

东北设施叶菜类蔬菜镉铅污染安全生产分区研究

李想, 龙振华, 朱彦谚, 杨昞, 李明堂

引用本文:

李想, 龙振华, 朱彦谚, 等. 东北设施叶菜类蔬菜镉铅污染安全生产分区研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2239–2248.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0315>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

京津冀地区设施土壤中不同蔬菜对镉的累积特征

高鑫, 颜蒙蒙, 曾希柏, 白玲玉, 王亚男, 陈清, 赵会薇, 苏世鸣

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

我国长江中下游水稻产区铅污染分区划分方法研究

程菁靓, 赵龙, 杨彦, 侯红, 孙在金, 马瑾

农业环境科学学报. 2019, 38(1): 70–78 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0853>

组配钝化剂对镉铅复合污染土壤修复效果研究

张迪, 丁爱芳

农业环境科学学报. 2018, 37(12): 2718–2726 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0881>

施肥与填闲种植籽粒苋对油麦菜Cd和土壤Cd的影响

谷佳林, 苏世鸣, 陈延华, 赵同科, 魏丹, 杜连凤, 邹国元

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2198–2204 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0243>

生物炭对土壤-植物体系中铅镉迁移累积的影响

黄连喜, 魏岚, 刘晓文, 吴颖欣, 李翔, 黄玉芬, 黄庆, 刘忠珍

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2205–2216 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0740>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李想, 龙振华, 朱彦谚, 等. 东北设施叶菜类蔬菜镉铅污染安全生产分区研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2239–2248.

LI Xiang, LONG Zhen-hua, ZHU Yan-yan, et al. Zoning of cadmium and lead pollution for the safe production of facility leafy vegetables in northeast China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2239–2248.



开放科学 OSID

东北设施叶菜类蔬菜镉铅污染安全生产分区研究

李想, 龙振华, 朱彦谚, 杨昶, 李明堂*

(吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118)

摘要:近年来东北地区设施蔬菜种植业发展迅速,导致菜地土壤出现了不同程度的镉(Cd)和铅(Pb)污染,影响了蔬菜的安全生产。本文以保护90%和5%的蔬菜品种为划分依据,利用物种敏感性分布法对Cd和Pb污染设施蔬菜土壤进行了安全生产分区研究。结果表明,蔬菜中Cd和Pb的含量超标率分别为23.53%和20.59%。蔬菜对Cd的富集系数与土壤pH呈显著性负相关关系($P<0.05$),而对Pb的富集系数与土壤有机质的含量呈显著性正相关关系($P<0.05$)。菠菜和小白菜对Cd的富集能力较强,而油菜对Cd的富集能力较弱。小白菜和韭菜对Pb的富集能力较强,而茼蒿对Pb的富集能力较弱。建议设施叶菜类蔬菜宜产区、限产区和禁产区土壤中Cd的含量分别为 ≤ 0.43 、 $0.43\sim 2.88$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 ≥ 2.88 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;Pb的含量分别为 ≤ 24.21 、 $24.21\sim 392.31$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 ≥ 392.31 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。设施叶菜类蔬菜对Cd和Pb的吸收富集特征不同,并且在蔬菜样品间也表现出了明显的差异,因此进行宜产区、限产区和禁产区划分对Cd和Pb污染设施蔬菜土壤的安全生产具有重要意义。

关键词:设施叶菜类蔬菜;安全生产分区;镉;铅;物种敏感性分布法

中图分类号:X53;563 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)10-2239-10 doi:10.11654/jaes.2020-0315

Zoning of cadmium and lead pollution for the safe production of facility leafy vegetables in northeast China

LI Xiang, LONG Zhen-hua, ZHU Yan-yan, YANG Yi, LI Ming-tang*

(College of Resource and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: The rapid development of the facility vegetable planting industry in northeast China has led to different levels of cadmium (Cd) and lead (Pb) pollution in the soil, which has affected the safe production of vegetables. Based on the protection of 90% and 5% of vegetable varieties, the safe production zoning of Cd and Pb contaminated vegetable soil was studied using the species sensitivity distribution method. The results showed that the Cd and Pb in vegetables were 23.53% and 20.59% higher than that of the standard rates, respectively. There was a significant negative correlation between the enrichment coefficient of Cd in vegetables and soil pH ($P<0.05$), while there was a significant positive correlation between the enrichment coefficient of Pb in vegetables and the soil organic matter content ($P<0.05$). Spinach and pakchoi had a strong ability to accumulate Cd, whereas Indian lettuce vegetable had a weak ability to accumulate Cd. Pakchoi and leek had a strong ability to accumulate Pb, whereas chrysanthemum had a weak ability to accumulate Pb. The study suggested that the Cd content in the soil for the suitable, limited and forbidden production zones of facility leafy vegetables was ≤ 0.43 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $0.43\sim 2.88$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and ≥ 2.88 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively, whereas the Pb content for those zones in the soil was ≤ 24.21 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $24.21\sim 392.31$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, and ≥ 392.31 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. The absorption and accumulation characteristics of Cd and Pb in facility leafy vegetables were different, and there were obvious differences among vegetable samples. Therefore, the division of suitable, limited and forbidden production areas is of great significance for the safe production of Cd and Pb contaminated facility vegetable soil.

Keywords: facility leafy vegetables; zoning for safe production; cadmium; lead; species sensitivity distribution method

收稿日期:2020-03-20 录用日期:2020-06-01

作者简介:李想(1994—),女,吉林长春人,硕士研究生,从事环境污染修复研究。E-mail:1298344492@qq.com

*通信作者:李明堂 E-mail:limtdoc2008@163.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0801104);吉林省自然科学基金(20180101084JC)

Project supported: The National Key R&D Program of China(2017YFD0801104); The Natural Science Foundation of Jilin(20180101084JC)

近年来我国设施蔬菜种植业发展迅速,设施蔬菜种植面积以每年10%左右的速度不断增长,设施蔬菜用24%的土地面积提供了60%以上的产值和33%以上的蔬菜产量,在蔬菜生产中起到了至关重要的作用^[1-2]。设施蔬菜种植过程中可人为控制生产空间内的小气候、调控土壤湿度和肥力,从而延长蔬菜生产时间,因此在常年低温期较长的东北地区的发展尤为迅速^[3-5]。其中吉林省在2009—2011年设施蔬菜种植面积在省内9个地区均增长了1倍以上^[6]。随着设施蔬菜的快速发展,设施菜地土壤重金属污染对蔬菜安全生产的影响以及因农业投入品大量使用导致的重金属累积风险正引起人们的关注^[7-8],如我国部分设施蔬菜土壤在种植之前已经受到了各种人为因素导致的重金属污染,或者农业投入品的过量和不当使用,使得设施蔬菜种植过程中土壤重金属风险隐患加剧^[9-12]。研究表明,我国东北地区设施叶菜类蔬菜的主要重金属污染物为Cd和Pb^[13-14]。蔬菜对土壤中Cd和Pb的吸收富集不仅与蔬菜的种类和品种有关,还与Cd和Pb在土壤中的生物有效性有关^[15-16]。土壤中Cd和Pb的生物有效性不仅与其总量有关,还与土壤的理化性质,如pH和有机质的含量有关。大多数研究表明蔬菜中重金属与土壤pH呈负相关关系,土壤有机质的增加会显著降低蔬菜对重金属的吸收,但也有研究表明有机质的增加会促进Pb的溶解,增加土壤中的水溶性Pb的含量从而使蔬菜对Pb的吸收富集能力增加^[17-18]。因此从蔬菜品种和种类以及土壤基本性质等方面系统考虑设施蔬菜对Cd和Pb的吸收富集能力,针对具体的区域实际情况开展土壤重金属阈值和分区生产,对实现Cd和Pb污染土壤的蔬菜安全生产具有重要的指导意义。

目前主要是利用蔬菜重金属超标率、种间外推法和物种敏感曲线法(SSD)研究重金属污染土壤安全生产的阈值和分区。徐建明等^[19]利用蔬菜重金属不超标率90%、60%和30%定为安全值、限制值和高危值;刘香香等^[20]以蔬菜和土壤中Cd的含量建立线性回归方程,根据蔬菜中Cd的限量值得出土壤阈值;程菁靛等^[21]根据不同品种水稻对Pb的富集情况利用Log-logistic模型计算水稻对Pb的富集SSD频次,并根据SSD曲线得出宜产、限产和禁产3区的土壤中Pb的含量阈值。物种敏感性分布法是一种统计学外推法,能在结构复杂的生态系统中,通过概率或者经验分布函数来描述不同物种样本对胁迫因素的敏感度差异,与其他方法相比更具实际意义。刘克^[22]利用种

间外推法和物种敏感曲线法研究小麦产地土壤中Cd和Pb的安全阈值,结果发现物种敏感曲线法的拟合效果最好。

综上所述,本研究以吉林省某矿区矿石采集场和冶炼厂附近受Cd和Pb污染的设施叶菜类蔬菜种植基地为研究对象,点对点采集土壤和叶菜类蔬菜的可食部位,在对土壤污染和蔬菜重金属超标情况进行研究的基础上,结合不同叶菜类蔬菜对Cd和Pb的富集系数及其与土壤pH和有机质含量的相关性,利用物种敏感曲线法对Cd和Pb污染设施蔬菜种植土壤安全生产阈值和宜产区、限产区和禁产区的划分进行研究,以期为设施蔬菜安全生产提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域

根据吉林省土壤背景值分布和近几年吉林省耕地土壤重金属污染情况^[23-24],以吉林省某矿区矿石开采区域和矿石冶炼厂附近可能受到Cd和Pb污染的设施蔬菜种植基地为采样点。采样区位于吉林省中南部,属于北温带东亚大陆性季风气候,四季温差较大,年气温范围在-18~22.4℃,年降水量为954.3 mm,采样区的土壤类型为黑土。据调查研究地区设施基地大约从3月份开始种植到10月份结束,期间种植叶菜类蔬菜3~4茬,因此本研究于2019年6月份和9月份进行两次田间采样。根据蔬菜大棚土壤中Cd和Pb的污染情况、与主要污染源的距离以及蔬菜大棚和冶炼厂烟囱的风向等条件,选取了具有代表性、棚龄为1~6 a的7个塑料大棚为采样点。

1.2 土壤和蔬菜样品采集及处理

根据采样区的特点,分别于2019年6月份和9月份点对点采集塑料大棚的土壤和蔬菜样品,蔬菜种类主要包括菠菜、小白菜、韭菜、油菜、茼蒿、大白菜和油麦菜。采用塑料采样器点对点采集0~20 cm的耕作层土壤和蔬菜样品。样品采集后立即放入无菌的自封塑料袋内,放置于泡沫箱内,并加入冰袋保持低温,6 h内运回实验室后立即对样品进行预处理。蔬菜采集样品数与土壤样品数相同,最终各采集样品34个。

蔬菜样品制备:蔬菜样品用自来水冲洗干净后,用去离子水冲洗3次,晾干蔬菜表面水分,称其鲜质量,测蔬菜含水率,然后置于烘箱中105℃杀青30 min,65~70℃烘24 h左右,过0.15 mm尼龙筛后保存于干燥器内。

土壤样品制备:将采集的土壤放置于阴凉处风干,直至恒质量,去除植物根茎、石块等杂物,过2 mm尼龙筛,混匀,一部分过1 mm和0.25 mm尼龙筛,用于测定土壤pH和有机质的含量,再取一部分研磨,过0.15 mm尼龙筛,用于重金属的测定。

1.3 测定方法

土壤和蔬菜中Cd和Pb的含量的测定^[25]:称取0.1 g(精确至0.000 1 g)过筛的土壤样品置于微波消解管中,加入6 mL盐酸-2 mL硝酸(优级纯)-1 mL氢氟酸(优级纯)于微波消解仪(MARS6)内消解;称取0.3 g(精确至0.000 1 g)过筛的蔬菜样品置于微波消解管中,加入10 mL硝酸(优级纯)于微波消解仪(MARS6)内消解。消解结束后在180 ℃条件下加热赶酸使管内消解液剩至1 mL左右时,用20 mL 2%硝酸溶液清洗管壁,转移到容量瓶中定容至25 mL,摇匀后取上清液,采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS 7900)测定Cd和Pb的含量,测定过程中以国家标准土壤样品[GBW07453(GSS-24)]和国家标准蔬菜样品[GBW10015(GSB-5)]进行分析质量控制。

土壤pH测定:水土比为2.5:1,采用pH计测定;土壤有机质含量测定:采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定^[26]。

蔬菜富集系数计算公式:

富集系数(BCF)=蔬菜重金属含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)/土壤重金属含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

1.4 统计与分析

使用SPSS 18.0软件对收集到的数据进行数据差异显著性分析、回归分析和均值聚类分析,使用Origin 8.5软件利用Logistic分布模型绘制拟合SSD曲线,其他试验数据利用Excel 2010进行处理。

2 结果与讨论

2.1 土壤理化性质与重金属含量

从表1可以看出,土壤样品的pH值范围为5.85~7.55,平均值为6.69。一般情况下pH较低的土壤种植的蔬菜更易受重金属污染^[27],相比湖北^[28]、湖南株洲^[29]、广东省^[30]受重金属污染的蔬菜土壤pH平均值分别为5.61、5.14、4.67,本研究的土壤样品pH偏高,可能会降低土壤重金属的生物有效性从而减少蔬菜对重金属的吸收富集^[18]。土壤样品有机质的含量范围为13.73~52.00 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为35.09 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,本研究采集的土壤样品pH和有机质的含量均在焉莉等^[31]调查的吉林省农田土壤pH和有机质的含量范围内,说明研究区土壤pH和有机质的含量并没有受到矿石开采和冶炼的显著影响。

土壤样品中Cd的含量范围为0.27~1.55 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,

表1 土壤pH、有机质和重金属含量

Table 1 The soil pH and contents of organic matter and heavy metals in soil

编号 Number	pH	有机质 Organic matter/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Cd含量 Cd content/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Pb含量 Pb content/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	编号 Number	pH	有机质 Organic matter/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Cd含量 Cd content/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Pb含量 Pb content/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
1	6.70	13.73	1.27	34.90	18	6.98	30.26	0.77	37.83
2	6.65	20.48	0.71	30.96	19	6.02	28.72	0.83	35.39
3	5.98	28.28	0.67	30.55	20	6.58	31.65	0.72	36.18
4	6.46	28.63	1.22	35.77	21	6.46	32.47	0.51	30.65
5	6.71	20.95	1.55	59.01	22	6.83	28.51	0.46	34.01
6	6.40	23.04	0.50	70.18	23	6.75	49.90	0.94	41.53
7	7.28	19.32	0.44	38.47	24	6.63	52.00	1.00	40.24
8	6.66	23.97	0.58	29.77	25	6.11	45.70	1.13	67.19
9	7.55	38.40	1.12	35.01	26	5.85	40.50	0.50	50.55
10	6.98	25.72	0.84	32.39	27	5.99	39.20	0.50	19.93
11	6.83	43.52	0.94	27.82	28	7.32	46.30	0.57	17.99
12	7.21	25.49	1.22	31.12	29	6.65	41.60	0.99	51.99
13	7.24	31.54	1.31	34.71	30	6.61	39.50	0.96	65.82
14	7.36	43.52	1.07	33.87	31	6.55	48.10	0.27	18.88
15	6.96	45.62	0.84	42.13	32	6.78	49.90	0.34	19.26
16	6.37	35.14	0.76	39.43	33	6.94	42.10	0.37	22.84
17	6.49	34.10	0.80	31.07	34	6.70	45.20	0.38	46.85

平均值为0.80 mg·kg⁻¹;Pb的含量范围为17.99~70.18 mg·kg⁻¹,平均值为37.48 mg·kg⁻¹。土壤中Cd含量超过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)中的农用地土壤污染风险筛选值的样品比例为97.06%,说明研究区域内蔬菜生产可能存在Cd污染的风险。采集土壤样品中Pb的含量均未超过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)中的农用地土壤污染风险筛选值。

2.2 蔬菜可食部位对重金属的吸收和富集

由表2可知,34个蔬菜可食部位样品中Cd的含量范围为0.06~0.52 mg·kg⁻¹,平均值为0.18 mg·kg⁻¹;Pb的含量范围为0.01~1.46 mg·kg⁻¹,平均值为0.25 mg·kg⁻¹。根据《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)蔬菜可食部位中Cd的含量超过标准值的样品比例为23.53%,Pb的含量超过标准值的样品比例为20.59%。说明在研究区域的土壤环境条件下,叶菜类蔬菜已经受到不同程度的Cd和Pb污染。对于Cd而言,土壤中Cd的含量超农用地土壤污染风险筛选值的样品比例虽然为97.06%,但蔬菜可食部位中Cd的含量超标准值的样品比例却仅仅为23.53%;对于Pb而言,虽然土壤样品中Pb含量均没有超过农用地土壤污染风险筛选值,但蔬菜可食部位

中Pb的含量超标准值的样品比例高达20.59%,说明设施蔬菜对Cd和Pb的富集特征不一样。李莲芳等^[14]采集的吉林四平设施蔬菜土壤中Cd的含量超标准值样品数量超过总数的一半,Pb的含量则没有超过标准值;有少量蔬菜样品中Cd和Pb的含量超标准值。可能是研究区土壤样品pH和有机质含量较高导致土壤中Cd的生物有效性降低,从而使叶菜类蔬菜对Cd的吸收富集降低,但却增加了蔬菜对Pb的富集^[18],具体原因仍有待进一步研究。

不同种类叶菜类蔬菜可食部位对Cd的平均富集系数大小顺序为:菠菜(51.65%)>小白菜(35.45%)>韭菜(33.07%)>油菜(23.43%)>茼蒿(21.38%)>大白菜(19.53%)>油麦菜(14.16%);对Pb的平均富集系数大小顺序为:小白菜(1.28%)>韭菜(1.01%)>菠菜(0.91%)>油麦菜(0.87%)>油菜(0.59%)>大白菜(0.50%)>茼蒿(0.10%)。另外,同种蔬菜不同季节和不同大棚采集的样品中可食部位对Cd和Pb的富集系数也有较大差异,蔬菜对Cd的富集系数变异系数大小顺序为:油菜(63.62%)>小白菜(57.52%)>大白菜(40.52%)>菠菜(21.47%)>韭菜(20.21%)>油麦菜(15.98%);蔬菜对Pb的富集系数变异系数大小顺序为:菠菜(123.07%)>小白菜(112.45%)>大白菜(71.35%)>油麦菜(58.29%)>油菜(52.28%)>韭菜

表2 蔬菜重金属含量及富集系数

Table 2 Heavy metal content and enrichment coefficient in vegetables

编号 Number	蔬菜品种 Vegetables	Cd含量 Cd Content/ (mg·kg ⁻¹)	Cd富集 系数 Cd BCF/%	Pb含量 Pb content (mg·kg ⁻¹)	Pb富集 系数 Pb BCF/%	编号 Number	蔬菜品种 Vegetables	Cd含量 Cd Content/ (mg·kg ⁻¹)	Cd富集 系数 Cd BCF/%	Pb含量 Pb content/ (mg·kg ⁻¹)	Pb富集 系数 Pb BCF/%
1	大白菜1	0.29	22.68	0.19	0.53	18	菠菜1	0.41	52.94	0.03	0.07
2	大白菜2	0.16	22.20	0.47	1.52	19	菠菜2	0.52	62.04	0.16	0.46
3	大白菜3	0.12	17.37	0.10	0.32	20	茼蒿1	0.15	21.38	0.04	0.10
4	大白菜4	0.19	15.71	0.11	0.31	21	小白菜1	0.28	55.46	0.17	0.57
5	大白菜5	0.17	10.94	0.57	0.96	22	小白菜2	0.25	53.95	0.16	0.47
6	大白菜6	0.14	28.86	0.09	0.12	23	小白菜3	0.06	5.87	0.41	0.99
7	大白菜7	0.14	31.14	0.10	0.25	24	油菜1	0.07	6.72	0.26	0.64
8	大白菜8	0.20	34.07	0.20	0.67	25	菠菜3	0.45	39.97	1.46	2.18
9	大白菜9	0.17	15.54	0.19	0.54	26	韭菜1	0.19	37.79	0.33	0.64
10	大白菜10	0.25	29.22	0.14	0.43	27	韭菜2	0.14	28.34	0.27	1.37
11	大白菜11	0.14	14.77	0.05	0.19	28	油麦菜1	0.09	15.41	0.24	1.35
12	大白菜12	0.13	10.77	0.12	0.38	29	油麦菜2	0.11	11.55	0.18	0.34
13	大白菜13	0.09	6.74	0.05	0.16	30	油麦菜3	0.15	15.53	0.61	0.93
14	大白菜14	0.12	10.79	0.01	0.03	31	小白菜4	0.09	32.67	0.72	3.83
15	大白菜15	0.16	18.52	0.25	0.59	32	小白菜5	0.10	29.28	0.10	0.53
16	大白菜16	0.16	20.64	0.11	0.28	33	油菜2	0.13	35.35	0.20	0.87
17	大白菜17	0.18	22.12	0.12	0.38	34	油菜3	0.11	28.23	0.12	0.25

(51.08%),变异系数越大说明该蔬菜品种受本身基因型或者外在条件的影响不同而对Cd和Pb的富集能力差异越大,因此叶菜类蔬菜之间对Pb的富集能力差异比对Cd的要大,而小白菜和大白菜对Cd和Pb富集能力差异都比较大。

2.3 蔬菜富集系数与土壤pH和有机质含量的相关性分析

从表3中可以看出,叶菜类蔬菜对Cd的富集系数(BCF)与土壤pH呈显著性负相关关系,即土壤pH越高,叶菜类蔬菜越不易吸收富集Cd;蔬菜对Cd的富集系数与土壤有机质的含量呈负相关,但并无显著性相关关系,因此本研究将土壤pH作为影响蔬菜吸收富集Cd的主要影响因子建立回归模型。

从表3中可看出,叶菜类蔬菜对Pb的富集系数与土壤pH无显著相关关系,具体原因可能是蔬菜品种差异较大,或者有其他共存的重金属,干扰了土壤pH对蔬菜富集Pb的影响作用^[17];叶菜类蔬菜对Pb的富集系数与土壤有机质的含量有显著正相关关系,即土壤有机质的含量越高,叶菜类蔬菜越易吸收富集Pb,推测可能是本研究中的土壤样品有机质含量较高,增加了Pb的生物有效性,促进了蔬菜对Pb的富集^[18],因此本研究将土壤有机质的含量作为影响蔬菜吸收富集Pb的主要影响因子建立回归方程。

2.4 土壤典型情景

蔬菜对Cd的富集系数与土壤pH有显著性关系,所以将土壤pH作为自变量,通过SPSS 18.0软件进行K-均值聚类分析,而蔬菜对Pb的富集系数只与有机质的含量呈显著性关系,所以将土壤有机质的含量作为自变量,通过SPSS 18.0软件进行K-均值聚类分

析。聚类结果如表4所示,从表中可以看出研究区的土壤样品土壤pH值跨度较大,分成了5.99、6.65和7.21共3种情景。土壤有机质的含量范围也较大,分成含量为20.25、30.04 g·kg⁻¹和44.44 g·kg⁻¹ 3种情景。

2.5 蔬菜富集系数归一化

利用SPSS 18.0软件将34种叶菜类蔬菜可食部位对Cd和Pb的富集系数分别与土壤pH和有机质的含量进行回归分析,得到回归方程,利用回归方程将各蔬菜不同的富集系数数据归一化到特定土壤条件下,以消除土壤理化性质差异对蔬菜富集系数的影响。回归方程如下:

$$\text{Cd:lgBCF}=a\times\text{pH}+k$$

$$\text{Pb:lgBCF}=b\times\lg\text{OM}+k$$

式中:pH为土壤pH值;OM为土壤有机质的含量,g·kg⁻¹;a、b为无量纲参数,表示土壤性质对富集系数的影响程度;k为方程截距,表示蔬菜品种对Cd和Pb的固有敏感性。

Cd的回归方程为lgBCF=-0.252pH+0.322(r=0.404);Pb的回归方程为lgBCF=0.733lgOM-3.420(r=0.233)。为进一步消除土壤理化性质对叶菜类蔬菜富集系数的影响,将34种蔬菜分别通过回归模型归一化到3种典型土壤情景下蔬菜的富集系数,见表5。如大白菜1在pH=6.7、有机质的含量为13.73 g·kg⁻¹的实际土壤中对Cd的BCF为4.54%、对Pb的BCF为0.53%,利用Cd的富集回归方程lgBCF=-0.252pH+0.322,将其归一化到土壤pH=5.99条件下得到BCF=4.54×10^{-0.252×(5.99-6.7)};同理,利用Pb的回归方程lgBCF=0.733lgOM-3.420将其归一化到土壤有机质的含量为20.25 g·kg⁻¹条件下时得到BCF=0.53×10^{0.733×(20.25/13.73)},方程中系数0.322、-3.420为各蔬菜品种间固有的敏感性,在归一化运算过程中可忽略,其他蔬菜品种以此类推。

由表5可知34种蔬菜在3种典型土壤情景下对Cd和Pb的富集系数从大到小排序一致,不同种类叶菜类蔬菜Cd的3种归一化后富集系数平均值对富集能力的排序一致:菠菜>小白菜>油菜>韭菜>大白菜>茼蒿>油麦菜,与归一化前相比,菠菜、小白菜对Cd的富集能力较强,油麦菜对Cd的富集能力较弱。不同种类叶菜类蔬菜Pb的3种归一化后富集系数平均值对富集能力的排序一致:小白菜>韭菜>菠菜>油麦菜>大白菜>油菜>茼蒿,与归一化前相比,小白菜、韭菜对Pb的富集能力较强,茼蒿对Pb的富集能力较弱。但归一化前后的富集能力排序并不完全一致,可

表3 重金属富集系数与土壤pH和有机质含量的相关性
Table 3 Correlation of heavy metal enrichment coefficient with soil pH and organic matter content

项目 Items	Cd BCF	Pb BCF
pH	-0.366*	-0.137
有机质 Organic matter	-0.188	0.339*

注:*在0.05水平(双侧)上显著相关。
Note:* significantly correlated at the 0.05 level(bilateral).

表4 土壤典型情景
Table 4 Typical situation of soil

项目 Items	聚类K-均值 Cluster K-means		
	1	2	3
pH	5.99	6.65	7.21
有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	20.25	30.04	44.44

能是由于某些种类蔬菜不同样品间对重金属富集能力差距较大,受土壤理化性质影响较大,并且和另一种蔬菜富集能力相近等,在归一化过程中导致排序的改变,但并没有改变大致趋势。

2.6 蔬菜敏感性分布和安全生产分区

将上述蔬菜品种归一化后的富集系数由大到小排列并设定相应序数*R*,计算其累计概率,累计概率*P*公式如下:

$$P=R/(N+1)$$

式中:*R*是物种从小到大排序的秩;*N*是样本数。

以1/BCF为横坐标,累计概率为纵坐标,利用Logistic分布模型在Origin 8.5得出的拟合曲线如图1和图2。由图1可知,3种典型情景土壤中蔬菜对Cd敏感性顺序基本一致,不同蔬菜对Cd的富集能力差异显著,曲线上端蔬菜代表对Cd的富集性差。综合分析可知菠菜和小白菜对Cd的富集能力强,不同大白菜和油菜样品对Cd的富集能力差异较大。

由图2可知,3种典型情景土壤中蔬菜对Pb敏感

表5 叶菜类蔬菜在土壤典型情境下归一化后的富集系数(%)
Table 5 Normalized enrichment coefficients of leafy vegetables under typical situation of soil (%)

蔬菜品种 Vegetables	Cd BCF			Pb BCF		
	1	2	3	1	2	3
大白菜1	33.91	23.33	16.99	0.71	0.95	1.26
大白菜2	32.26	22.20	16.16	1.50	2.01	2.68
大白菜3	17.27	11.89	8.66	0.25	0.34	0.45
大白菜4	20.50	14.10	10.27	0.24	0.32	0.42
大白菜5	16.45	11.32	8.24	0.94	1.25	1.66
大白菜6	36.41	25.05	18.24	0.11	0.15	0.20
大白菜7	64.67	44.50	32.40	0.26	0.34	0.46
大白菜8	49.80	34.26	24.95	0.59	0.79	1.05
大白菜9	37.61	25.88	18.84	0.34	0.45	0.60
大白菜10	51.19	35.23	25.65	0.36	0.49	0.65
大白菜11	23.77	16.36	11.91	0.11	0.14	0.19
大白菜12	21.49	14.78	10.77	0.32	0.43	0.57
大白菜13	13.68	9.41	6.85	0.11	0.15	0.20
大白菜14	23.43	16.12	11.74	0.53	0.71	0.95
大白菜15	32.09	22.08	16.08	0.32	0.43	0.58
大白菜16	25.59	17.61	12.82	0.19	0.25	0.34
大白菜17	29.36	20.20	14.71	0.26	0.35	0.46
菠菜1	92.76	63.83	46.48	0.06	0.07	0.10
菠菜2	63.10	43.42	31.62	0.36	0.48	0.64
茼蒿1	29.86	20.55	14.96	0.07	0.10	0.13
小白菜1	72.38	49.80	36.26	0.40	0.54	0.72
小白菜2	86.82	59.74	43.50	0.37	0.49	0.66
小白菜3	9.04	6.22	4.53	0.51	0.68	0.91
油菜1	9.65	6.64	4.84	0.32	0.43	0.57
菠菜1	42.78	29.44	21.43	1.20	1.60	2.13
韭菜1	34.91	24.02	17.49	0.39	0.52	0.69
韭菜2	28.34	19.50	14.20	0.85	1.13	1.51
油麦菜1	32.74	22.52	16.40	0.73	0.98	1.31
油麦菜2	16.79	11.55	8.41	0.20	0.27	0.35
油麦菜3	22.06	15.18	11.05	0.57	0.76	1.02
小白菜4	44.86	30.87	22.48	2.03	2.71	3.61
小白菜5	45.81	31.52	22.95	0.28	0.37	0.49
油菜2	60.54	41.66	30.33	0.51	0.68	0.90
油菜3	42.21	29.04	21.15	0.14	0.18	0.24

性顺序基本一致,不同蔬菜对Pb的富集能力差异显著,曲线上端蔬菜代表对Pb的富集能力差。综合分析可知叶菜类蔬菜对Pb的富集能力差异大,说明叶菜类蔬菜富集Pb的样品间差异较大。

2.7 典型土壤情景下安全生产分区

据上述分析,综合参照徐建明等^[19]和程菁靛等^[21]对宜产区、限产区和禁产区保护农作物百分比的划分,建议分别将保护90%和5%的蔬菜品种作为划分

叶菜类蔬菜宜产、限产和禁产的依据,即宜产区设置为保护90%及以上蔬菜品种;限产区设置为保护5%~90%蔬菜品种;禁产区设置为保护5%及以下蔬菜品种,详细划分如下:根据叶菜类食品限量标准,按照BCF公式可反推出3种情景下土壤中Cd和Pb的阈值(见表6),取3种情景下阈值的平均值作为划分依据,即保护90%和5%蔬菜时土壤中Cd的含量的阈值分别为 $(0.29+0.42+0.58)/3=0.43\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $(1.94+$

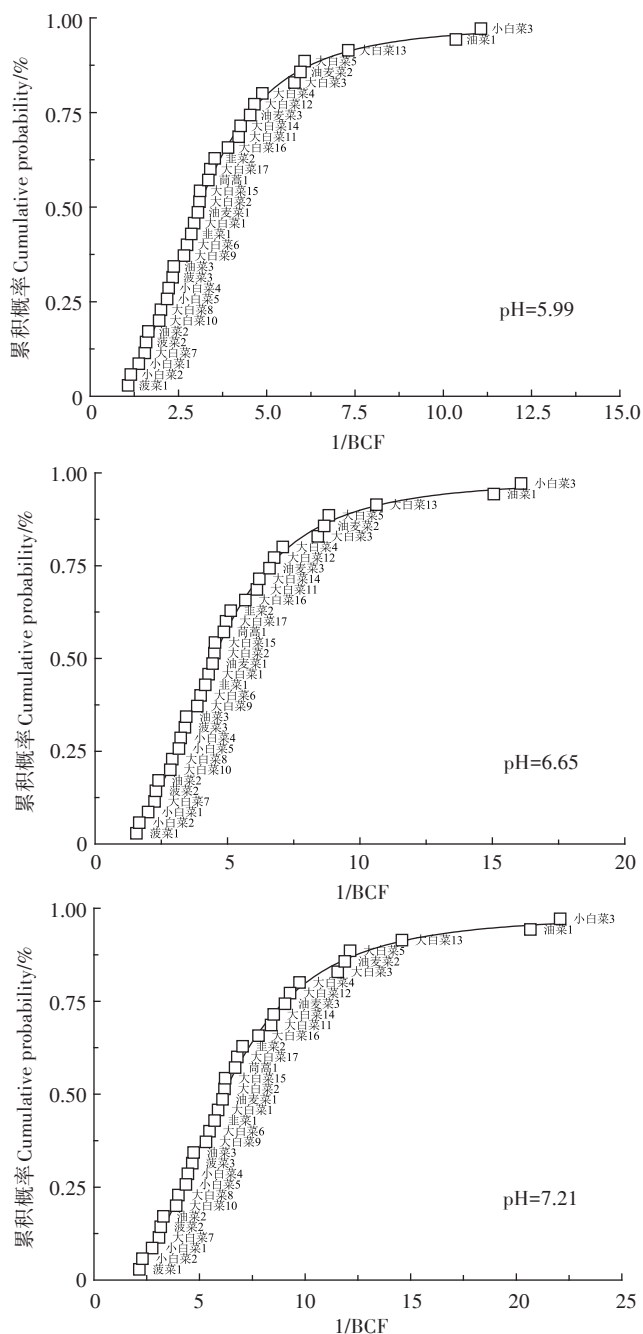


图1 土壤典型情景下Cd的叶菜类蔬菜敏感分布曲线

Figure 1 Sensitivity distribution curves of leafy vegetables for Cd under typical situation of soil

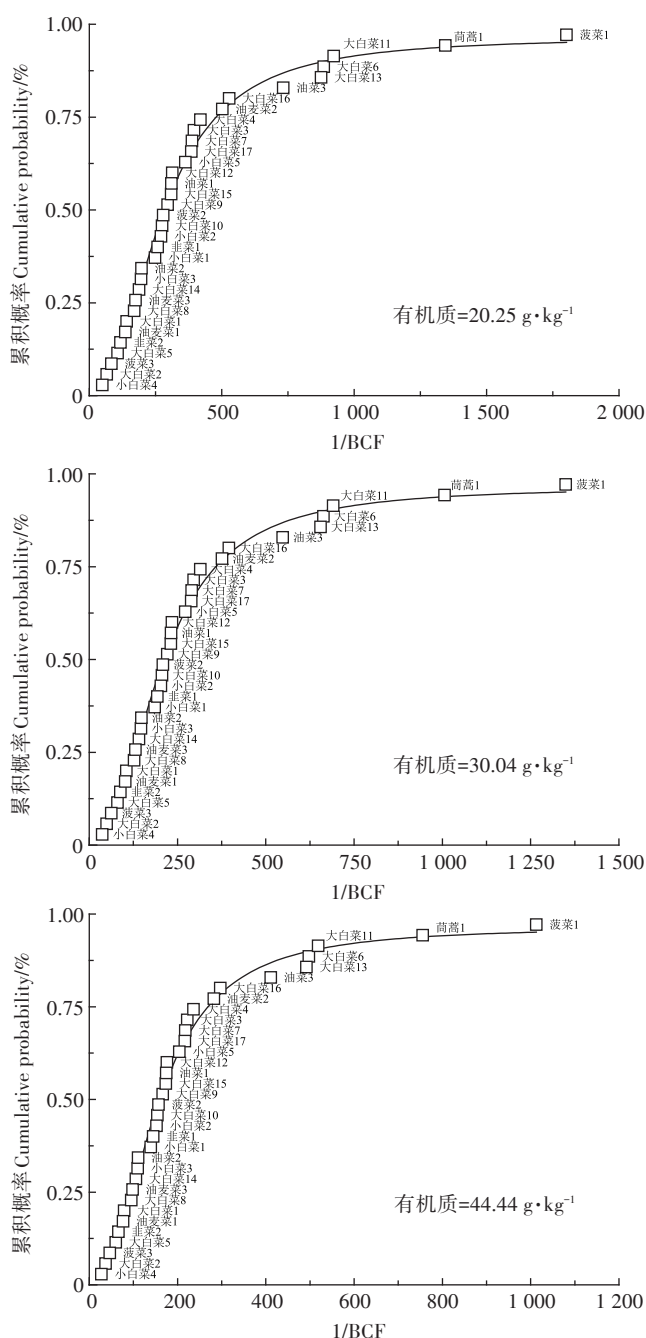


图2 土壤典型情景下Pb的叶菜类蔬菜敏感分布曲线

Figure 2 Sensitivity distribution curves of leafy vegetables for Pb under typical situation of soil

$2.83+3.88)/3=2.88\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Pb 的含量的阈值则分别为 $(31.54+23.47+17.62)/3=24.21\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $(508.99+381.51+286.43)/3=392.31\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。当土壤中 Cd 的含量 $\leq 0.43\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为宜产区, 土壤中 Cd 的含量 $0.43\sim 2.88\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为限产区, 土壤中 Cd 的含量 $\geq 2.88\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为禁产区; 当土壤中 Pb 的含量 $\leq 24.21\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为宜产区, 土壤中 Pb 的含量 $24.21\sim 392.31\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为限产区, 土壤中 Pb 的含量 $\geq 392.31\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为禁产区。

本研究得到的宜产区和限产区土壤中 Cd 的含量阈值高于《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)中 Cd 的农用地土壤污染风险筛选值和农用地土壤污染风险管制值的最低值, 接近最高值, 可能原因是研究区土壤的 pH 较高, 导致土壤中 Cd 的活性降低, 使得叶菜类蔬菜对 Cd 的吸收富集能力下降^[32]。宜产区土壤中 Pb 的含量阈值明显小于《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)中 Pb 的农用地土壤污染风险筛选值, 限产区土壤中 Pb 的阈值略低于《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)中 Pb 的农用地土壤污染风险管制值的最低值, 原因可能是东北地区土壤有机质含量比较高, 增加了 Pb 的生物有效性, 促进了设施叶菜类蔬菜对 Pb 的吸收^[17-18]。另外, 研究表明不同种类蔬菜对不同重金属的富集能力差异很大, 而叶菜类蔬菜更易吸收富集 Pb, 使得 Pb 往往成为叶菜类蔬菜的主要超标重金属^[33]。赵勇等^[34]对蔬菜土壤 Pb 的污染阈值进行研究, 其结果表明土壤中 Pb 的含量阈值油麦菜为 $39.91\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 生菜为 $33.70\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 史明易等^[35]收集 12 个省(市)共 19 篇文献中设施蔬菜重金属污染的数据进行统计分析, 当土壤 pH 为 6.5~7.5 时叶菜类蔬菜土壤中 Pb 含量的安全阈值为 $20.55\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。以上说明 Pb 对叶菜类蔬菜安全生产的风险较高, 在蔬菜种植过程

中需要注意土壤中 Pb 的污染, 这与本文的研究结果基本一致。

当土壤中 Cd 和 Pb 的含量处于宜产区时能保护 90% 叶菜类蔬菜正常生长, 可种植大部分叶菜类蔬菜品种, 一些高积累蔬菜品种如菠菜、小白菜和韭菜等种植需要采用以农艺调控为主的安全生产技术^[36-37], 生产过程中严格控制农业投入品可能带来的重金属污染。当土壤中 Cd 和 Pb 的含量处于限产区时应禁止种植极高富集能力的蔬菜, 若土壤中 Cd 的含量处于限产区时不应种植菠菜和小白菜, 土壤中 Pb 的含量处于限产区时不应种植高富集 Pb 的小白菜、韭菜、大白菜、菠菜和油麦菜品种, 蔬菜种植需要采用以农艺调控为主、土壤修复为辅的安全生产技术, 生产过程中加强对土壤和蔬菜产品中 Cd 和 Pb 的协同监测^[38-40]。当土壤中 Cd 和 Pb 的含量处于禁产区时 95% 叶菜类蔬菜均较容易富集 Cd 和 Pb, 大部分蔬菜品种不易直接种植, 可科学性选择其他农作物或种植观赏性植物^[41-42]。

3 结论

(1) 设施叶菜类蔬菜对土壤中 Cd 的富集系数与土壤 pH 值呈显著负相关关系; 对 Pb 的富集系数与土壤有机质的含量呈显著正相关关系。

(2) 菠菜和小白菜对 Cd 的富集能力较强, 油麦菜对 Cd 的富集能力较弱; 小白菜和韭菜对 Pb 的富集能力较强, 茼蒿对 Pb 的富集能力较弱。叶菜类蔬菜对 Pb 的富集系数样品间差异比 Cd 的大, 其中小白菜和大白菜对 Cd 和 Pb 的富集能力存在较大差异。

(3) 建议研究区内设施叶菜类蔬菜宜产区、限产区和禁产区土壤中 Cd 的含量范围分别为 ≤ 0.43 、 $0.43\sim 2.88\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $\geq 2.88\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Pb 的含量范围分别为 ≤ 24.21 、 $24.21\sim 392.31\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $\geq 392.31\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

表 6 基于 Log-logistic 拟合曲线保护不同比例叶菜类蔬菜的土壤 Cd 和 Pb 生态阈值

Table 6 The ecological thresholds of Cd and Pb in soil to protect different proportions of leafy vegetables based on Log-logistic fitting curve

重金属 Heavy metals	<i>P</i>	食品限量标准/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	1		2		3	
			土壤生态阈值		土壤生态阈值		土壤生态阈值	
			BCF/%	Soil ecological thresholds/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	BCF/%	Soil ecological thresholds/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	BCF/%	Soil ecological thresholds/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Cd	10	0.2	69.40	0.29	47.72	0.42	34.73	0.58
	95	0.2	10.29	1.94	7.08	2.83	5.15	3.88
Pb	10	0.3	0.95	31.54	1.28	23.47	1.70	17.62
	95	0.3	0.06	508.99	0.07	381.51	0.10	286.43

注: $P=10, 95$ 分别代表能保护 90%、5% 叶菜类蔬菜的土壤中 Cd 和 Pb 的含量。
Note: $P=10, 95$ indicate Cd and Pb content in soils that can protect 90% and 5% of leafy vegetables, respectively.

参考文献:

- [1] Fan Y, Li H, Xue Z J, et al. Accumulation characteristics and potential risk of heavy metals in soil-vegetable system under greenhouse cultivation condition in northern China[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 102: 367-373.
- [2] 左绪金. 我国设施蔬菜产业发展现状及其未来发展路径探析[J]. 现代农业研究, 2019, 5(18): 47-48.
ZUO Xu-jin. Analysis on the present situation and future development of vegetable industry in facilities in China[J]. *Modern Agricultural Research*, 2019, 5(18): 47-48.
- [3] 赵会薇, 杨风霞, 霍立勇, 等. 河北省4个设施蔬菜生产县域重金属含量特征及质量评价[J]. 山西农业科学, 2018, 46(2): 240-245.
ZHAO Hui-wei, YANG Feng-xia, HUO Li-yong, et al. Heavy metals content characteristics analysis and quality evaluation of 4 facilities vegetables producing counties in Hebei Province[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2018, 46(2): 240-245.
- [4] 吴慧梅. 大棚种植方式对蔬菜中重金属迁移及富集的影响[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012: 1-2.
WU Hui-mei. Influences of greenhouse cultivation on migration and accumulation of heavy metals in vegetables[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2012: 1-2.
- [5] 李世楠. 我国设施蔬菜产业发展现状与未来发展趋势探讨[J]. 中国林副特产, 2019(1): 84-85.
LI Shi-nan. Discussion on the development status and future development trend of chinese protected vegetable industry[J]. *Forest By-Product and Speciality in China*, 2019(1): 84-85.
- [6] 韩旭. 吉林省设施蔬菜产业现状与发展对策研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2012: 1-4.
HAN Xu. The current situation of protected vegetable industry in Jilin Province and study on development countermeasures[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2012: 1-4.
- [7] 陈永, 黄标, 胡文友, 等. 设施蔬菜生产系统重金属积累特征及生态效应[J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 693-702.
CHEN Yong, HUANG Biao, HU Wen-you, et al. Accumulation characteristics and ecological effects of heavy metals in protected vegetable production system[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(4): 693-702.
- [8] 汪琳琳, 方凤满, 蒋炳言. 中国菜地土壤和蔬菜重金属污染研究进展[J]. 吉林农业科学, 2009, 34(2): 61-64.
WANG Lin-lin, FANG Feng-man, JIANG Bing-yan. Processes of studies of heavy metal pollution of soil and vegetables on China's vegetable field[J]. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2009, 34(2): 61-64.
- [9] 杨军, 郑袁明, 陈同斌, 等. 北京市凉水河灌区土壤重金属的积累及其变化趋势[J]. 环境科学学报, 2005, 25(9): 1175-1181.
YANG Jun, ZHENG Yuan-ming, CHEN Tong-bin, et al. Accumulation and temporal variation of heavy metals in the soils from the Liang-feng irrigated area, Beijing City[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(9): 1175-1181.
- [10] Tian k, Hu W Y, Xing Z, et al. Determination and evaluation of heavy metals in soils under two different greenhouse vegetable production systems in eastern China[J]. *Chemosphere*, 2016, 165: 555-563.
- [11] 崔晓峰, 李淑仪, 丁效东, 等. 喷施硅铈溶胶缓解镉铅对小白菜毒害的研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 171-177.
CUI Xiao-feng, LI Shu-yi, DING Xiao-dong, et al. Effects of spray-ing silicon and cerium sols on relieving toxicity of Pb and Cd in the cabbage[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(1): 171-177.
- [12] Chen Y, Huang B, Hu W Y, et al. Environmental assessment of closed greenhouse vegetable production system in Nanjing, China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(8): 1418-1429.
- [13] 孔晓乐, 吴重阳, 曹靖, 等. 干旱地区设施土壤和蔬菜重金属含量及人体健康风险——以白银市为例[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 8(1): 92-97.
KONG Xiao-le, WU Chong-yang, CAO Jing, et al. A survey of heavy metal concentrations in soils and vegetables in Baiyin greenhouse production and their health risk[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 8(1): 92-97.
- [14] 李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 等. 吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2936-2943.
LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-bo, et al. Accumulation characteristics of heavy metals in greenhouse soil and vegetables in Siping City, Jilin Province[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(6): 2936-2943.
- [15] 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.
- [16] Wang G, Su M, Chen Y, et al. Transfer characteristics of cadmium and lead from soil to the edible parts of six vegetable species in south-eastern China[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 144(1): 127-135.
- [17] 祖艳群, 李元, 陈海燕, 等. 蔬菜中铅镉铜锌含量的影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3): 289-292.
ZU Yan-qun, LI Yuan, CHEN Hai-yan, et al. Study on the content and distribution of Cd, Pb, Zn elements in vegetables[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(3): 289-292.
- [18] 章明奎, 方利平, 张履勤. 酸化和有机质积累对茶园土壤铅生物有效性的影响[J]. 茶叶科学, 2005, 25(3): 159-164.
ZHANG Ming-kui, FANG Li-ping, ZHANG Lü-qin. Effects of acidification and organic matter accumulation on lead bio-availability in tea garden soils[J]. *Journal of Tea Science*, 2005, 25(3): 159-164.
- [19] 徐建明, 孟俊, 刘杏梅, 等. 我国农田土壤重金属污染防治与粮食安全保障[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 153-159.
XU Jian-ming, MENG Jun, LIU Xing-mei, et al. Control of heavy metal pollution in farmland of China in terms of food security[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 153-159.
- [20] 刘香香, 文典, 王其枫, 等. 广东省不同种类蔬菜与土壤镉污染相关性及其阈值研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(10): 109-115.
LIU Xin-xiang, WEN Dian, WANG Qi-feng, et al. Study on the relationship between soil Cd pollution and Cd contents in different kinds of vegetables and pollution threshold of soil in Guangdong Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(10): 109-115.
- [21] 程菁靓, 赵龙, 杨彦, 等. 我国长江中下游水稻产区铅污染分区划分方法研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(1): 70-78.
CHENG Jing-liang, ZHAO Long, YANG Yan, et al. Classification methods for typical lead-contaminated rice production areas of the middle and lower Yangtze River in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(1): 70-78.
- [22] 刘克. 我国主要小麦产地土壤镉和铅的安全阈值研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016: 91-92.

- LIU Ke. Soil threshold of cadmium and lead in major Chinese wheat-producing areas[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016: 91-92.
- [23] 谢忠雷, 王筱涵, 李娜, 等. 吉林省耕地土壤重金属污染研究现状及展望[J]. 吉林农业大学学报, 2018, 40(4): 457-462.
- XIE Zhong-lei, WANG Xiao-han, LI Na, et al. Research status and prospect of heavy metal pollution in cultivated soils in Jilin Province[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2018, 40(4): 457-462.
- [24] 贾丽, 刘建华, 张露, 等. 吉林省红旗岭和漂河川镍矿区耕地土壤重金属污染特征[J]. 吉林农业大学学报, 2015, 37(3): 338-345, 374.
- JIA Li, LIU Jian-hua, ZHANG Lu, et al. Characteristics of heavy metal pollution in farmland soil of the two nickel mines of Hongqiling and Piaoheshuan, Jilin Province[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2015, 37(3): 338-345, 374.
- [25] 中华人民共和国生态环境部. 土壤和沉积物 金属元素总量的消解 微波消解法(HJ 832—2017)[S]. 北京: 中国环境出版社, 2017.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Soil and sediment—Digestion of total metal elements—Microwave assisted acid digestion method (HJ 832—2017)[S]. Beijing: China Environmental Press, 2017.
- [26] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 12-533.
- LU Ru-kun. Analytical methods for agrochemistry of soils[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999: 12-533.
- [27] Yu H X, Li J, Luan Y N. Meta-analysis of soil mercury accumulation by vegetables[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1261.
- [28] 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: 10-11.
- HUANG Zhi-liang. Screening of low Cd-accumulation vegetable cultivars and research on its properties of Cd-accumulation and physiology[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012: 10-11.
- [29] 娄伟. 镉铅低累积萝卜、胡萝卜、茄子品种筛选及萝卜镉累积规律研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010: 10-11.
- LOU Wei. Screening of radish, carrot, eggplant cultivars with low accumulation of cadmium, lead and research on the accumulation property of cadmium by radish under cadmium polluted soils[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010: 10-11.
- [30] 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.
- [31] 焉莉, 王寅, 冯国忠, 等. 吉林省农田土壤肥力现状及变化特征[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4800-4810.
- YAN Li, WANG Yin, FENG Guo-zhong, et al. Status and change characteristics of farmland soil fertility in Jilin Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4800-4810.
- [32] 胡文. 土壤-植物系统中重金属的生物有效性及其影响因素的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008: 28.
- HU Wen. Heavy metal bio-availability and its affecting factors in soil-plant system[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008: 28.
- [33] 闻剑, 梁辉, 胡曙光, 等. 2013—2014年广东省基地蔬菜重金属污染状况调查[J]. 中国食品卫生杂志, 2015, 27(2): 159-164.
- WEN Jian, LIANG Hui, HU Zhu-guang, et al. Investigation of heavy metal contamination of vegetables from vegetable base of Guangdong Province from 2013 to 2014[J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2015, 27(2): 159-164.
- [34] 赵勇, 李红娟, 魏婷婷, 等. 土壤、蔬菜的铅污染相关性分析及土壤铅污染阈值研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(4): 843-847.
- ZHAO Yong, LI Hong-juan, WEI Ting-ting, et al. Relationship between soil Pb pollution and Pb contents in vegetables and pollution threshold of soil Pb[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(4): 843-847.
- [35] 史明易, 王祖伟, 王嘉宝, 等. 基于富集系数对蔬菜土壤重金属的安全阈值研究[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(2): 130-134.
- SHI Ming-yi, WANG Zu-wei, WANG Jia-bao, et al. Study on safety threshold of heavy metals in vegetable soils based on bioaccumulation factor[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(2): 130-134.
- [36] 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. Enrichment difference of different types of vegetables to heavy metals[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2014, 42(6): 129-132.
- [37] 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: 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: 328-333.
- [38] 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.
- [39] 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 (Nat Sci Ed)*, 2012, 40(11): 172-178.
- [40] 杨桥, 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.
- [41] 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]. 生态学杂志, 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.
- [42] 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.