

冯英, 马璐瑶, 王琮, 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.

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

冯英, 马璐瑶, 王琮, 吴英杰, 黄路宽, 周其耀, 杨肖娥

(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)

摘要:近年来, 重金属污染耕地安全利用技术研究取得了突破进展, 然而将这些关键技术与蔬菜传统高度集约化种植模式进行耦合的研究还比较少, 大规模推广应用鲜见报道。因此, 本文在查阅最新发表文献的基础上, 梳理了我国土壤-蔬菜作物系统重金属污染状况, 归纳了蔬菜作物重金属吸收积累特征, 并总结了重金属污染蔬菜地安全生产综合农艺调控技术研究进展。当前, 我国蔬菜地土壤重金属污染以中轻度为主, 且区域分异明显。蔬菜作物重金属超标现象在全国各地时有发生, 给蔬菜产业发展和人类健康带来了极大的危害。蔬菜作物对重金属的积累能力因种类、品种、部位而异, 受基因型、土壤理化性质和外界环境条件的制约, 因此调整种植布局、选用重金属低积累品种、合理轮间套作、施用土壤改良剂和钝化剂、优化水肥管理技术等农艺调控措施是目前中轻度重金属污染蔬菜地安全利用的重要技术途径。未来在进一步深入研究土壤-蔬菜系统重金属迁移转化规律的基础上, 宜加强土壤-蔬菜地系统安全生产技术标准、传统种植模式与综合农艺调控措施耦合技术、长期定位试验及风险评价等方面的研究, 以实现重金属中轻度污染蔬菜地的安全利用和农产品的安全生产。

关键词: 镉(Cd); 铅(Pb); 汞(Hg); 砷(As); 品种筛选; 水肥管理; 钝化剂; 叶面阻控剂; 生物有效性

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2018)11-2359-12 doi:10.11654/jaes.2018-0787

Heavy-metal pollution and safety production technologies of soil-vegetable crop systems in China

FENG Ying, MA Lu-yao, WANG Qiong, WU Ying-jie, HUANG Lu-kuan, ZHOU Qi-yao, YANG Xiao-e

(Ministry of Education Key Laboratory of Environment Remediation and Ecosystem Health, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: In recent years, there have been great breakthroughs in safe utilization technologies for heavy-metal polluted farmlands. However, there are few studies on the coupling of these key technologies with traditional highly intensive vegetable planting patterns. There are also few reports on their large-scale popularization and application. Therefore, in this work, based on the latest literature, the heavy-metal pollution status of the soil-vegetable crop system in China, the characteristics of heavy-metal uptake and accumulation in vegetable crops, and the research progress of comprehensive agronomic regulation technologies for safe production of heavy-metal contaminated vegetable fields are summarized. Presently, the heavy-metal pollution of vegetable soils in China is mild and moderate, but the regional differentiation is pronounced. The phenomenon of heavy metals exceeding food-safety standards in vegetable crops has been found nationwide and has brought great harm to both the vegetable industry and human health. The ability of vegetable crops to accumulate heavy metals varies by species, variety, and tissue parts. It is also restricted to certain genotypes, soil features, chemical properties, and other environmental conditions. Comprehensive agronomic regulation technologies, such as adjusting planting layout, screening low heavy-metal accumulation

收稿日期: 2018-06-15 录用日期: 2018-09-25

作者简介: 冯英(1975—), 女, 湖北英山人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事重金属污染土壤植物修复、植物营养环境生态、微量元素与健康等方面的研究。E-mail: yfeng@zju.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0801104)

Project supported: The National Key R&D Projects of China (2017YFD0801104)

varieties, utilizing reasonable round-planting and intercropping, applying soil amendments and passivators, and optimizing water and fertilizer management are important methods of achieving safe utilization of mild heavy-metal pollution. In the future, studies on the transport and translocation of heavy metals in the soil-vegetable system will be still needed. Studies on the technical standards for safe production, planting-pattern coupling with comprehensive agronomic regulation technologies, long-term positioning tests, and risk assessments should be strengthened to realize the safe utilization of heavy-metal contaminated vegetable fields and the safe production of agricultural products.

Keywords: cadmium (Cd); lead (Pb); mercury (Hg); arsenic (As); variety screening; water and fertilizer management; passivation agent; leaf surface resistance control agent; bioavailability

从1978改革开放以来,我国蔬菜产业经过30多年的迅猛发展,种植面积从1978年的 $3.3 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 发展到2015年的 $2.2 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ^[1-2],占全国耕地面积的13.2%。我国蔬菜年产量超7亿t,人均占有量超500 kg^[2],是世界第一大生产和消费国。蔬菜单产逐年提高,从1980年的 $2.6 \text{ 万 kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 提高到2015年的 $3.6 \text{ 万 kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,高于世界平均水平约17%^[2-3]。2014年蔬菜每公顷净利润为3.23万元,成本利润率为51.3%,分别比粮食、大豆、甘蔗高39.7%、55.2%和58.4%^[3],已成为农民增收的主要来源之一。

随着生活水平的提高,人们对食品安全性和农产品绿色生产的要求越来越高。然而目前农田土壤重金属污染问题日益凸显^[4],土壤重金属通过食物链的迁移是人体重金属暴露的重要途径。一旦重金属进入蔬菜地,就有可能在蔬菜作物中积累,从而给人体健康带来风险。Huang等^[5]调研了南方典型郊区土壤重金属污染的健康风险,发现因土壤暴露和食物摄取导致的人体潜在健康危险指数为15.3,其中87.5%的健康风险来自食物消耗,且水稻(10.44)>蔬菜(2.86)>茶叶(0.05)。Liu等^[6]发现,菜地土壤铬(Cr)和铅(Pb)污染导致非致癌风险,而镉(Cd)污染易导致致癌风险。相对于稻田,菜地土壤重金属污染的健康风险虽然较低,但由于蔬菜作物在我国居民膳食结构中占有重要地位,因此重金属污染菜地的安全利用对保障蔬菜作物的安全生产和人体健康均有十分重要的意义。

本文在梳理我国菜地土壤和蔬菜作物重金属污染现状的基础上,对蔬菜作物对重金属吸收积累特征及其安全生产综合农艺调控技术研究进展进行了总结,以期为重金属污染蔬菜地的安全利用和农产品安全生产提供科学依据。

1 我国菜地土壤重金属污染现状

1.1 污染面积较大且以中轻度污染为主

随着我国经济社会的不断进步,因工业“三废”排

放、城市生活垃圾堆放、农用化学品的投入及大气沉降等引起的土壤重金属污染问题引起了全社会的广泛关注。宋伟等^[7]通过分析近千篇文献中涉及31个省份的346个地级市数据,推断我国大约有1/6的耕地受到不同程度的重金属污染,约为 $2 \times 10^7 \text{ hm}^2$,且污染面积不断扩大。2014年,环保部和国土资源部联合发布了全国土壤污染状况调查公报,显示耕地土壤点位超标率为19.4%,其中重度污染点位仅占1.1%。虽然我国蔬菜地土壤污染状况尚未有权威的统计详查数据,但从20世纪90年代起,全国各地就有大量蔬菜地土壤污染情况的调查报告(表1)。这些调研结果表明,我国蔬菜地土壤重金属污染类型多样,污染面积虽在扩大,但主要以中轻度污染为主。最近启动了全国土壤污染状况详查工作,将在2018年底前查明农用地土壤污染的面积分布及其对农产品质量的影响。

1.2 污染物种类和污染程度区域分异明显

我国蔬菜地土壤主要污染元素有Cd、汞(Hg)、Pb、砷(As)、Cr、铜(Cu)等(表1)。南方菜地Cd污染最为严重,其次是Pb、Hg和As^[31]。Zeng等^[32]通过比较不同地区菜地土壤的重金属含量,发现中国东部菜地重金属污染较严重,主要污染元素为Cd、Hg、锌(Zn);中部地区以As和Cd污染为主,少数受Hg、Zn和Cu污染;西部地区有一定程度的Cd和As污染,少数土壤样品Cu、Cr和Hg超标。郭爱珍等^[33]通过调查发现,华中地区菜地污染较为严重,华东地区存在不同程度的Hg、Pb、Cr、Cd、As污染,华南地区主要是Pb、Cd污染,西南地区 and 东北地区污染较轻,华北地区部分Cr、Pb污染,而西北地区污染报道较少,土壤清洁。

2 蔬菜作物的重金属污染状况

近30年来,有大量蔬菜产品重金属污染情况的报道(表1),其重金属超标率最低为12%^[22],有些高达90%以上^[26]。Pan等^[34]分析了从浙江省11个城市农贸市场采集的28个品种5785个蔬菜样本中重金属含

表1 我国土壤-蔬菜系统重金属污染状况(部分案例)

Table 1 Heavy metal pollution in soil-vegetable systems in China(case studies)

区域/地点 Area/Site	土壤类型 Soil types	污染元素及其含量范围 Polluted elements and their concentration/mg·kg ⁻¹	蔬菜地土壤污染程度 Contamination levels of vegetable soil	蔬菜作物污染状况 Pollution of vegetable crops	参考文献 References
沈阳市	棕壤	Cd:0.1; Zn:266.8; Pb:26.4	含量是背景值的3.8~7.1倍	—	[8]
北京市	褐土、 潮土	Cd:0.03~2.10; Cr:39.68~414.09; Hg:0.01~0.56; As:1.30~31.80; Cu:16.20~42.73; Zn:53.19~211.00	Cd轻度和中度污染样点 大于40%	—	[9]
天津市	—	Cu/Zn/Pb/Cr/Ni/Cd/Hg/As	8种重金属均高于土壤背 景值1倍	7种蔬菜作物重金属含量平均值未超过 食品安全标准	[10]
太原市	—	—	—	15种蔬菜中,生菜Pb超标率43.8%、Cd 超标率75%,白菜Pb超标率33.3%、Cd 超标率25%	[11]
西安市	—	—	—	10种蔬菜总体合格率为83%,Pb是主要 污染元素,超标率为77.5%	[12]
成都市	—	—	—	9种蔬菜Cd、Pb是主要污染元素,超标率 分别达到29.4%和22%,Hg、As不超标	[13]
潍坊市	褐土、潮 土、棕壤 土等	Cr:35.73~125.70; Ni:11.11~61.78; Cu:12.83~179.78; Zn:43.72~348.46; Cd:0.07~2.20; Hg:0.01~0.07	含量是背景值的 1.13~3.21倍	—	[14]
郑州市	—	—	—	29种蔬菜多数样品达到重度污染	[15]
长沙市	—	—	—	13种蔬菜Pb、Cd超标率为60%和51%, Cr、As、Hg含量未超标	[16]
湖南省 攸县	—	Cd:0.01~3.0; Hg:0.02~4.40; Pb: 0.8~173; Zn:23.2~212; As:3.3~29.7	Cd、Hg超标率为69.3%和 10.9%	8种蔬菜中,小萝卜Cd含量最高且吸收 率很高	[17]
芜湖市 三山区	—	As:9.47~45.16; Zn:54.94~266.85; Pb:11.13~35.50; Cr:22.03~77.10	含量均高于土壤背景值, 其中As超标率达75.61%	—	[18]
铜陵市	—	—	—	8种蔬菜重金属污染综合指数平均值为 3.50~19.97,均达到重度污染水平	[19]
太湖区域	—	Cd	研究区域存在严重的Cd 污染	—	[20]
南京市	—	—	—	36种蔬菜Hg污染最严重,豆类Hg超标 12.40倍;Cr、Pb存在部分超标	[21]
上海市	—	—	—	14种蔬菜Cd与Pb超标率为13.29%和 12.01%	[22]
杭州市	—	Cu/Zn/Pb/Cd/Cr/As/Ni	部分Cu、Pb、Cd轻度超标, 以Cd污染为主	—	[23]
浙江省	—	Cd/Pb/As/Hg/Cr	Cd、Hg点位超标率分别为 24.75%和33.66%	作物(尤其是茎叶类蔬菜)与土壤中重金 属含量呈显著正相关,以Cd超标率最高	[24]
广州市	—	Cd/Pb/As	有9.5%受到污染;含量是 土壤背景值的1.4~3.0倍	—	[25]
广州市	—	—	—	8种蔬菜中Cu、Zn未超标,Cr的超标率达 到91.67%	[26]
东莞市	—	Zn/Cr/Pb/Cd/Cu/Ni	超标率为3.3%~95.1%, 以Pb污染最严重	—	[27]
广州市、 佛山市、 江门市和 惠州市	—	Cd/Hg//Pb/Cr/As	Pb/Cd以轻度污染为主, Hg在不同区域呈现轻度、 中度、重度污染	叶类、瓜类、豆类蔬菜主要受Pb、Cd、Hg 污染,少数受到Cr污染,未检测出受As 污染	[28]
福建省	—	Pb:21.5~456	点位超标率54.5%	大白菜Pb浓度为0.009~2.20 mg·kg ⁻¹ , 点位超标率36.4%	[29]
广西省 梧州市	红壤紫色 土、水稻 土等	Cu:26.245~192.1; Cd:0.044~0.983	Cu、Cd超标率为5.13% 和10.26%	36处高背景值露天区域蔬菜Ni、Cd、Pb 超标率分别为2.78%、25%、8.33%	[30]

注:“—”没有数据。

Note: "—" means no data.

量,发现As、Cr、镍(Ni)未超标,而Cd和Pb超标率分别为0.25%和1.56%,表明该地区人群有一定的通过消费蔬菜摄取重金属的风险。最近兴起的文献荟萃分析方法为评价土壤污染物通过食物链迁移影响人体健康的风险提供了有力的手段。Zhong等^[35]分析了2007—2016年已发表的220篇论文中的1335个数据,发现蔬菜作物中重金属污染风险较低,Pb、Cd、Hg的平均含量分别为0.11、0.04、0.01 mg·kg⁻¹,均低于最大允许浓度,南方部分地区如贵州、云南、湖南、广东、湖北等省份和北方辽宁省因食用蔬菜有一定的公众健康风险。在各种蔬菜作物中,叶菜类是Cd和Pb暴露的主要来源,根类是Cu和Zn暴露的重要途径,而块茎是Cr暴露的主要来源^[1]。

蔬菜中的重金属主要来自土壤、灌溉水、农用化学品以及大气沉降等^[36]。当蔬菜体内重金属含量积累到一定阈值,就会表现出毒害作用,严重情况可致其死亡。

3 蔬菜作物对重金属的吸收积累特征及其影响因素

已有研究表明,土壤-农作物系统重金属累积并非简单的线性关系^[4]。蔬菜作物对重金属的吸收积累作用,不仅与作物的基因型、生育期和组织部位有关,还与土壤因素及环境要素紧密相关。

3.1 基因型对重金属吸收积累的影响

不同种类蔬菜对土壤重金属的吸收积累作用有明显差异,普遍表现为叶菜类>根菜类>果菜类^[36]。李其林等^[37]发现相比于果菜,叶菜类对Pb、Cd、Cr、Zn等重金属的富集能力强,而对Ni和Cu的吸收富集能力低。Alexander等^[38]发现豆类蔬菜积累的Cd、Cu、Zn和Pb的量比根菜类和叶菜类的低。欧阳喜辉等^[39]调查以褐土为主的北京市集中连片蔬菜生产基地,发现扁豆、黄瓜、甜菜、西瓜等对Cd的吸收能力较弱;油菜的吸收能力较强;白菜、菠菜、芹菜、生菜的吸收能力处于中等水平。赵小蓉等^[40]通过田间试验(供试土壤为岷江冲积土)发现,重金属富集能力总体表现为叶菜类强于根茎类,在花菜、白菜、茼蒿、莲白、萝卜、土豆等6种蔬菜中,以土豆对Cd和Pb的富集能力最弱。朱兰保等^[41]对蚌埠市蔬菜的调研发现,重金属含量大小顺序为叶菜类>茄果类、豆类>瓜类。Chang等^[42]在珠江三角洲的研究发现,在菜心、生菜、小白菜、大白菜、绿叶茼蒿和中国芥菜中,小白菜对重金属的富集能力最低;5种重金属Hg、Cd、Pb、Cr、As中以Cd从土

壤中转移到蔬菜中的能力最强。贾丽等^[43]发现,在石灰性的潮土(13.4%)和褐土(74.1%)区域,蔬菜重金属总量大小顺序为菠菜>土豆>大蒜>大葱>茼蒿>黄瓜,对各重金属元素吸收大小顺序为Zn>Cd>Pb>Cu>Cr。陈玉梅等^[44]盆栽试验(供试土壤为潮土)结果表明,番茄和茄子可以在轻度重金属复合污染土壤中种植;在中度Cd污染土壤上可种植番茄;而辣椒对Cd、Zn的吸收量大,不建议在Cd、Zn污染土壤上种植。与果类蔬菜相比,叶菜和根茎类蔬菜具有相对较高的重金属浓度和转运系数^[30]。由于各类蔬菜对重金属的吸收累积特性受土壤环境条件和研究方法的制约,导致部分研究结果不总是符合叶菜类>根菜类>果菜类的重金属积累规律。

与水稻、小麦等大宗作物类似,同一种蔬菜的不同基因型对重金属吸收积累的特性也有很大差异。井彩巧^[45]发现38个大白菜品种对Cd和Pb的富集能力有明显差异,并筛选出Cd和Pb共低积累品种黄芯48等。在盆栽和大田试验条件下,15种大白菜品种中,北京小杂56对Cd的富集能力很强,而丰源3号的Cd富集系数和转运系数均较低^[46]。Chen等^[47]通过盆栽和田间试验对长三角地区主栽的50个小白菜品种进行了筛选,发现杭州油冬儿和早生华京等对Cd的积累能力较低,适用于种植在低Cd污染土壤上(≤ 1.2 mg·kg⁻¹)。Hussain等^[48]分析了100个西红柿品种Cd积累能力的差异,发现有8个品种在土壤中Cd浓度为3 mg·kg⁻¹和6 mg·kg⁻¹时,产量最高,且果实中Cd含量最低。Dai等^[49]通过盆栽试验从40个萝卜品种中筛选出了3个Cd低积累品种和5个Cd高积累品种。陈剑等^[50]采用大棚盆栽试验研究了4个西兰花品种对Pb、Cd、Hg的吸收富集规律,发现浙青95与台绿1号对Pb的富集能力相对较弱,台绿1号对Hg的富集能力较弱。蔬菜作物对重金属吸收积累的基因型差异为筛选重金属低积累种质资源,用于重金属污染蔬菜地安全利用和克隆相关重金属拒吸收基因提供了遗传基础。

3.2 不同组织部位对重金属积累能力的差异

已有研究表明,蔬菜的不同组织部位对重金属的富集量也存在显著差异。Dunbar等^[51]发现土豆不同组织中Cd含量存在显著差异,与禾本科植物类似,即根>茎>叶>子实。李非里等^[52]发现辣椒中不同部位的Cd含量为根>茎叶>果实,其中果实中的Cd含量仅为茎叶的0.42~0.51倍。杨菲等^[53]在潮土和水稻土的盆栽试验中发现,空心菜根和茎中Pb的平均含量分

别是叶中的3.86倍和2.02倍,Cd的平均含量分别是叶中的3.58倍和4.73倍。不同组织部位对重金属转运和区隔能力的差异是导致其富集能力不同的主要原因。植物对Pb、Cd、As等的富集能力一般为地下部位>地上部位,这是由于这些重金属在植物体内的转运能力相对较弱^[54]。重金属离子被根吸收后,一般通过必需元素的运输途径或者离子通道转运至其他部位,因而转运能力差的离子地上部积累就少。但是有研究显示,芥菜的地上部可以从土壤或水溶液中积累高水平的Cd^[55-56],Nouairia等^[57]比较了芥菜和油菜叶片吸收积累Cd的区别,发现与油菜相比,芥菜的地上部积累了更多的Cd;Cd处理下芥菜叶片的脂质含量增加,但脂肪酸组成基本不变,而油菜叶片不仅脂质成分发生了变化,而且脂质含量也有所下降。

3.3 土壤环境条件制约蔬菜作物对重金属的吸收积累

重金属在蔬菜作物体内的积累,除了与作物本身特性有关,还与土壤状况和外界环境条件直接相关。土壤中重金属的含量和形态、土壤的理化性质、养分状况及微生物活性等均显著影响作物对重金属的吸收积累。

Ye等^[24]发现蔬菜作物(尤其是茎叶类蔬菜)重金属含量与土壤中重金属含量呈显著正相关。Zhang等^[58]调研发现,蔬菜作物体内重金属浓度与土壤重金属总浓度的相关性较差,而与土壤重金属生物有效浓度直接相关,土壤pH是决定土壤重金属生物有效性的重要因素;基于土壤-植物系统生物有效重金属转运系数分析,所研究的珠江三角洲区域Cu、As和Hg容易在蔬菜作物中富集。Yu等^[59]对27篇蔬菜作物Hg污染研究论文荟萃分析发现,土壤的pH值和有机质含量(SOM)是影响蔬菜作物Hg吸收的主要因素。

土壤中的微生物活动对重金属的迁移转化有重要作用。微生物对重金属离子的影响不仅包括生物吸附、富集、溶解、氧化还原以及络合等物理化学作用^[60-61],而且还包括调控植物对重金属离子的吸收、转运等生物作用。陈宝等^[62]从Pb污染矿区筛选到1株铜绿假单胞菌M2(*Pseudomonas aeruginosa*),发现接种M2能够促进小白菜生长,维持土壤细菌多样性,明显促进Pb污染土壤的植物修复作用。He等^[63]在伏毛茛根部分离出一种金属耐受和促植物生长内生菌(*Rahnella* sp. JN6),将其接入甘蓝型油菜后,显著提高了油菜地上部和根组织中Cd、Pb、Zn的浓度,促进了植物对重金属的吸收。通过调控土壤尤其是作物

根际土壤中微生物的组成和活性降低蔬菜作物对重金属的吸收积累将是未来一段时间研究的热点。

此外,水肥管理方式、温度光照等外界环境要素都会影响作物对土壤重金属的吸收与积累,为通过调控这些要素降低蔬菜可食用部位重金属含量提供了可能。

4 重金属污染菜地蔬菜作物安全生产农艺调控技术

我国《土壤污染防治行动计划》确定了农用地分类管理的思路,对于中轻度污染农田重在安全利用。因此,可以采用农艺调控技术进行边生产边修复,以保障重金属污染蔬菜地的安全生产。已有大量针对重金属污染稻田的农艺调控技术集成和示范研究,而对蔬菜地的研究相对较少,特别是大规模的推广应用示范还比较缺乏,当前的研究主要集中于以下几个方面:

4.1 调整种植布局,选择低积累品种

由于土壤重金属不能被微生物降解,具有移动性差、积累性强等特点,其治理和修复难度很大。要在中轻度污染蔬菜地上种出安全的农产品,可以根据不同蔬菜作物对重金属富集和吸收的差异,合理进行生产布局,比如在重金属污染严重的地区,尽量少种容易富集重金属的叶菜类蔬菜,改种富集力弱的果菜和低积累的根菜等。韩峰等^[64]大田试验发现,在贵州矿区Cd含量超标的蔬菜地中,可以种植胡萝卜、芹菜、茄子等对Cd的积累能力较弱的蔬菜;而在Hg含量超标的蔬菜地里,可以种植豇豆、棒豆、辣椒等对Hg富集能力较低的蔬菜。顾燕青等^[65]指出,在中轻度重金属污染土壤中,可以种植叶菜类和根茎类的低积累品种,避免种植高富集基因型蔬菜。目前大多数重金属低积累品种筛选研究采用人为添加重金属污染的盆栽试验或者溶液培养试验,污染水平比较高,土壤环境单一。而在田间生产实际中,大部分蔬菜地是中轻度污染水平,污染元素多样,且土壤环境复杂。因此,必须立足蔬菜生产基地,因地制宜选择优质高抗农艺性状优良的主栽品种,筛选出市场接受程度高、易于推广应用的重金属低积累品种。

4.2 优化种植模式,合理轮间套作

我国蔬菜生产多采用高度集约化的轮间套作种植模式,复种指数较高。近年的研究发现,在重金属中轻度污染土壤上,通过合理的轮间套作技术可以有效降低作物可食部位重金属含量,特别是利用超富集

植物与普通植物的轮间套作,效果更加明显。轮间作系统中,作物从土壤中提取的Cd分别占土壤Cd总量的2.30%和1.16%,而在单作体系中只占0.21%^[66]。居述云等^[67]发现超积累植物与蔬菜作物轮作可以降低后茬茄子的重金属污染风险。An等^[68]研究了5种作物(番茄、玉米、青菜、白菜和三叶草)在单作和间作条件下重金属的吸收状况,结果显示,当番茄与其他作物间作时,会增加重金属的积累,当玉米与其他作物间作时,Cr、Cu、Fe的浓度会降低,而三叶草对Cd和Pb的积累能力强,与三叶草间作,5种重金属的浓度都降低了。田间试验条件下,间作增强了Cd富集植物续断菊对Cd的吸收,降低了蚕豆对Cd的吸收^[69]。盆栽试验发现,Cd超富集植物土荆芥和蚕豆、玉米间作促进了土荆芥对Pb、Cd、Zn的吸收和积累,同时抑制了蚕豆、玉米对重金属的吸收^[70]。与Cd超富集植物龙葵间作,提高了茄子的生物量、光合作用和抗氧化酶活性^[71]。而龙葵与低积累大葱套种不仅显著提高了龙葵对土壤Cd的去除率,而且降低了大葱可食部位Cd的含量^[72]。油菜是一种Cd高积累作物^[73-74],溪口花籽和川油Ⅱ-10具有明显的Cd超积累特征和修复Cd污染土壤的能力^[73,75]。Su等^[76]通过自然Cd污染土壤的盆栽试验发现,与竹仓花籽或川油Ⅱ-93轮作会降低白菜中Cd的含量。这些结果表明,轮间套作是实现重金属中轻度污染土壤安全利用的重要途径,比较适用于我国蔬菜作物的生产,但由于间套作模式用工甚大,相关机械化操作设备还较少,因此限制了其大规模的推广应用。

4.3 合理施用土壤改良剂,降低土壤重金属的生物有效性

土壤改良产品种类繁多,包括松土剂、增肥剂、改良剂、调节剂等^[77],其类型不同,作用机制也不相同,主要包括改善土壤含水量、容重等物理性质,改变土壤pH、SOM等化学性质,调控土壤微生物的活性等,从而改变土壤对重金属的吸附、沉淀、络合、氧化还原作用等以降低土壤中重金属的生物有效性^[78]。刘恩玲等^[79]采用大棚小区试验,比较有机肥、栏肥、腐植酸和石灰作为土壤改良剂的作用效果,发现腐植酸和石灰可有效抑制Cd、Pb在土壤-蔬菜(青菜、萝卜)系统的迁移。刘维涛等^[80]通过盆栽试验,比较了石灰、鸡粪、过磷酸钙及其组合降低大白菜地上部Cd和Pb含量的作用效应,发现施用改良剂可升高土壤的pH值、降低土壤中的有效态Cd含量,促进大白菜的生长并降低大白菜中Cd和Pb的含量。刘晓婷等^[81]通过盆栽

试验比较了石灰、过磷酸钙、人造沸石、纳米羟基磷灰石及其组合在中轻度Cd污染土壤上降低芹菜Cd吸收的作用效果。李丹等^[82]研究了Cd污染程度不同的土壤中改良剂的应用效果,发现不同土壤中改良剂的作用效果与机制不同。Yao等^[83]发现新型Fe-Si钝化材料比人工沸石和碱土具有更好的增加土壤pH、降低上海青对As和Cd吸收的作用。李富荣等^[84]比较了不同栽培方式和施用改良剂的农艺调控措施组合对蔬菜中Pb、Cd累积规律的影响差异,结果显示与旱作模式相比,水作条件下施用改良剂对蔬菜-土壤系统中Pb、Cd累积特性的影响效果更明显。有机改良剂可以升高土壤pH值,增加与土壤中Cd的结合位点,形成稳定的复合物,降低Cd在土壤中的生物有效性,被认为是环境友好、经济有效的原位修复技术。

近年来,生物炭作为土壤改良剂被广泛应用。李鹰翔等^[85]发现在酸性和中性土壤中,生物炭和粉煤灰可以发挥有效的重金属钝化作用,粉煤灰可以有效阻碍土壤的重金属淋溶,但对土壤酸化只能起到短期的改善作用;施用生物炭可以有效提高作物产量、降低重金属的生物有效性以及改善土壤性质等。杨侨等^[86]发现由海泡石、生物炭、腐植酸组成的复合钝化剂施入污灌区土壤后,土壤有机质含量升高,土壤和菠菜中Cd含量均明显降低。Cardenas-Aguilar等^[87]比较了添加生物炭和生物炭/堆肥混合物对不同土壤-蔬菜(芥菜、水芹、黑麦草)系统中Cu迁移的影响,发现添加生物炭降低了Cu在土壤中的移动性,增加了植物的根长和生物量。Ren等^[88]发现向土壤中施加生物炭,降低了土壤的pH值和EC值,增加了土壤微生物的数量,并且促使土壤中的Cd转化为稳定形态,降低Cd的生物有效性,抑制白菜从土壤中吸收Cd。尽管生物炭作为土壤改良剂的作用效果十分明显,然而由于生产成本较高,导致其在蔬菜生产体系中大规模应用的报道还较少。

虽然土壤改良剂可以通过各种过程降低土壤重金属的生物有效性^[89],但有些改良剂本身含有一定量的重金属,还有些改良剂可能会产生一些有毒有害次生代谢物,大量使用会影响土壤的理化性质,带来二次污染的风险;同时,施用改良剂并没有将重金属带离土壤,在一定条件下,钝化的重金属还可能转化为活性形态,因此在生产实际中,应该慎重使用土壤改良剂。

4.4 优化水肥管理,减少蔬菜可食部位重金属积累

水肥管理措施不仅会影响土壤理化性质和重金

属形态,还会影响作物对重金属的吸收^[90],因此可以通过水肥管理措施的调控,调节土壤pH、氧化还原电位(Eh)、有机质含量、阳离子交换量(CEC)、质地等因素,从而改变土壤中重金属的活性,降低重金属的生物有效性,减少重金属从土壤向作物,特别是向可食部分的转移,达到作物安全生产的目的。在淹水条件下,土壤有机质结合Cd的能力增强,使其向活性较低的结合态转化,同时还原性的环境易形成硫化镉沉淀,从而降低Cd的生物有效性。Tack等^[91]发现,当土壤中总Cd含量为 $0.45\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,菠菜在需水时期限制供水,植株体中的Cd浓度会升高。虽然大部分蔬菜是旱地作物,但部分蔬菜如空心菜等,可以淹水种植,淹水条件不仅可以提高酸性土壤pH,钝化土壤重金属,而且有利于减轻设施菜地土壤盐渍化,具有较好的应用前景。

不同肥料化学组分不同,施用后对土壤-植物系统重金属迁移转化的效果也不同,导致有些肥料在某些情况下也可成为土壤改良剂,成为强化重金属污染植物修复的有力措施^[92]。Zhang等^[93]通过盆栽试验发现,供应缓释硝酸铵和缓释尿素的小白菜鲜重比供应速效硝酸铵和尿素时分别增加了103%和203%,且植株体内的Cd浓度分别减少了51%~55%和44%~56%。Chen等^[94]比较了有机矿物肥料与化学肥料对Cd污染土壤上的小白菜生长和Cd含量的影响,发现有机矿物肥料不仅可以促进小白菜的生长,并且减少了小白菜从土壤中吸收重金属的含量。Yu等^[95]通过向有机和无机氮肥中添加硝化抑制剂3,4-二甲基吡唑磷(DMPP),发现与不添加DMPP的复合氮肥相比,

添加DMPP使小白菜的生物量增加了9.8%~15.8%,硝酸盐的浓度降低了15.7%~40.8%,Cu、Zn、Cd的含量分别降低了7.8%~25.6%、10.4%~20.3%、12.8%~22.2%。

应用叶面生理阻控剂保障作物安全生产是当前农田重金属污染控制的重要方向^[96]。利用离子拮抗原理,可以通过喷施含Zn、Fe、硅(Si)、硒(Se)等元素的叶面肥减少重金属在作物体内的积累。吕选中等^[97]发现,在Cd污染的条件下,叶面喷施Se后,生菜Se吸收量增加了1213%,而Cd的吸收降低了31.63%;喷施锌肥,生菜Zn吸收量增加了118%,而Cd的吸收降低了37.01%。许超等^[98]通过盆栽实验研究了3种铁肥对菜心中重金属累积的影响,发现喷施铁肥使菜心中的Cd、Pb和Cu浓度分别降低4.30%~35.5%、6.17%~50.3%和8.34%~33.4%,Zn浓度变化为27.1%~19.6%,Fe浓度提高42.6%~90.2%。

5 总结与展望

近年来,我国蔬菜生产稳定发展,技术水平稳步提高,但随着蔬菜产业重金属污染的加重,在当前农业供给侧结构性改革背景下,菜地土壤重金属污染给蔬菜的产业发展带来了重大挑战。为保障重金属污染农田的安全生产,目前采用的主要技术模式包括:施用土壤重金属钝化剂、选用低积累作物品种、合理轮间套作和水肥管理技术、实行植物修复等(图1),有些已经在湖南等地大规模应用。然而目前对重金属污染蔬菜地安全利用关注还较少,大规模的推广应用尚不多见。因此,需要加强以下几个方面的研究:

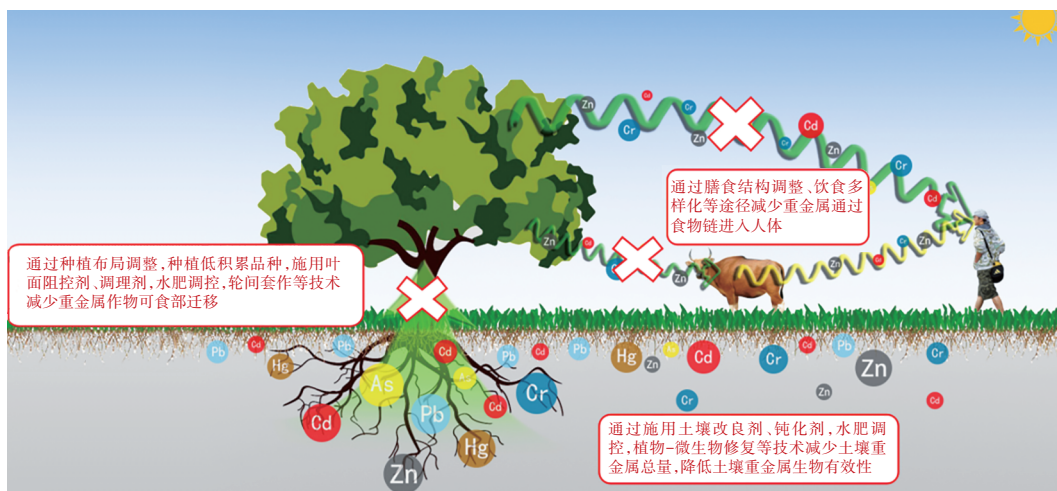


图1 重金属污染菜地土壤-蔬菜作物系统安全生产综合农艺调控技术

Figure 1 Comprehensive agronomic regulation technologies for vegetable safety production in heavy metal pollution soil-crop system

5.1 土壤-蔬菜系统重金属迁移转化规律与安全生产技术标准研究

由于蔬菜种类繁多、种植土壤复杂多变、主产区环境条件差异大,因此不同重金属在土壤-蔬菜系统的迁移转化特征虽有不少研究,但尚需全面总结验证。目前蔬菜地重金属污染家底不清,区域差异较大,对判定为污染的蔬菜地是否会造成农产品的污染、以及判定为清洁的蔬菜地是否就不会造成农产品的污染研究还较缺乏。对菜地土壤污染状况常采用《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)中的二级标准、《温室蔬菜产地环境质量评价标准》(HJ/T 333—2006)和《食用农产品产地环境质量评价标准》(HJ/T 332—2006)中的土壤中各项污染物的指标要求。而对蔬菜中重金属污染评价标准常采用《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2012;GB 2762—2017)。这两类标准直接用于蔬菜作物的生产,就会产生判定为污染的土壤上农产品不超标或者判定为洁净的土壤上生产出超标农产品的现象。因此,要从重金属在土壤-蔬菜-人体系统出发,明确不同重金属食物链的迁移转化规律,制定更加科学的、实用的、针对性强的标准,对不同区域、不同类型蔬菜地进行分类管理。

5.2 重金属污染蔬菜地安全利用农艺调控技术与蔬菜传统种植模式的耦合

近年来,我国对重金属污染农田安全生产综合农艺调控技术已有很多研究,尤其是土壤重金属调理剂、钝化剂、叶面阻控剂、轮间套作等单项农艺调控措施,相关论文和专利呈现出快速增长的态势,部分技术推广应用面积急剧增加。但由于蔬菜种植的周期性与高度集约化特征,一些在稻田成熟应用的技术受到了极大的挑战,将农田综合调控技术与蔬菜传统的种植模式进行耦合的研究还很少。

5.3 长期定位试验及风险评价

目前重金属污染蔬菜地安全利用技术集成示范与大规模应用较少,且大部分研究周期为3~5年,长期定位试验和跟踪验证研究较为缺乏。此外,技术模式与组合的经济效益和环境风险评价也需要加强。

参考文献:

[1] Wang Y R, Wang R M, Fan L Y, et al. Assessment of multiple exposure to chemical elements and health risks among residents near Huodehong lead-zinc mining area in Yunnan, Southwest China[J]. *Chemosphere*, 2017, 174: 613-627.

[2] 郑 婷,房裕东,秦树香,等. 论新形势下我国蔬菜产业存在问题及

发展对策[J]. 长江蔬菜, 2015(14): 43-47.

ZHENG Ting, FANG Yu-dong, QIN Shu-xiang, et al. Existing problems and development countermeasures on vegetable industry in China under new situation[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2015(14): 43-47.

[3] 李辉尚,孔繁涛,沈 辰,等. “十三五”时期我国蔬菜产业发展策略研究[J]. 经济纵横, 2016(11): 114-120.

LI Hui-shang, KONG Fan-tao, SHEN Chen, et al. Research on the development strategy of vegetable industry in China during the 13th Five-Year[J]. *Economy*, 2016(11): 114-120.

[4] 陈卫平,杨 阳,谢 天,等. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 261-272.

CHEN Wei-ping, YANG Yang, XIE Tian, et al. Challenges and countermeasures for heavy metal pollution control in farmlands of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(2): 261-272.

[5] Huang Y, Chen Q Q, Deng M H, et al. Heavy metal pollution and health risk assessment of agricultural soils in a typical peri-urban area in southeast China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 207: 159-168.

[6] Liu X, Song Q, Tang Y, et al. Human health risk assessment of heavy metals in soil-vegetable system: A multi-medium analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 463/464: 530-540.

[7] 宋 伟,陈百明,刘 琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究, 2013(2): 293-298.

SONG Wei, CHEN Bai-ming, LIU Lin. Soil heavy metal pollution of cultivate land in China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013(2): 293-298.

[8] 宋 菲,郭玉文,刘孝义,等. 土壤中重金属镉锌铅复合污染的研究[J]. 环境科学学报, 1996, 16(4): 431-436.

SONG Fei, GUO Yu-wen, LIU Xiao-yi, et al. Pollution of cadmium, zinc and lead in brown earth[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1996, 16(4): 431-436.

[9] 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 analysis of heavy metals in vegetable field of Beijing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(9): 179-186.

[10] 周玉敏,张金盛,任顺荣,等. 天津市园田土壤和几种蔬菜中重金属含量状况的调查研究[J]. 农业环境保护, 1990, 9(6): 30-34.

ZHOU Yi-min, ZHANG Jin-sheng, REN Shun-rong, et al. Investigation and study on the status of the metal basin in soil and several vegetables in Tianjin City[J]. *Agro-environmental Protection*, 1990, 9(6): 30-34.

[11] 张珍珍,程 滨,李 茹,等. 太原市市售蔬菜重金属污染状况及健康风险评估[J]. 中国农学通报, 2016, 32(10): 169-175.

ZHANG Zhen-zhen, CHENG Bin, LI Ru, et al. Status and health risk assessment of vegetable heavy metal contamination in Taiyuan City[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(10): 169-175.

[12] 李桂丽,苏红霞,段 敏,等. 西安市蔬菜中重金属污染分析评价[J]. 西北植物学报, 2008, 28(9): 1904-1909.

LI Gui-li, SU Hong-xia, DUAN Min, et al. Analyses and assessment of heavy metal pollution of vegetables in Xi'an[J]. *Acta Bot Boreal*

- Occident Sin*, 2008, 28(9): 1904-1909.
- [13] 罗晓梅, 张义蓉, 杨定清. 成都地区蔬菜中重金属污染分析与评价[J]. 四川环境, 2003, 22(2): 49-51.
LUO Xiao-mei, ZHANG Yi-rong, YANG Ding-qing. Pollution analysis and assessment of heavy metals in vegetables from Chengdu[J]. *Sichuan Environment*, 2003, 22(2): 49-51.
- [14] 张怀志, 冀宏杰, 徐爱国, 等. 潍坊市菜地重金属调查与环境风险评价研究[J]. 生态环境学报, 2017, 26(12): 2154-2160.
ZHANG Huai-zhi, JI Hong-jie, XU Ai-guo, et al. Investigation and environmental risk assessment of heavy metal elements in vegetable farmland of Weifang City[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(12): 2154-2160.
- [15] 李海华, 张杰, 申灿杰. 郑州市近郊土壤和蔬菜中重金属污染状况调查与评价[J]. 河南农业科学, 2007, 36(1): 90-92.
LI Hai-hua, ZHANG Jie, SHEN Can-jie. Survey and evaluation of heavy metal contamination of soils and vegetables in the suburbs of Zhengzhou[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2007, 36(1): 90-92.
- [16] 沈彤, 刘明月, 贾来, 等. 长沙地区蔬菜重金属污染初探[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2005, 31(1): 87-90.
SHEN Tong, LIU Ming-yue, JIA Lai, et al. On the heavy metal pollution of vegetables in Changsha Region[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2005, 31(1): 87-90.
- [17] Yang Y, Chen W P, Wang M E, et al. Evaluating the potential health risk of toxic trace elements in vegetables: Accounting for variations in soil factors[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, s584/585: 942-949.
- [18] 王翔, 汪琳琳, 方凤满, 等. 芜湖市三山区菜地土壤重金属污染特征分析[J]. 城市环境与城市生态, 2011, 24(1): 31-33.
WANG Xiang, WANG Lin-lin, FANG Feng-man, et al. Pollution characteristics of heavy metals in vegetable soil in Sanshan District of Wuhu City[J]. *Urban Environment and Urban Ecology*, 2011, 24(1): 31-33.
- [19] 李如忠, 徐晶晶, 姜艳敏, 等. 铜陵市惠溪河滨岸带土壤重金属形态分布及风险评估[J]. 环境科学研究, 2013, 26(1): 88-96.
LI Ru-zhong, XU Jing-jing, JIANG Yan-min, et al. Fraction distribution and ecological risk assessment of soil heavy metals in the riparian zone of Huixi stream in Tongling City[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(1): 88-96.
- [20] Chen L, Zhou S L, Shi Y X, et al. Heavy metals in food crops, soil, and water in the Lihe River Watershed of the Taihu Region and their potential health risks when ingested[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 615: 141-149.
- [21] 王艳莉, 谢国祥, 郭宝福, 等. 南京市售蔬菜重金属污染状况及对人体健康风险分析[J]. 现代预防医学, 2014, 41(12): 2148-2150.
WANG Yan-li, XIE Guo-xiang, GUO Bao-fu, et al. Analysis of the health risk of heavy metal contamination in vegetables sold in markets in Nanjing City[J]. *Modern Preventive Medicine*, 2014, 41(12): 2148-2150.
- [22] 周根娣, 汪雅谷, 卢善玲. 上海市农畜产品有害物质残留调查[J]. 上海农业学报, 1994, 10(2): 45-48.
ZHOU Gen-di, WANG Ya-gu, LU Shan-lin. An investigation into the quality (residues of harmful substances) of agricultural and animal products in Shanghai[J]. *Acta Agriculture Shanghai*, 1994, 10(2): 45-48.
- [23] 龚梦丹, 朱维琴, 顾燕青, 等. 杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价[J]. 环境科学, 2016, 37(6): 2329-2337.
GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, et al. Evaluation on heavy metal pollution and its risk in soils from vegetable bases of Hangzhou[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(6): 2329-2337.
- [24] Ye X Z, Xiao W D, Zhang Y Z, et al. Assessment of heavy metal pollution in vegetables and relationships with soil heavy metal distribution in Zhejiang Province, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(6): 378.
- [25] 戴军, 刘腾辉. 广州菜地生态环境的污染特征[J]. 土壤通报, 1995, 26(3): 102-104.
DAI Jun, LIU Teng-hui. Characteristics of ecological environment in vegetable fields in Guangzhou[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1995, 26(3): 102-104.
- [26] 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]. *Environment Science*, 2017, 38(1): 389-398.
- [27] 夏运生, 万洪富, 杨国义, 等. 东莞市不同区域菜地土壤重金属污染状况研究[J]. 生态环境, 2004, 13(2): 170-172.
XIA Yun-sheng, WAN Hong-fu, YANG Guo-yi, et al. The heavy metal contamination of vegetable soil in Dongguan City[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(2): 170-172.
- [28] 崔晓峰, 李淑仪, 丁效东, 等. 珠江三角洲地区典型菜地土壤与蔬菜重金属分布特征研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(1): 130-135.
CUI Xiao-feng, LI Shu-yi, DING Xiao-dong, et al. Contents of heavy metals in soil and vegetables at typical vegetable plot in the Pearl River Delta[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(1): 130-135.
- [29] Huang Z Y, Chen T, Yu J, et al. Lead contamination and its potential sources in vegetables and soils of Fujian, China[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2012, 34(1): 55-65.
- [30] Gan Y D, Wang L H, Yang G Q, et al. Multiple factors impact the contents of heavy metals in vegetables in high natural background area of China[J]. *Chemosphere*, 2017, 184: 1388-1395.
- [31] 赵小虎, 王富华, 张冲, 等. 南方菜地重金属污染状况及蔬菜安全生产调控措施[J]. 农业环境与发展, 2007, 24(3): 91-94.
ZHAO Xiao-hu, WANG Fu-hua, ZHANG Chong, et al. Heavy metal pollution in vegetable fields in the South and control measures for vegetable production safety[J]. *Agro-Environment and Development*, 2007, 24(3): 91-94.
- [32] Zeng X B, Li L F, Xu R. Heavy metal content in Chinese vegetable plantation land soils and related source analysis[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2008, 7(9): 1115-1126.
- [33] 郭爱珍, 陈斌, 程曼, 等. 我国蔬菜重金属污染现状及防控措施[J]. 山西农业科学, 2016, 44(4): 560-564.
GUO Ai-zhen, CHEN Bin, CHENG Man, et al. Present situation of heavy metal pollution of vegetables in China and its prevention and

- control measures[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2016, 44 (4): 560-564.
- [34] Pan X D, Wu P G, Jiang X G. Levels and potential health risk of heavy metals in marketed vegetables in Zhejiang, China[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1). Doi: <https://doi.org/10.1038/srep20317>
- [35] Zhong T Y, Xue D W, Zhao L M, et al. Concentration of heavy metals in vegetables and potential health risk assessment in China[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2018, 40(1): 313-322.
- [36] 李书幻, 温祝桂, 陈亚茹, 等. 我国蔬菜重金属污染现状与对策[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(8): 231-234, 235.
- LI Shu-huan, WEN Zhu-gui, CHEN Ya-ru, et al. Current situation and countermeasures of heavy metal pollution in vegetables in China [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44 (8): 231-234, 235.
- [37] 李其林, 刘光德, 黄 昀, 等. 蔬菜中重金属特征研究[J]. *中国农学通报*, 2004, 20(3): 40-44.
- LI Qi-lin, LIU Guang-de, HUANG Yun, et al. The feature research of heavy metals in vegetable[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2004, 20(3): 40-44.
- [38] Alexander P D, Alloway B J, Dourado A M. Genotypic variations in the accumulation of Cd, Cu, Pb and Zn exhibited by six commonly grown vegetables[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144 (3): 736-745.
- [39] 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*, 2008, 27(1): 67-70.
- OUYANG Xi-hui, ZHAO Yu-jie, LIU Fen-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.
- [40] 赵小蓉, 杨 谢, 陈光辉, 等. 成都平原区不同蔬菜品种对重金属富集能力研究[J]. *西南农业学报*, 2010, 23(4): 1142-1146.
- ZHAO Xiao-rong, YANG Xie, CHEN Guang-hui, et al. Assessment of heavy metal enrichment in vegetables of Chengdu Plain[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 23(4): 1142-1146.
- [41] 朱兰保, 盛 蒂, 戚晓明, 等. 蚌埠市蔬菜重金属含量及食用安全性评价[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(7): 260-263.
- ZHU Lan-bao, SHENG Di, QI Xiao-ming, et al. Heavy metal content and edible safety evaluation of vegetables in Bengbu[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(7): 260-263.
- [42] 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.
- [43] 贾 丽, 姜爱霞, 王兆军, 等. 济南市石灰性菜地土壤和蔬菜重金属含量特征及健康风险评价[J]. *土壤通报*, 2015, 46(3): 733-738.
- JIA Li, JIANG Ai-xia, WANG Zhao-jun, et al. Concentration characteristic and health risk assessment of heavy metal in calcareous vegetable fields in Jinan[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(3): 733-738.
- [44] 陈玉梅, 周根娣, 胡 洁, 等. 土壤重金属复合污染对茄果类蔬菜的影响研究[J]. *杭州师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 15(5): 495-501.
- CHEN Yu-mei, ZHOU Gen-di, HU Jie, et al. Influence of combined heavy metal pollution on *Solanaceous* vegetables[J]. *Journal of Hangzhou Normal University(Natural Science Edition)*, 2016, 15(5): 495-501.
- [45] 井彩巧. 不同基因型大白菜镉和铅含量差异研究[J]. *园艺学报*, 2006, 33(2): 402-404.
- JING Cai-qiao. Studies on Cd and Pb contents of different Chinese cabbage genotypes[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2006, 33 (2): 402-404.
- [46] 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): 226-235.
- 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) : 226-235.
- [47] Chen Y, Li T Q, Han X, et al. Cadmium accumulation in different pak-choi cultivars and screening for pollution-safe cultivars[J]. *Journal of Zhejiang University-Science B*, 2012, 13(6): 494-502.
- [48] Hussain M M, Saeed A, Khan A A, et al. Differential responses of one hundred tomato genotypes grown under cadmium stress[J]. *Genetics and Molecular Research*, 2015, 14(4): 13162-13171.
- [49] Dai H W, Yang Z Y. Variation in Cd accumulation among radish cultivars and identification of low-Cd cultivars[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(17): 15116-15124.
- [50] 陈 剑, 檀国印, 朱良其, 等. 不同品种西兰花对土壤重金属铅镉汞的吸收规律[J]. *浙江农业科学*, 2017, 58(5): 764-766.
- CHEN Jian, TAN Guo-yin, ZHU Liang-qi, et al. Absorption of heavy metals, lead, cadmium and mercury in different soil broccoli[J]. *Zhejiang Nongye Kexue*, 2017, 58(5): 764-766.
- [51] Dunbar K R, McLaughlin M J, Reid R J. The uptake and partitioning of cadmium in two cultivars of potato (*Solanum tuberosum* L.) [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2003, 54(381): 349-354.
- [52] 李非里, 刘丛强, 杨元根, 等. 贵阳市郊菜园土-辣椒体系中重金属的迁移特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2007, 23(4): 52-56.
- LI Fei-li, LIU Cong-qiang, YANG Yuan-gen, et al. Characteristics of heavy metal transportation in vegetables soil and capsicum (*Capsicum frutescens* L. var. *bngum* Bailey) system in Guiyang, Southwest China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, 23 (4): 52-56.
- [53] 杨 菲, 吴 琦, 季 辉, 等. 土壤重金属Pb和Cd在小白菜中的富集特征及产地环境安全临界值[J]. *中国农学通报*, 2011, 27 (13): 194-198.
- YANG Fei, WU Qi, JI Hui, et al. Soil Pb and Cd accumulation characteristics of Pakchoi (*Brassica chinensis* L.) and their environmental critical values in Pakchoi production area for food security[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(13): 194-198.
- [54] 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.

- [55] Salt D E, Prince R C, Pickering J L, et al. Mechanisms of cadmium mobility and accumulation in Indian mustard[J]. *Plant Physiology*, 1995, 109: 1427-1433.
- [56] Haag-Kerwer A, Schäfer H J, Heiss S, et al. Cadmium exposure in *Brassica juncea* causes a decline in transpiration rate and leaf expansion without effect on photosynthesis[J]. *Experimental Botany*, 1999, 50: 1827-1835.
- [57] Nouairia I, Ammara W B, Youssefa N B, et al. Comparative study of cadmium effects on membrane lipid composition of *Brassica juncea* and *Brassica napus* leaves[J]. *Plant Science*, 2005, 170(3): 511-519.
- [58] Zhang J R, Li H Z, Zhou Y Z, et al. Bioavailability and soil-to-crop transfer of heavy metals in farmland soils: A case study in the Pearl River Delta, South China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 235: 710-719.
- [59] Yu H X, Li J, Luan Y N. Meta-analysis of soil mercury accumulation by vegetables[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1261.
- [60] 郭学军, 黄巧云, 赵振华, 等. 微生物对土壤环境中重金属活性的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2002, 8(1): 105-110.
- GUO Xue-jun, HUANG Qiao-yun, ZHAO Zhen-hua, et al. Effects of microorganisms on the mobility of heavy metals in soil environment [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2002, 8(1): 105-110.
- [61] 施积炎, 陈英旭, 林琦, 等. 根分泌物与微生物对污染土壤重金属活性的影响[J]. *中国环境科学*, 2004, 24(3): 316-319.
- SHI Ji-yan, CHEN Ying-xu, LIN Qi, et al. The influence of root exudates and microbe on heavy metal activity in contaminated soil[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(3): 316-319.
- [62] 陈宝, 徐晓萌, 曲娟娟, 等. 铜绿假单胞菌 M2 联合小白菜对 Pb 污染土壤的生物修复[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2012, 38(6): 732-740.
- CHEN Bao, XU Xiao-meng, QU Juan-juan, et al. Bio-remediation of lead polluted soil by *Pseudomonas aeruginosa* strain M2 combined with pakchoi[J]. *Journal of Zhejiang University (Agric & Life Sci)*, 2012, 38(6): 732-740.
- [63] He H D, Ye Z H, Yang D J, et al. Characterization of endophytic *Rhizobium* sp. JN6 from *Polygonum pubescens* and its potential in promoting growth and Cd, Pb, Zn uptake by *Brassica napus*[J]. *Chemosphere*, 2013, 90(6): 1960-1965.
- [64] 韩峰, 高雪, 陈海燕. 不同种类蔬菜对土壤重金属的富集差异[J]. *贵州农业科学*, 2014, 42(6): 129-132.
- HAN Feng, GAO Xue, CHEN Hai-yan, et al. Enrichment difference of different types of vegetables to heavy metals[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2014, 42(6): 129-132.
- [65] 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, 32(4): 401-410.
- GU Yan-qing, GU You-li, BAI Qian, et al. Heavy metals accumulation characteristics of vegetables in Hangzhou City, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(4): 401-410.
- [66] Liu Y, Liu K, Li Y, et al. Cadmium contamination of soil and crops is affected by intercropping and rotation systems in the lower reaches of the Minjiang River in south-western China[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2016, 38(3): 811-820.
- [67] 居述云, 汪洁, 宓彦彦, 等. 重金属污染土壤的伴矿景天/小麦-茄子间作和轮作修复[J]. *生态学报*, 2015, 34(8): 2181-2186.
- JU Shu-yun, WANG Jie, MI Yan-yan, et al. Phytoremediation of heavy metal contaminated soils by intercropping with *Sedum plumbizincicola* and *Triticum aestivum* and rotation with *Solanum melongena* [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(8): 2181-2186.
- [68] An L Y, Pan Y H, Wang Z B, et al. Heavy metal absorption status of five plant species in monoculture and intercropping[J]. *Plant and Soil*, 2011, 345(1/2): 237-245.
- [69] 谭建波, 湛方栋, 刘宁宁, 等. 续断菊与蚕豆间作下土壤部分化学特征与 Cd 形态分布状况研究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(1): 53-60.
- TAN Jian-bo, ZHAN Fang-dong, LIU Ning-ning, et al. Soil chemical properties and Cd form distribution in *Vicia faba* and *Sonchus asper* intercropping system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(1): 53-60.
- [70] 秦丽, 湛方栋, 祖艳群, 等. 土荆芥和蚕豆/玉米间作系统中 Pb、Cd、Zn 的累积特征研究[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2017, 32(1): 153-160.
- QIN Li, ZHEN Fang-dong, ZU Yan-qun, et al. Accumulation characteristics of Pb, Cd and Zn by *Chenopodium ambrosioides* L. intercropping with maize and broad bean[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University(Natural Science)*, 2017, 32(1): 153-160.
- [71] Tang Y, He J, Yu X N, et al. Intercropping with *Solanum nigrum* and *Solanum Photeinocarpum* from two ecoclimatic regions promotes growth and reduces cadmium uptake of eggplant seedlings[J]. *Pedosphere*, 2017, 27(3): 638-644.
- [72] Wang S Q, Wei S H, Ji D D, et al. Co-planting Cd contaminated field using hyperaccumulator *Solanum Nigrum* L. through interplant with low accumulation Welsh Onion[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2015, 17(9): 879-884.
- [73] Su D C, Wong J W. Selection of mustard oilseed rape (*Brassica juncea* L.) for phytoremediation of cadmium contaminated soil[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2004, 72(5): 991-998.
- [74] 高茜蕾, 许军锋. 不同品种油菜取样对镉的吸收累积差异分析[J]. *西安工业大学学报*, 2015, 35(6): 479-482.
- GAO Qian-lei, XU Jun-feng. Investigations of the difference of cadmium accumulated in various kind of rapes[J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2015, 35(6): 479-482.
- [75] 王激清, 茹淑华, 苏德纯. 用于修复土壤超积累镉的油菜品种筛选[J]. *中国农业大学学报*, 2003, 8(1): 67-70.
- WANG Ji-qing, RU Shu-hua, SU De-chun. Selection of a hyperaccumulator for phytoremediation of cadmium contaminated soil[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2003, 8(1): 67-70.
- [76] Su D C, Wang J W, Zhou M, et al. Can cadmium uptake by Chinese cabbage be reduced after growing Cd-accumulating rapeseed?[J]. *Pedosphere*, 2010, 20(1): 90-95.
- [77] Khan M A, Khan S, Khan A, et al. Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 601/602: 1591-1605.
- [78] 帅正彬, 王逸红, 杨斌, 等. 蔬菜的重金属污染与治理措施研究

- 进展[J]. 四川农业科技, 2016(9): 32-38.
- SHUAI Zheng-bin, WANG Yi-hong, YANG Bin, et al. Research progress on heavy metal pollution and control measures of vegetables [J]. *Sichuan Agricultural Science and Technology*, 2016(9): 32-38.
- [79] 刘恩玲, 孙继, 王亮. 不同土壤改良剂对菜地系统铅镉累积的调控作用[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(27): 11992-11994.
- LIU En-ling, SUN Ji, WANG Liang. Regulatory effect of different soil amendments on accumulation of Cd and Pb in vegetable field system [J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2008, 36(27): 11992-11994.
- [80] 刘维涛, 周启星. 不同土壤改良剂及其组合对降低大白菜镉和铅含量的作用[J]. 环境科学学报, 2010, 30(9): 1846-1853.
- LIU Wei-tao, ZHOU Qi-xing. Effectiveness of different soil ameliorants in reducing concentrations of Cd and Pb in Chinese cabbage[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(9): 1846-1853.
- [81] 刘晓婷, 吕金印, 邸丽俊, 等. 改良剂对镉污染土壤芹菜生长及镉积累的影响[J]. 北方园艺, 2011(15): 194-197.
- LIU Xiao-ting, LÜ Jin-yin, DI Li-jun, et al. Effects of modifiers on the growth and cadmium accumulation of celery in cadmium contaminated soil[J]. *Northern Horticulture*, 2011(15): 194-197.
- [82] 李丹, 李俊华, 何婷, 等. 不同改良剂对石灰性镉污染土壤的镉形态和小白菜镉吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(9): 1679-1685.
- LI Dan, LI Jun-hua, HE Ting, et al. Effects of different amendments on soil Cd forms and Cd uptake by Chinese cabbage in Cd-contaminated calcareous soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(9): 1679-1685.
- [83] Yao A J, Wang Y N, Ling X D, et al. Effects of an iron-silicon material, a synthetic zeolite and an alkaline clay on vegetable uptake of As and Cd from a polluted agricultural soil and proposed remediation mechanisms[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2017, 39(2): 353-367.
- [84] 李富荣, 李敏, 朱娜, 等. 水作和旱作施用改良剂对蔬菜-土壤系统中铅镉生物有效性的影响差异[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8): 1477-1483.
- LI Fu-rong, LI Min, ZHU Na, et al. Comparing the effects of soil amendments on Pb and Cd bioavailability in water spinach under water submersion cultivation and dry farming conditions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(8): 1477-1483.
- [85] 李鹰翔, 吕金印, 齐君, 等. 不同改良剂对小青菜中镉和铅含量的降低效果[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(11): 172-178.
- LI Ying-xiang, LÜ Jin-yin, QI Jun, et al. Effects of different amendments on reducing concentrations of Cd and Pb in *Brassica chinensis* L. [J]. *Journal of Northwest A&F University (Nature Science Edition)*, 2012, 40(11): 172-178.
- [86] 杨侨, 赵龙, 孙在金, 等. 复合钝化剂对污灌区镉污染农田土壤的钝化效果研究[J]. 应用化工, 2017, 46(6): 1037-1041.
- YANG Qiao, ZHAO Long, SUN Zai-jin, et al. Study on passivation effects of multi-passivators on the cadmium(Cd) contaminated soils in sewage irrigation area[J]. *Applied Chemical Industry*, 2017, 46(6): 1037-1041.
- [87] Cárdenas-Aguilar E, Gascó G, Paz-Ferreiro J, et al. The effect of biochar and compost from urban organic waste on plant biomass and properties of an artificially copper polluted soil[J]. *International Biodegradation & Biodegradation*, 2017, 124: 223-232.
- [88] Ren J, Wang F H, Zhai Y B, et al. Effect of sewage sludge hydrochar on soil properties and Cd immobilization in a contaminated soil[J]. *Chemosphere*, 2017, 189: 627-633.
- [89] Mamindy-Pajany Y, Geret F, Hurel C, et al. Batch and column studies of the stabilization of toxic heavy metals in dredged marine sediments by hematite after bioremediation[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(8): 5212-5219.
- [90] 俞花美, 焦鹏, 葛成军, 等. 施肥措施对重金属污染土壤-植物系统影响的研究进展[J]. 热带农业科学, 2012, 32(2): 61-66.
- YU Hua-mei, JIAO Peng, GE Cheng-jun, et al. Effect of fertilization measures on heavy metals contamination of soils and plant system[J]. *Chinese Journal of Tropical Agricultural*, 2012, 32(2): 61-66.
- [91] Tack F M. Watering regime influences Cd concentrations in cultivated spinach[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 186(Pt 2): 201-206.
- [92] 徐明岗, 刘平, 宋正国, 等. 施肥对污染土壤中重金属行为影响的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊): 328-333.
- XU Ming-gang, LIU Ping, SONG Zheng-guo, et al. Progress in fertilization on behavior of heavy metals in contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Suppl): 328-333.
- [93] Zhang R R, Liu Y, Xue W L, et al. Slow-release nitrogen fertilizers can improve yield and reduce Cd concentration in pakchoi(*Brassica chinensis* L.) grown in Cd-contaminated soil[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(24): 25074-25083.
- [94] Chen P, Ruan Y L, Wang S J, et al. Effects of organic mineral fertilizer on heavy metal migration and potential carbon sink in soils in a karst region[J]. *Acta Geochimica*, 2017, 36(3): 539-543.
- [95] Yu Q G, Ma J W, Sun W C, et al. Evaluations of the DMPP on organic and inorganic nitrogen mineralization and plant heavy metals absorption[J]. *Geoderma*, 2018, 312: 45-51.
- [96] 章明奎, 倪中应, 沈倩. 农作物重金属污染的生理阻控研究进展[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(1): 96-101.
- ZHANG Ming-kui, NI Zhong-ying, SHEN Qian. Research progress on physiological control of heavy metal pollution in crops[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2017, 39(1): 96-101.
- [97] 吕选忠, 宫象雷, 唐勇. 叶面喷施锌或硒对生菜吸收镉的拮抗作用研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(5): 868-870.
- LÜ Xuan-zhong, GONG Xiang-lei, TANG Yong. Antagonistic effect of foliar application of Se or Zn on absorption of Cd in lettuce[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5): 868-870.
- [98] 许超, 欧阳东盛, 朱乙生, 等. 叶面喷施铁肥对菜心重金属累积的影响[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(11): 20-25.
- XU Chao, OUYANG Dong-sheng, ZHU Yi-sheng, et al. Influence of foliar application of iron fertilizer on heavy metal accumulation in *Brassica parachinensis*[J]. *Environmental Science and Technology*, 2014, 37(11): 20-25.