sensitivity distribution curve (SSD). Coffee McDonald's, Vegetable Spinach No.2, Arugula and Jiayuan mustard were the most sensitive to soil Cd toxicity, while Crowndaisy chrysanthemum was an insensitive variety. Significant differences were observed in Cd accumulation among different types or varieties of vegetables. It is highly significant to screen Cd low-cumulative vegetable varieties for future substitution plantations in Cd-contaminated soils.

Keywords: Beijing-Tianjin-Hebei Areas (BTH); greenhouse soil; cadmium; leaf vegetables; substitution plantation; species sensitivity distribution curve (SSD)

京津冀地区设施蔬菜产业已经发展了近30年,其在保障该地区蔬菜农产品供应、居民食品安全方面具有重要意义。该地区设施蔬菜生产水肥(尤其是粪肥和磷肥)投入大、复种指数高,特别是20世纪80年代初期推行的农田污灌等的影响,导致该地区设施土壤环境质量持续下降^[1-4],给该地区设施蔬菜安全生产带来很大影响。部分区域设施土壤出现重金属元素超标和农产品安全问题已引起较大关注^[5-8]。相比其他污染元素,镉在设施土壤中的累积现象最为普遍^[9],且由于镉在土壤中有相对较高的生物有效性,迁移性强,容易被吸收并转移到植物的不同部位,因此对蔬菜产品安全和人类健康所造成的威胁更大^[10-11]。

筛选低镉吸收能力的蔬菜品种,并在镉超标设施土壤上开展替代种植是一种有效应对土壤重金属污染的修复技术。与瓜果类、根茎类蔬菜相比,叶类蔬菜对镉的累积吸收能力较强^[12],累积镉风险更高。市场上叶菜种类多,品种更替快,不同种类和品种之间对镉的累积差异亦较大,因此系统性地比较不同种类或品种叶菜对镉累积差异对于今后选择镉低吸收叶类蔬菜品种开展替代种植、阻控镉向叶类蔬菜累积具有重要意义。

本研究采用野外调查和田间小区试验相结合的方式开展,首先明确不同类型蔬菜对镉累积能力的差异,其次比较了11个不同种类蔬菜共64个蔬菜品种对镉的累积风险,并基于物种敏感度分布曲线^[13],确定了每种蔬菜对土壤中镉毒性的敏感性程度差异。相关结果对于今后通过种植替代方式减少京津冀地区设施叶菜重金属镉累积风险具有重要参考价值。

1 材料与方法

1.1 调查采样

选取河北青县、北京大兴、天津武清的设施大棚

为调查区域,采用点对点采样法采集不同蔬菜可食部位样品及对应根区土壤样品。调查共采集54个大棚,其中河北青县采集大棚32个、北京大兴9个、天津武清13个。调查共采集到6个蔬菜种类,分别为黄瓜、豆角、西红柿、油麦菜、苋菜和白菜,其样本数分别为20、10、6、8、5个和5个。各大棚蔬菜和对应土壤样品均采用5点混合法采集,均匀混合后,所有样品带回实验室分析。

1.2 田间试验

试验共选择11种京津冀地区设施农业常见的叶类蔬菜,包括:菜心、油麦菜、生菜、茼蒿、小白菜、苋菜、菠菜、芥菜、苦苣、芝麻菜和咖啡菜。该11种叶类蔬菜包含64个蔬菜品种,具体编号及对应品种等信息见表1。田间小区试验于2017年在河北青县李家营村设施大棚开展。供试的两个大棚中土壤总镉含量依次为 $0.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,依据《温室蔬菜产地环境质量评价标准》(HJ 333—2006,当土壤 $\text{pH} > 7.5$ 时土壤总镉含量限值为 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),两个供试土壤的镉污染水平分别属于尚清洁和超标等级。大棚内各小区面积统一为 15 m^2 (宽3 m、长5 m),各蔬菜品种处理3次重复。小区内种植密度依据各蔬菜种植特点设定。收获期采集各小区4~5株蔬菜地上部样品及对应根区土壤样品经均匀混合后带回实验室。植株样品经称取鲜质量后杀青、烘干称干质量,之后研磨,用于植株总镉含量分析;土壤样品经风干过筛后,分析土壤总镉含量。试验大棚内土壤有机质平均含量 $23.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $1.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $11.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $103.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤 pH 7.6。

1.3 测定项目及方法

土壤中总镉的测定参考 GB/T 17141—1997 进行。称取土壤样品 0.5000 g 左右,放置于聚四氟乙烯坩埚中,采用四酸消解,浓盐酸、浓硝酸、氢氟酸和高氯酸

表1 64种叶类蔬菜品种名称和生产商

Table 1 Variety names and purchasing places of 64 leaf vegetables

编号 Number	种类 Species	品种 Variety	生产商 Producer
1	菜心	四九菜心	北京绿金蓝种苗有限责任公司
2	菜心	京翠1号	北京京研益农科技发展中心
3	菜心	绿宝701	广州市农业科学研究院
4	菜心	翠绿菜心	北京市特种蔬菜种苗公司
5	油麦菜	汉斯205-紫玉	北京华蔬种子有限公司
6	油麦菜	汉斯沙拉	北京华蔬种子有限公司
7	油麦菜	汉堡咖啡香麦菜	北京华蔬种子有限公司
8	油麦菜	纯香油麦菜	中蔬种业科技有限公司
9	油麦菜	翠香油麦菜	北京绿东方农业技术研究所
10	油麦菜	紫油麦菜	北京绿东方农业技术研究所
11	油麦菜	更香油麦菜	北京绿东方农业技术研究所
12	油麦菜	王中王尖叶油麦菜	中蔬种业科技有限公司
13	油麦菜	美冠油麦菜	河北粒尔田有限公司
14	油麦菜	香油麦菜	北京华蔬种子有限公司
15	生菜	意大利耐抽苔	北京绿东方农业技术研究所
16	生菜	翡翠娃娃	北京绿东方农业技术研究所
17	生菜	红皱	北京绿东方农业技术研究所
18	生菜	沙拉碗	北京市裕农优质农产品种植公司
19	生菜	罗马生菜	中蔬种业科技有限公司
20	生菜	紫生菜	中国农业科学院蔬菜花卉研究所
21	生菜	大速生	中国农业科学院蔬菜花卉研究所
22	生菜	嫩绿奶油生菜	中蔬种业科技有限公司
23	生菜	咖啡麦当菜	中蔬种业科技有限公司
24	生菜	汉斯203-紫霞	北京华蔬种子有限公司
25	生菜	汉斯八宝菜	北京华蔬种子有限公司
26	生菜	速生青油	河北粒尔田有限公司
27	生菜	大速生菜	河北粒尔田有限公司
28	生菜	美国大速生	河北粒尔田有限公司
29	生菜	汉堡麦多香	北京华蔬种子有限公司
30	生菜	汉堡翡翠营养菜	北京华蔬种子有限公司
31	茼蒿	特选板叶茼蒿	上海兴绿蔬菜种苗研究所
32	茼蒿	优选光杆茼蒿	兴农蔬菜种苗有限公司
33	茼蒿	茼蒿	北京华蔬种子有限公司
34	小白菜	翠英256	中国农业科学院蔬菜花卉研究所
35	小白菜	速生1号	中国农业科学院蔬菜花卉研究所
36	小白菜	极早三十日	北京绿金蓝种苗有限责任公司
37	小白菜	乌塌菜	北京绿金蓝种苗有限责任公司
38	小白菜	绿优青梗菜	长沙新万农种业有限公司
39	小白菜	绿冠速生	北京华茂永盛种子有限公司
40	小白菜	四季小白菜	青县纯丰蔬菜良种繁育场
41	小白菜	寒绿青梗菜	北京华蔬种子有限公司
42	小白菜	倩冠青梗菜	北京华蔬种子有限公司
43	大白菜	四季快菜	北京华蔬种子有限公司
44	小白菜	青施梗小白菜	北京华蔬种子有限公司
45	小白菜	夏绿2号杂交一代	京研益农中业科技有限公司
46	小白菜	汉堡-紫翠	北京华蔬种子有限公司

续表 1 64 种叶类蔬菜品种名称和生产商
Continued table 1 Variety names and purchasing places of 64 leaf vegetables

编号 Number	种类 Species	品种 Variety	生产商 Producer
47	小白菜	夏青 2 号(北京把油菜)	北京中农艺园种子有限公司
48	小白菜	绿油一号	北京市特种蔬菜种苗公司
49	小白菜	绿锦青梗菜	青岛金海种苗有限公司
50	苋菜	佳园花叶苋菜	中蔬种业科技有限公司
51	苋菜	白圆叶苋菜	长沙新万农种业有限公司
52	苋菜	红柳叶苋菜	长沙新万农种业有限公司
53	菠菜	蔬菠 8 号	中国农业科学院蔬菜花卉研究所
54	菠菜	盛夏菠冠 668	兴农蔬菜种苗有限公司
55	菠菜	超级冠军 688/厚叶菠菜	宁夏平罗昊丰蔬菜种苗有限公司
56	菠菜	蔬菠 1 号	中蔬种业科技有限公司
57	菠菜	蔬菠 2 号	中蔬种业科技有限公司
58	菠菜	丹麦菠特超级 8 号	兴农蔬菜种苗有限公司
59	芥菜	香满园香芥菜	中蔬种业科技有限公司
60	芥菜	佳园芥蓝	中蔬种业科技有限公司
61	苦苣	佳园菊花菜	中蔬种业科技有限公司
62	苦苣	金花苦苣	寿光市顺昌种业销售中心
63	芝麻菜	芝麻菜	北京绿金蓝种苗有限责任公司
64	咖啡菜	汉堡速生咖啡菜	中蔬种业科技有限公司

添加比例为 5:10:2:1,消解液经定容后采用 ICP-MS 测定镉含量。植株总镉含量测定依据食品中镉的测定标准 GB/T5009.15—2003 进行。称取样品 0.200 0 g 于三角瓶中,10 mL 混合酸(硝酸与高氯酸按 9:1 比例混合)消解后定容,采用 ICP-MS 测定样品镉含量。上述样品分析过程中加入标准土壤(GBW07405、GBW07406)和标准植物样品(GBW10015、GBW10048)进行过程质量控制,标准品回收率范围为 92.3%~105.6%。

1.4 数据统计

试验数据采用 Excel 2013、SPSS Statistics 进行统计作图并进行方差分析,采用最小显著性差异法(LSD)对数据进行多重比较,显著性水平为 0.05。叶菜生物富集系数(Bio-concentration factors, BCFs)计算方法为叶菜可食部分镉含量与土壤总镉含量的比值;不同蔬菜品种对重金属镉的敏感性分布曲线(SSD)采用 BurrliOZ 2.0 软件进行,模型的具体计算方法采用 Burr-Ⅲ型函数参数方程:

$$F(x)=\frac{1}{[1+(\frac{b}{x})^c]^k}$$

式中: x 为叶菜 1/BCF 的实测值; b 、 c 、 k 为函数的 3 个拟合参数。专业计算软件详见澳大利亚联邦科学和工

业研究组织(http://www.csiro.au/products/Burr_III.html)。

2 结果与讨论

2.1 蔬菜类型间对镉累积能力的差异

通过调查京津冀地区主要设施蔬菜产区作物可食部位镉含量,比较了 6 种常见的大棚种植蔬菜镉含量差异,结果如图 1 所示。黄瓜、豆角、西红柿、油麦菜、苋菜和白菜可食部位镉含量分别为 0.000 9、0.003 0、0.001 5、0.022 1、0.021 1、0.012 1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 鲜质量。总体上看,各蔬菜可食部位镉含量均明显低于国家食品卫生相关标准(0.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 鲜质量)。不同蔬菜类型之间比较来看,瓜果类蔬菜(黄瓜、豆角和西红柿)可食部位镉含量显著低于叶类蔬菜(油麦菜、苋菜和白菜)。此外,6 种蔬菜对土壤镉的生物富集系数具有相似规律,即瓜果类蔬菜对镉富集系数明显低于叶类蔬菜。蔬菜镉含量和生物富集系数大小顺序依次为苋菜>油麦菜>白菜>豆角≈西红柿≈黄瓜。叶类蔬菜相对于瓜果类蔬菜具有更高的镉累积风险,瓜果类蔬菜应被选为京津冀地区镉污染设施土壤上推荐种植的蔬菜类型。该结果与前人研究相一致,如徐笠等^[6]通过分析北京市设施菜田的大量调研数据发现,瓜果类蔬菜富集土壤镉的能力最弱,远小于叶类蔬菜

和根类蔬菜。李霞等^[8]的调查研究表明,不同类型蔬菜吸收镉的能力大小排序依次为叶菜类>块茎类>瓜果类。有研究表明,叶类蔬菜叶片表面积大,表面蒸发作用强,更容易富集吸收土壤和空气中的镉^[14-15],而瓜果类蔬菜由于土壤中重金属元素向其可食部位迁移距离较远,表现出较弱的镉富集能力^[16]。此外,不同蔬菜对土壤镉的生理生化响应及其分子生物学过程差异亦是造成其富集镉能力不同的主要原因^[17-19]。

2.2 不同种类叶菜对镉累积能力的比较

叶类蔬菜对土壤镉的累积能力不仅存在显著的类型间差异,同时也在一定程度上表现出科属亲缘特性^[20]。本研究通过田间小区试验分析了11种不同蔬菜对镉的累积能力差异。从图2中可以看到,不同叶菜种类之间以及不同镉污染土壤上叶菜地上部镉含量存在较大差异。不同种类叶菜比较来看,当土壤镉含量为 $0.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,芝麻菜地上部镉含量最高,为

$0.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 鲜质量,茼蒿最低为 $0.005 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 鲜质量,两者相差约25倍。不同种类叶菜地上部镉含量大小排序依次为芝麻菜>油麦菜>菠菜=芥菜>苋菜>生菜>菜心>苦苣>小白菜>咖啡菜>茼蒿;不同土壤镉浓度比较来看,相同种类蔬菜的镉含量与土壤中镉浓度存在一定的正相关关系,且两种镉浓度土壤上,不同叶菜地上部镉含量大小排序有很好的-一致性,表明不同种类叶菜的镉累积能力差异在不同镉污染土壤上的稳定性很好。方华^[20]研究发现在盆栽土壤镉含量为 $2.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,叶类蔬菜地上部植株镉含量大小排序依次为油麦菜>生菜>菜薹>茼蒿>空心菜>芹菜>小白菜>大白菜>芥菜>香菜>苦苣>香葱>甘蓝>木耳菜>茼蒿>苋菜>韭菜。该结果与本论文研究存在一定差异,这可能与试验采用的供试土壤理化特征、镉浓度水平及供试蔬菜品种等方面的差异有关^[21]。此外,本研究中所有蔬菜镉含量均未超过国家食品安全标准中的蔬菜镉限定值 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 鲜质量。

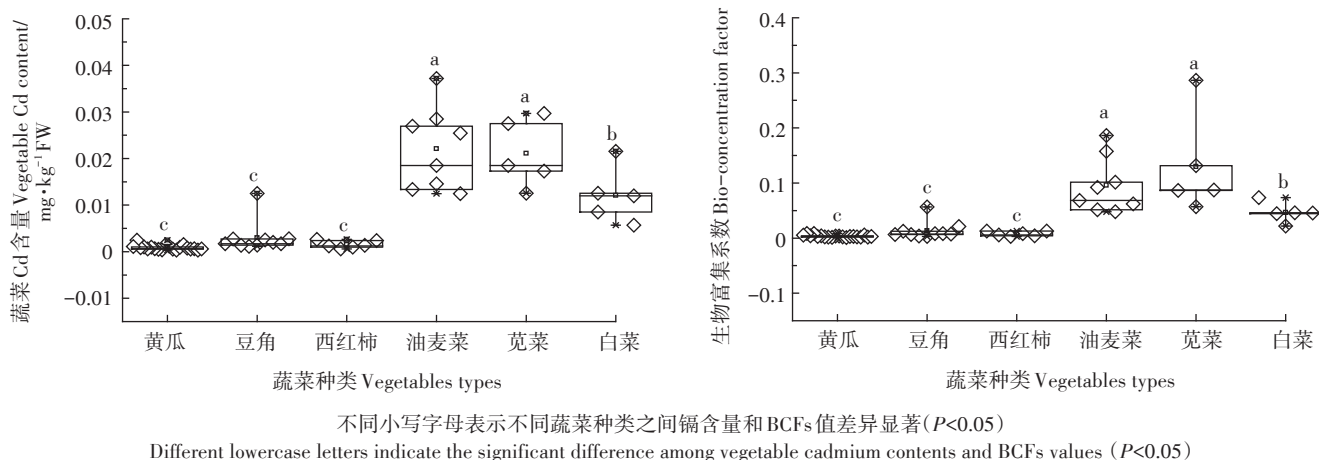


图1 不同种类蔬菜镉含量和生物富集系数比较

Figure 1 Comparison of cadmium content and bio-concentration factor in different types of vegetables

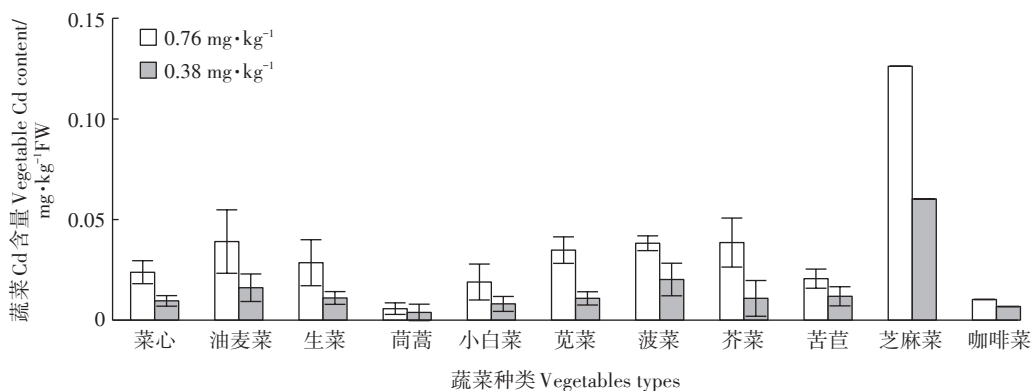


图2 设施土壤上11种不同叶菜地上部镉含量

Figure 2 Cadmium content in 11 leafy vegetables grown in greenhouse soils

进一步对11种不同叶菜对土壤镉的生物富集系数进行聚类分析发现,在两种镉污染土壤上不同叶菜积累能力聚类分析具有良好的一致性。本论文选择镉超标设施土壤($0.76\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)上的相关结果进行分析,如图3所示。11种叶菜对镉的积累能力差异可划分为2类:第1类是菜心、苋菜、生菜、苦苣、油麦菜、小白菜、咖啡菜、茼蒿和菠菜,为镉中低积累类群;第2类是芥菜、芝麻菜,为镉高积累类群。

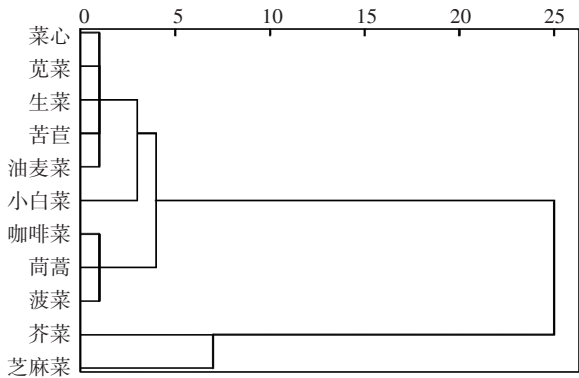


图3 11种叶菜类蔬菜对镉生物富集系数聚类分析
Figure 3 Cluster analysis of Cd bio-concentration factor of 11 leafy vegetables

2.3 叶类蔬菜品种对镉累积能力的差异

为明确不同蔬菜品种对镉累积能力的差异,进一步分析了上述11个蔬菜种类涉及的64个叶菜品种对镉累积能力的差异。结果如图4所示,64个叶菜品种地上部镉含量均未超过国家食品卫生标准,表明该区域设施蔬菜生产相对清洁。但不同叶菜品种间对镉的累积状况存在显著差异。如芝麻菜和紫油菜有着相对较高的镉累积能力,其中以芝麻菜对镉的累积量最大,其地上部镉含量为 $0.13\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;而茼蒿、汉堡速生咖啡菜、翠英256和特选板叶茼蒿等对镉的累积量较低,其地上部镉含量 $<0.01\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,远低于国家食品安全质量标准规定的 $0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。该结果表明,今后在镉污染程度严重的设施土壤上进行蔬菜栽培时,需要关注不同蔬菜品种对镉累积的差异,通过合理选择蔬菜品种可以有效减少蔬菜镉超标风险。

此外,相同种类叶菜不同品种间比较来看,仅菠菜在 $0.76\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土壤中品种间差别较小,品种间镉含量差异相对稳定,其他蔬菜品种间镉含量存在明显差异,该结果表明今后开展叶类蔬菜替代种植时应关注相同蔬菜种类不同品种间差异。另外,两种土壤镉浓度比较来看,64个叶菜品种间蔬菜镉含量大小关

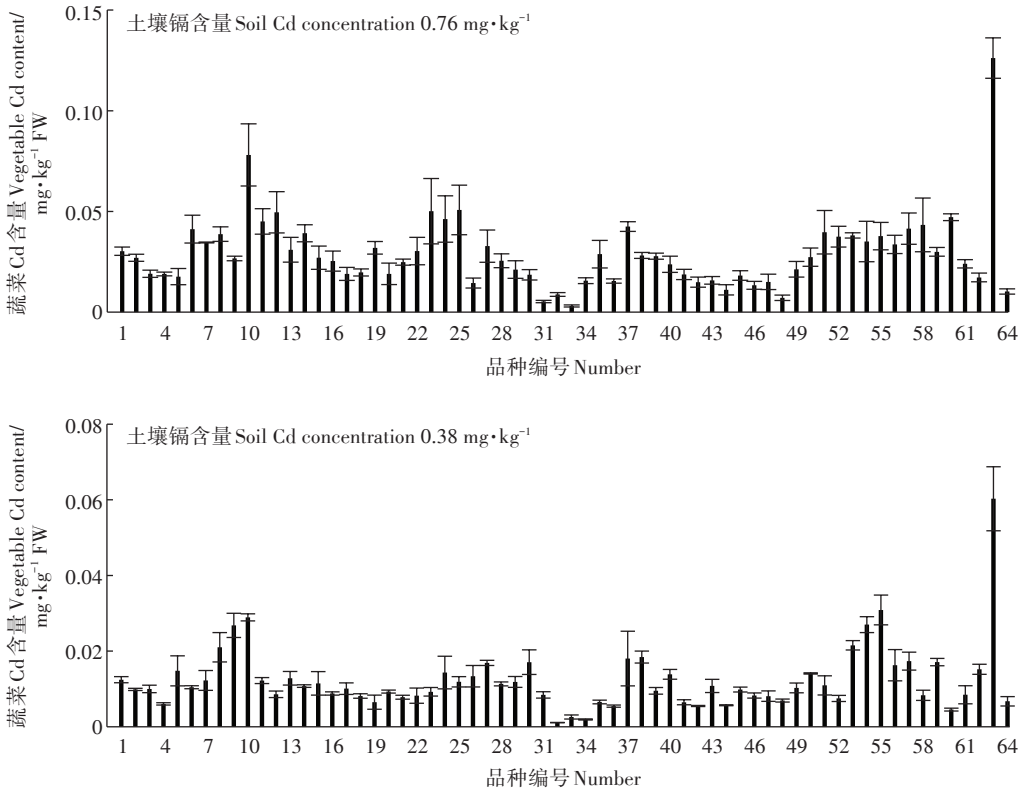


图4 两种浓度土壤上64种叶菜品种地上部镉含量
Figure 4 Cd contents in 64 leafy vegetables grown in greenhouse soils with two levels of Cd concentration

系排序具有一致性。通过相关性分析发现,两种镉污染设施土壤上64个叶菜品种对镉累积量具有极显著相关性($n=64$, $R^2=0.5281$, $P<0.01$),表明不同叶菜品种的镉累积能力大小在不同程度的镉污染土壤上具有较好的稳定性。本研究表明不同叶类蔬菜对镉累积能力的差异在不同镉污染设施土壤上具有很好的重现性,可作为该区域高浓度镉污染土壤开展替代种植的有效依据。

2.4 64个叶菜品种对土壤镉毒性敏感性分布曲线

敏感性分布曲线是通过选择某个概率分布并拟合SSD曲线的方法,描述某种重金属元素对一系列物种的毒性。基于生态风险评价角度分析重金属污染对不同物种的危害程度,进而对其生态风险进行评估,评价不同物种对重金属污染的敏感程度^[22]。本研究应用较新的概率分布函数模型(Burr-III模型)^[23]比较了上述京津冀地区设施生产中常见的64个叶类蔬菜品种对土壤镉的毒性敏感性分布曲线(图5),结果表明不同叶类蔬菜对土壤镉的敏感程度存在概率分布差异。具体来看,咖啡麦当菜、蔬菠2号、芝麻菜和佳园芥蓝对土壤镉的毒性最为敏感,其敏感性分布频次小于5%;其次为汉斯203紫霞、紫油麦菜、王中王尖叶油麦菜,属于较敏感品种,其敏感性分布频次大于5%,小于10%;而茼蒿属于不敏感品种。基于保护所选64种叶类蔬菜品种中95%的蔬菜产品安全考虑,叶菜最小环境有害 HC_5 -BCFs值(HC_5 , Hazardous Concentration for 5% of species)为0.19。以《食品安全国家标准》(GB 2762—2017)规定的 $0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 鲜质量为基准,反推出土壤镉的浓度上限为 $1.05\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。应尽量避免种植咖啡麦当菜、蔬菠2号、芝麻菜和佳园芥蓝等蔬菜品种。国内外相关学者亦开展了相关

研究,如李晓婧等^[24]比较了10种叶菜对镉毒害的敏感程度,发现茼蒿和油菜属于较为敏感品种,芹菜和茼蒿属于较不敏感品种,芹菜和茼蒿适合在镉超标土壤中开展替代种植。该结果与本论文研究具有良好的一致性。

3 结论

(1)瓜果类蔬菜对土壤镉的累积能力明显低于叶类蔬菜,11种叶类蔬菜地上部镉含量大小排序依次为芝麻菜>油麦菜>菠菜=芥菜>茼蒿>生菜>菜心>苦苣>小白菜>咖啡菜>茼蒿。

(2)不同叶类蔬菜品种对土壤镉累积能力差异较大。芝麻菜地上部镉含量最高,而茼蒿、汉堡速生咖啡菜、翠英256和特选板叶茼蒿地上部镉累积量 $<0.01\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 鲜质量,适合在京津冀镉污染设施叶菜土壤上开展替代种植。

(3)芝麻菜、蔬菠2号、咖啡麦当菜、佳园芥蓝属于土壤镉毒性敏感品种,其物种敏感性分布频次小于5%,基于保护所选64种叶类蔬菜品种中的95%安全考虑,应避免种植该类蔬菜品种。

参考文献:

- [1] 白玲玉, 曾希柏, 李莲芳, 等. 不同农业利用方式对土壤重金属累积的影响及原因分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(1): 96-104.
BAI Ling-yu, ZENG Xi-bai, LI Lian-fang, et al. Effects of land use on heavy metal accumulation in soils and source analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(1): 96-104.
- [2] 师荣光, 周启星, 刘凤枝, 等. 天津郊区土壤-蔬菜系统中Cd的积累特征及污染风险[J]. 中国环境科学, 2008, 28(7): 634-639.
SHI Rong-guang, ZHOU Qi-xing, LIU Feng-zhi, et al. Cadmium accumulation and pollution risks to human health based on Monte-Carlo model of soil and vegetable-using vegetable field in Tianjin suburbs as example[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(7): 634-639.
- [3] 何俊, 王学东, 陈世宝, 等. 典型污灌区土壤中Cd的形态、有效性及其影响因子[J]. 中国环境科学, 2016, 36(10): 3056-3063.
HE Jun, WANG Xue-dong, CHEN Shi-bao, et al. The forms, bioavailability of Cd in soils of typical sewage irrigation fields in northern China and its control factors[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(10): 3056-3063.
- [4] 辛术贞, 李花粉, 苏德纯. 我国污灌污水中重金属含量特征及年代变化规律[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2271-2278.
XIN Shu-zhen, LI Hua-fen, SU De-chun. Concentration characteristics and historical changes of heavy metals in irrigation sewage in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2271-2278.
- [5] 索琳娜, 刘宝存, 赵同科, 等. 北京市菜地土壤重金属现状分析与评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 179-186.
SUO Lin-na, LIU Bao-cun, ZHAO Tong-ke, et al. Evaluation and

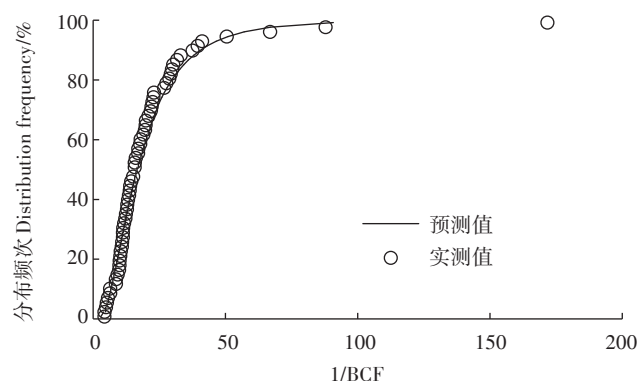


图5 64种蔬菜品种对重金属镉敏感性分布曲线(SSD)

Figure 5 Distribution curve of sensitivity to Cd of 64 vegetable varieties

- analysis of heavy metals in vegetable field of Beijing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(9):179-186.
- [6] 徐 笠, 陆安祥, 田晓琴, 等. 典型设施蔬菜基地重金属的累积特征及风险评估[J]. 中国农业科学, 2017, 50(21):4149-4158.
- XU Li, LU An-xiang, TIAN Xiao-qin, et al. Accumulation characteristics and risk assessment of heavy metals in typical greenhouse vegetable bases[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(21):4149-4158.
- [7] 茹淑华, 耿 暖, 张国印, 等. 河北省典型蔬菜产区土壤和蔬菜中重金属累积特征研究[J]. 生态环境学报, 2016, 25(8):1407-1411.
- RU Shu-hua, GENG Nuan, ZHANG Guo-yin, et al. Heavy metals accumulation in soil and vegetable collected from typical vegetable production areas in Hebei Province[J]. *Ecology & Environmental Sciences*, 2016, 25(8):1407-1411.
- [8] 李 霞, 张慧鸣, 徐 震, 等. 农田Cd和Hg污染的来源解析与风险评价研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(7):1314-1320.
- LI Xia, ZHANG Hui-ming, XU Zhen, et al. Source apportionment and risk assessment of Cd and Hg pollution in farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(7):1314-1320.
- [9] 曾希柏, 李莲芳, 梅旭荣. 中国蔬菜土壤重金属含量及来源分析[J]. 中国农业科学, 2007, 40(11):2507-2517.
- ZENG Xi-bai, LI Lian-fang, MEI Xu-rong. Heavy metal content in soils of vegetable-growing lands in China and source analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(11):2507-2517.
- [10] Kirkham M B. Cadmium in plants on polluted soils: Effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments[J]. *Geoderma*, 2006, 137(1):19-32.
- [11] 骆永明, 滕 应. 我国土壤污染退化状况及防治对策[J]. 土壤, 2006, 38(5):505-508.
- LUO Yong-ming, TENG Ying. Status of soil pollution degradation and countermeasures in China[J]. *Soils*, 2006, 38(5):505-508.
- [12] 郭海涛. 不同蔬菜吸收积累镉的差异研究[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.
- [13] Schipper A M, Posthuma L, De Z D, et al. Deriving Field-Based Species Sensitivity Distributions (f-SSDs) from Stacked Species Distribution Models (S-SDMs) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(24):14464.
- [14] 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.
- [15] 张伯尧. 兰州市菜地土壤和蔬菜重金属含量及其健康风险评估[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2009.
- ZHANG Bo-yao. Heavy metal content of soil and vegetables in vegetable fields in Lanzhou City and its health risk assessment[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2009.
- [16] Muchuweti M, Birkett J W, Chinyanga E, et al. Heavy metal content of vegetables irrigated with mixtures of wastewater and sewage sludge in Zimbabwe: Implications for human health[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2006, 112(1):41-48.
- [17] 薛 永, 王苑嫒, 姚泉洪, 等. 植物对土壤重金属镉抗性的研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(3):528-534.
- XUE Yong, WANG Yuan-yuan, YAO Quan-hong, et al. Research progress of plants resistance to heavy metal Cd in soil[J]. *Ecology & Environmental Sciences*, 2014, 23(3):528-534.
- [18] Rizwan M, Ali S, Adrees M, et al. A critical review on effects, tolerance mechanisms and management of cadmium in vegetables[J]. *Chemosphere*, 2017, 182:90-105.
- [19] 吴志超. 高低镉积累油菜品种筛选及其生化机制研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2015.
- WU Zhi-chao. Screening and biochemical mechanism of rapeseed with high and low cadmium accumulation[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.
- [20] 方华为. 不同品种蔬菜对镉的吸收及根系形态特征研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2011.
- FANG Hua-wei. Study on cadmium uptake and root morphological characteristics of different varieties of vegetables[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011.
- [21] 黄志亮. 镉低积累蔬菜品种筛选及其镉积累与生理生化特性研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2012.
- HUANG Zhi-liang. Screening of low accumulation vegetable cultivars and research on it's properties of Cd-accumulation and physiology [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012.
- [22] 孙 聪, 陈世宝, 宋文恩, 等. 不同品种水稻对土壤中镉的富集特征及敏感性分布(SSD)[J]. 中国农业科学, 2014, 47(12):2384-2394.
- SUN Cong, CHEN Shi-bao, SONG Wen-en, et al. Accumulation characteristics of cadmium by rice cultivars in soils and its species sensitivity distribution[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(12):2384-2394.
- [23] Xu F L, Li Y L, Wang Y, et al. Key issues for the development and application of the species sensitivity distribution(SSD) model for ecological risk assessment [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 54(3):227-237.
- [24] 李晓婧, 郑向群, 郑顺安. 叶菜对Cd的富集特征及敏感性分布[J]. 环境科学研究, 2017, 30(5):720-727.
- LI Xiao-jing, ZHENG Xiang-qun, ZHENG Shun-an. Accumulation and sensitivity distribution of cadmium in leafy vegetables[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(5):720-727.