

郭 畔, 宋雪英, 刘伟健, 等. 沈阳市新民设施菜地土壤重金属污染特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(4): 835–844.

GUO Pan, SONG Xue-ying, LIU Wei-jian, et al. Contamination characteristics of heavy metals in greenhouse vegetable fields of Xinmin, Shenyang City, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(4): 835–844.

沈阳市新民设施菜地土壤重金属污染特征分析

郭 畔¹, 宋雪英^{1*}, 刘伟健¹, 李玉双¹, 魏建兵¹, 李秀颖², 夏思雨³

(1. 沈阳大学区域污染环境生态修复教育部重点实验室, 沈阳 110044; 2. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 3. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071)

摘 要:为调查沈阳新民蔬菜基地土壤重金属污染状况,探讨蔬菜基地种植方式、种植年限等因素对设施菜地土壤重金属含量的影响,以沈阳市新民蔬菜基地不同种植年限的设施菜地土壤为研究对象,以露天菜地和玉米大田土壤为对照,采用原子吸收分光光度法和原子荧光法测定菜地土壤中镉(Cd)、铅(Pb)、镍(Ni)、铬(Cr)、铜(Cu)、锌(Zn)、砷(As)和汞(Hg) 8种《温室蔬菜产地环境质量评价标准》(HJ/T 333—2006)中控制的重金属含量并分析污染特征,同时,测定土壤pH值、有机质、总氮和总磷含量等土壤基本理化指标。对不同种植年限的设施菜地土壤重金属的污染状况进行评价,对土壤重金属含量与土壤理化性质进行相关性分析。结果表明,新民地区设施菜地的重金属平均含量从大到小顺序为Zn>Cr>Cu>Ni>Pb>As>Hg>Cd,其中Cu、Cd和Hg含量存在超标现象,超标率分别为2.4%、26.8%和22.0%。与露天菜地和大田相比较,设施菜地土壤中Cd、Cu、Zn、As和Hg的平均含量高于露天菜地和大田对照,而Pb、Ni、Cr的平均含量低于露天菜地土壤。设施菜地土壤重金属污染的内梅罗综合污染指数约为0.87,评价等级为警戒限,重金属Cr、Cd含量与种植年限具有极显著正相关关系($P<0.01$);相关分析表明,土壤中Cu、Zn、Cd、Cr的含量与土壤有机质含量显著正相关($P<0.05$),Cu、Zn、Cr的含量同时又与总氮含量显著正相关($P<0.05$);土壤中重金属Cu与Zn, Cr与Zn, Cd与Zn, Pb与Ni, Cr与Ni, Cd与Cr具有极显著的正相关关系($P<0.01$)。研究表明,新民设施菜地土壤呈微酸性至酸性, Hg含量达到污染水平,其他重金属处于尚清洁状态,重金属含量处于警戒和污染等级的点位占53.7%,重金属污染问题应引起重视。

关键词:设施菜地;土壤;种植年限;重金属;污染特征

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)04-0835-10 doi:10.11654/jaes.2018-0883

Contamination characteristics of heavy metals in greenhouse vegetable fields of Xinmin, Shenyang City, China

GUO Pan¹, SONG Xue-ying^{1*}, LIU Wei-jian¹, LI Yu-shuang¹, WEI Jian-bing¹, LI Xiu-ying², XIA Si-yu³

(1. Key Laboratory of Regional Environment and Eco-remediation, Ministry of Education, Shenyang University, Shenyang 110044, China; 2. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: Soil samples were collected from greenhouse vegetable fields of different planting years from the Xinmin vegetable field, Shenyang, China. Soil samples from the open vegetable and maize fields were used as controls. The concentration of cadmium (Cd), lead (Pb), nickel (Ni), chromium (Cr), copper (Cu), zinc (Zn), mercury (Hg), and arsenic (As), which are listed in the Environmental Quality Evaluation Standards for Farmland of Greenhouse Vegetables Production (HJ/T 333—2006), was determined by atomic absorption spectrophotometry and atomic fluorescence spectrometry. Basic physicochemical properties of soil including pH and the content of soil organic matter (OM), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) were also measured. The concentration of heavy metals in the greenhouse vegetable fields decreased in the following order: Zn>Cr>Cu>Ni>Pb>As>Hg>Cd. The concentration of Cu, Cd, and Hg exceeded the relative

收稿日期:2018-07-09 录用日期:2018-10-17

作者简介:郭畔(1993—),女,辽宁阜新人,硕士研究生,从事环境评价与土壤生物修复研究。E-mail:guopan199311@163.com

*通信作者:宋雪英 E-mail:songxy2046@163.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0800900);国家自然科学基金项目(41771200,21377139)

Project supported: The National Key Research and Development Project (2017YFD0800900); The National Natural Science Foundation of China (41771200, 21377139)

control standards at the rate of 2.4%, 26.8%, and 22.0%, respectively. The concentration of Cd, Cu, Zn, As, and Hg in the greenhouse vegetable fields was higher than that in the open vegetable and maize fields. Furthermore, the concentration of Pb, Ni, and Cr in the greenhouse vegetable fields was lower than that in the open vegetable fields. The comprehensive pollution Nemerow Index of heavy metals in the greenhouse vegetable soil of Xinmin vegetable base was approximately 0.87, within the range of warning limits. The concentration of Cr and Cd in soil positively correlated with the planting year. The concentration of Cu, Zn, Cd, and Cr in soil positively correlated with the soil OM content ($P < 0.05$). The concentration of Cu, Zn, and Cr in soil positively correlated with the TN content. In addition, Cu and Zn, Cr and Zn, Cd and Zn, Pb and Ni, Cr and Ni, and Cd and Cr were positively correlated.

Keywords: greenhouse vegetable field; soil; planting year; heavy metals; contamination characteristic

近年来,设施蔬菜产业发展迅猛,中国已经成为世界上设施栽培面积最大的国家,截至2010年,设施蔬菜播种面积约达467万 hm^2 ,占我国设施栽培面积的95%^[1]。设施菜地高投入、高产、高复种指数的特点提高了农产品产量,然而,农药和化肥的大量使用以及不合理的管理方式都会造成重金属在土壤和蔬菜中的累积和富集^[2],进而通过食物链进入人体,对人类健康造成威胁^[3]。

我国设施菜地分布范围广泛,不同地区设施菜地土壤中重金属均存在不同程度的累积和超标现象,例如,河南新乡设施菜地土壤中Cd、Pb和Cr的含量超标^[4],昆明市设施菜地土壤中Cu、Cd、Hg和Zn含量超标^[5]。关于影响设施菜地土壤中重金属含量因素的研究主要包括种植年限^[6]、利用方式^[7]和肥料种类^[8]等。研究发现,在不同利用方式下土壤中重金属含量有所差异,山东设施菜地土壤中Cr含量高于其他利用方式,而Pb含量明显低于普通农田^[9];有机肥的施用导致吉林和北京地区设施土壤Cr的累积^[10-11],随着设施菜地种植年限的增加,设施菜地中一些种类的重金属含量持续增加^[5,12]。

沈阳市新民蔬菜基地位于辽宁省沈阳市主城区的西部,是我国东北地区著名的“蔬菜之乡”。截至2014年末,新民设施菜地总面积已达3.6万 hm^2 ,其区域化与规模化还在逐步加大^[13]。沈阳新民蔬菜基地的蔬菜除供应沈阳地区外,还出口韩国、俄罗斯和日本等国家。为了保障居民健康,提高蔬菜质量,蔬菜无公害已经成为蔬菜市场准入的必备条件,这就对设施菜地的土壤环境质量提出了更高的要求。然而,目前针对新民蔬菜基地土壤重金属的调查工作尚无文献报道。为此,本文针对沈阳新民蔬菜基地土壤中的重金属含量开展污染情况调查,探讨蔬菜基地种植方式(露天种植和设施种植)、种植年限等因素对设施菜地土壤重金属含量的影响,以为设施菜地土壤重金属污染防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

新民蔬菜基地,位于辽宁省沈阳市下辖新民市,地貌为辽河冲积平原,温带大陆性季风气候,冬季寒冷干旱,夏季湿热,春秋两季时间较短,气候多变。全年降水量600 mm左右,年平均相对湿度为62%。土壤类型为潮棕壤。

1.2 土壤样品的采集

本研究选取新民蔬菜基地4个乡镇的样地,分别为大民屯镇、大喇叭乡、前当堡镇和兴隆堡镇,共采集表层土壤样品49个,其中,设施菜地样点41个,露天菜地样点5个,玉米大田对照3个,用梅花点采样法采集表层(0~20 cm)土壤,设施菜地土壤采样点用GPS进行了定位,点位分布如图1。41个设施菜地采样点棚龄为1~20年,其中,棚龄为7、12、17年的样点各3个,11、20年的样点各5个,4、5年的样点6个,10年的样点4个,1年的样点2个,2、8、14、15年的样点各1个。设施菜地多为年生产3季,主菜以黄瓜、西红柿、芸豆、辣椒为主,叶菜以油麦菜、生菜、小白菜、油菜、茼蒿为主;露天菜地年生产2季,以种植大葱和白菜为主;大田年生产1季,以种植玉米为主。露天菜地和大田生产施用肥料以二胺、尿素、复合肥等化学肥料为主;设施菜地生产中所用肥料种类繁多,且施用灵活,多采用牛粪、猪粪、鸡粪等粪肥或商品化有机肥与化学肥料配合施用。

1.3 土壤样品前处理

将采集的土样混匀后用四分法缩分至100 g。缩分后的土样经风干后,除去土样中的植物根系、石块等杂质,用玛瑙棒研磨,过孔径0.149 mm(100目)尼龙筛,混匀后进行详细标注并密封保存,用于土壤理化性质和土壤重金属含量的测定。

1.4 土壤样品分析

土壤基本理化性质分析:土壤pH值的测定采用

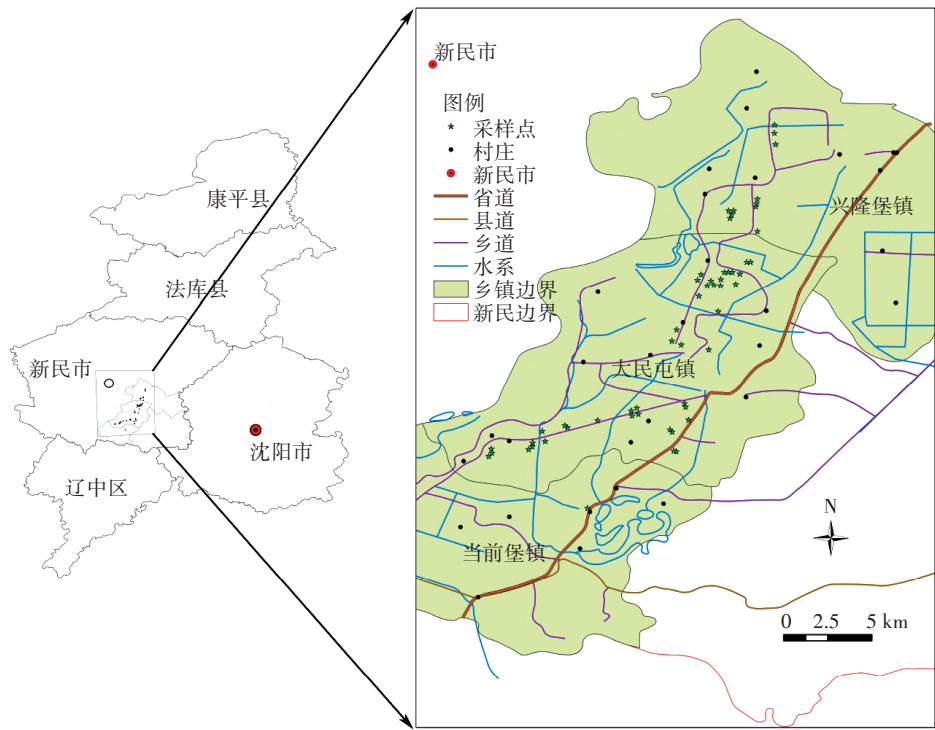


图1 采样点分布图

Figure 1 The location of sampling sites

玻璃电极法,土:水质量比为1:2.5;土壤有机质(SOM)的测定采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法;土壤中全氮(TN)的测定采用凯氏定氮法;全磷(TP)的测定采用酸溶钼锑抗比色法^[14]。

土壤样品中重金属含量分析:采用HCl-HF-HNO₃-HClO₄消煮法提取土壤中Cd、Pb、Ni、Cr、Cu、Zn,采用火焰-原子吸收分光光谱仪(Varian-AA 220)测定样品中Ni、Cr、Cu和Zn的含量,采用石墨炉-原子吸收分光光谱仪(Contraa 700)测定样品中Cd和Pb的含量^[15],采用V₂O₅催化-电热板消解法提取土壤中的As和Hg,采用原子荧光法进行测定^[16]。重金属标准样品购自农业农村部环境保护科研监测所。

2 结果与讨论

2.1 设施菜地土壤理化性质

新民蔬菜基地土壤的理化性质如表1所示,根据土壤肥力等级标准,新民蔬菜基地的土壤呈微酸性(5.5~6.5)至酸性(4.5~5.5),其中,设施菜地土壤的pH值平均为6.00±0.66(*n*=41),高于露天菜地土壤(5.35±0.62,*n*=5)和大田土壤(5.52±0.64,*n*=3)。近10年来,辽宁省大力开展科技下乡活动,新民设施菜地经营农户在科技专家指导下十分重视有机肥的施用,而有机肥如鸡粪、牛粪和猪粪在经过发酵后,pH值多为碱性,因此设施菜地土壤的pH值高于主要施用化学肥

表1 新民蔬菜基地土壤的理化性质

Table 1 Basic physiochemical properties of soils in Xinmin vegetable fields

指标 Index	设施菜地(<i>n</i> =41)Greenhouse vegetable fields		露天菜地(<i>n</i> =5)Open-air vegetable fields		大田对照(<i>n</i> =3)Field control	
	平均值±标准差 M±SD	变异系数 CV	平均值±标准差 M±SD	变异系数 CV	平均值±标准差 M±SD	变异系数 CV
pH	6.00±0.66	0.109	5.35±0.62	0.116	5.52±0.64	0.116
SOM/g·kg ⁻¹	24.75±8.20	0.283	17.93±1.30	0.073	21.89±5.63	0.256
TN/g·kg ⁻¹	1.52±0.38	0.267	1.05±0.53	0.500	1.15±0.14	0.083
TP/g·kg ⁻¹	0.37±0.37	2.667	0.08±0.08	1.143	0.31±0.37	1.333

注:SOM—土壤有机质含量;TN—总氮含量;TP—总磷含量。
Note:SOM indicates soil organic matter content;TN indicates total nitrogen content;TP indicates total phosphorus content.

料的露天菜地和大田土壤。肖辉等^[17]在施用有机肥对设施土壤pH值影响研究中也发现,设施土壤中施用鸡粪、猪粪能提高土壤的pH值,避免土壤酸化,其原因可能是有机肥中的有机官能团加强了对H⁺和Al³⁺的吸附作用^[18],以及有机肥在矿化过程中发生有机阴离子脱羧基化并释放碱性物质(钙、镁等)^[19],致使土壤pH值上升^[20]。新民蔬菜基地露天菜地土壤主要施用化学肥料,且因复种指数高,施肥量大于大田,因此,pH值低于大田土壤。

设施菜地土壤的有机质(SOM)含量平均为24.75 g·kg⁻¹,显著高于露天菜地17.93 g·kg⁻¹和大田土壤21.89 g·kg⁻¹,土壤总氮(TN)平均值也呈现相同规律,即设施菜地(1.52 g·kg⁻¹)>大田(1.15 g·kg⁻¹)>露天菜地(1.05 g·kg⁻¹),这一现象与Ge等^[21]的研究相一致。参照我国土壤肥力分级标准,新民设施菜地土壤SOM含量高(25 g·kg⁻¹>平均值≥20 g·kg⁻¹),TN含量极高(平均值≥1.2 g·kg⁻¹),然而总磷(TP)含量极低(P₂O₅<0.4 g·kg⁻¹),设施菜地的土壤磷素供应不足。

将新民设施菜地按照种植年限1~5、6~10、11~15年和16~20年分成4组,进行土壤理化性质的统计分析,如表2。统计分析结果显示,不同种植年限设施菜地土壤pH差异显著,种植年限为11~15年的设施菜地pH显著高于其他3组处理;种植年限为11~15年的设施菜地TN含量显著高于1~5年组处理;而TP和SOM在4组处理间无显著差异。高新昊等^[22]研究发现,随种植年限增加,山东寿光设施菜地土壤pH值均明显下降,有机质含量、总氮和总磷量均持续升高,可见,本研究中种植年限对新民设施菜地土壤理化性质的影响规律与山东寿光设施菜地存在一定的差别,这可能与不同设施菜地种植的蔬菜种类以及施肥管理习惯不同有关。

对新民设施菜地土壤的基础理化性质(pH、SOM、TN和TP)以及种植年限进行相关性分析(如表3),结果发现,土壤有机质与总氮含量极显著正相

表3 设施菜地土壤基础理化性质的相关性分析

Table 3 The relativity analysis of basic physiochemical properties of soils in facilities vegetable field

指标 Index	pH	TN	TP	SOM
种植年限	0.260	0.259	-0.135	0.294
pH		-0.002	0.051	-0.014
TN			0.029	0.737**
TP				0.111

注:* $P<0.05$, ** $P<0.01$ 。下同。

Note: * $P<0.05$, ** $P<0.01$. The same below.

关($r=0.737$, $P<0.01$),而其他指标间无显著相关性($P>0.05$),设施菜地种植年限与各土壤理化性质指标间无显著相关性。

2.2 设施菜地土壤重金属含量

新民设施菜地土壤中Cd、Pb、Cu、Zn、As、Hg、Ni和Cr的平均含量分别为0.17、18.05、24.21、83.53、3.37、0.24、18.52 mg·kg⁻¹和50.34 mg·kg⁻¹,按平均含量大小排列顺序为Zn>Cr>Cu>Ni>Pb>As>Hg>Cd。与我国现行《温室蔬菜产地环境质量评价标准》(HJ/T 333—2006)相比(表4),元素Cu、Cd和Hg存在超标现象,样点超标率分别为2.4%、26.8%和22.0%,Pb、Ni、Cr、Zn和As含量均未超过标准值。然而,与新民土壤背景值^[23]相比,Cd、Ni和Hg含量超过背景值的样点比例为58.5%、78.0%、85.4%,Cd、Ni、Hg含量平均值分别为土壤背景值的2.24、1.15倍和10.43倍;样点中的Cu、Zn和Cr含量全部高于背景值,平均含量分别是背景值的1.82、2.56倍和1.53倍;26.8%的样点中Pb含量超过了背景值,样品中的As含量均未超过背景值。新民设施菜地土壤中Cd、Pb、Zn、As、Ni、Cr平均含量低于山西省菜地土壤重金属含量^[24],Cu含量与山西地区基本持平,Hg含量则要高于山西省菜地土壤。另外,通过对比重金属含量与背景值的比值发现,新民土壤中As和Pb的平均含量小于背景值,且Cd、Ni、Cr、Hg的含量与背景值的比值均小于山西省的比值。

表2 不同年限设施菜地土壤理化性质统计分析结果

Table 2 The content of heavy metals in the soil of vegetable fields with different planting years

种植年限 Planting years/a	pH	TN/g·kg ⁻¹	TP/g·kg ⁻¹	SOM/g·kg ⁻¹
1~5	5.68±0.67b	1.35±0.26b	0.34±0.28a	22.64±5.70a
6~10	5.88±0.43b	1.55±0.47ab	0.46±0.46a	27.07±7.32a
11~15	6.58±0.64a	1.72±0.34a	0.28±0.39a	22.73±11.18a
16~20	5.96±0.45b	1.58±0.48ab	0.42±0.41a	28.90±7.98a

注:数据以平均值±标准差表示,数据后不同小写字母表示指标在不同年限间差异显著($P<0.05$)。

Note: Data are shown as means±SD. Different lowercase letters in the same column mean the difference significant at $P<0.05$ level.

因此,新民设施菜地土壤的Cd、Pb、As、Hg、Ni、Cr污染状况要较山西省轻,Cu、Zn的污染状况要较山西省严重^[25]。与山东寿光设施菜地相比,新民设施菜地土壤Cd、Cu、Zn、As、Ni、Cr平均含量低于山东寿光设施菜地表层土壤的重金属含量,Pb含量则高于山东寿光地区的含量^[26]。黄海沿岸设施菜地土壤的Cd、Pb、Cu和Zn平均含量高于新民地区,分别是新民设施菜地土壤平均含量的1.18、1.10、1.03倍和1.13倍,但新民设施菜地的As和Hg含量要高于黄海沿岸的设施菜地^[27]。

根据标准差和变异系数(表4)可知,新民设施菜地土壤中8种重金属的变异程度有较大的差别,其中Cd和Hg的变异系数较大分别为1.06和1.46,说明Cd和Hg的含量受人为因素影响程度大。设施菜地土壤Cd的积累问题可能与肥料施用有关。一方面,作为磷肥原料的磷矿石中常含有Pb、Cd和Hg等重金属元素,一般磷矿石中60%~80%的Cd存留在磷肥中^[28];另一方面,畜禽养殖废水和粪便是Cd的重要来源,因此畜禽粪肥施用可增加设施菜地土壤的Cd含量^[11,29]。土壤Hg污染可能与新民地区冬季温室燃煤取暖排放以及含Hg农药施用有关。新民设施菜地土壤Cu、Zn和As的变异程度属中等,变异系数分别为0.35、0.27和0.54;Pb、Ni、Cr的变异程度较低,变异系数分别为0.18、0.15和0.17。

与露天菜地和大田相比较,新民设施菜地土壤中Cd、Cu、Zn、As和Hg的平均含量高于露天菜地和大田对照,而Pb、Ni、Cr的平均含量低于露天菜地土壤。山东寿光设施菜地土壤中Cr含量要高于大田对照和露天菜地,这与新民地区的Cr含量分布特征即露天菜地>设施菜地>大田对照不同^[7];我国黄海沿岸设施菜地土壤中重金属Cu和Zn含量高于露天菜地,与新民地区规律相同^[27];山东寿光设施菜地土壤中Pb的含量低于露天菜地土壤^[9],Pb分布规律与新民地区相同,推测Pb主要来自交通排放源,通过大气沉降的方式进入土壤,而温室或大棚能隔离大部分大气Pb沉降,减轻其对设施菜地土壤的污染。

不同种植年限设施菜地土壤的重金属含量见表5,统计分析结果表明,重金属Pb、Cu、Zn、As、Hg和Ni在不同种植年限之间无显著差异($P>0.05$),重金属Cd与Cr随种植年限增加显示出明显的积累特征,6~10、11~15年和16~20年的土壤Cd和Cr含量均显著高于1~5年种植年限的设施菜地($P<0.05$)。

设施菜地的土壤重金属含量与种植年限的相关性分析表明,重金属Cd和Cr与种植年限之间具有极显著的正相关关系($P<0.01$)。对重金属的Cr、Cd含量与种植年限之间进行线性拟合,用 $Y=A+Bx$ 线性方程表示出重金属含量(Y)与设施菜地种植年限(X)之

表4 新民蔬菜基地土壤重金属含量的统计特征值

Table 4 The statistical characteristic value of soil heavy metal content

项目 Item	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Cr	As	Hg
设施菜地(FV)								
平均值 $M/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.17	18.05	24.21	83.53	18.52	50.34	3.38	0.24
标准差 $SD/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.18	3.31	8.45	22.82	2.82	8.70	1.82	0.35
变异系数 CV	1.06	0.18	0.35	0.27	0.15	0.17	0.54	1.46
露天菜地平均值 Open-air vegetable fields average/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	—	19.24	21.36	66.98	20.05	56.20	1.17	0.21
大田对照平均值 Field control average/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	—	18.43	16.52	66.73	16.30	44.31	2.03	0.14
新民土壤背景值(BV) ^[23] Xinmin soil background value/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.076	19.67	13.27	32.64	16.11	32.95	6.14	0.023
温室蔬菜产地环境质量评价标准 Evaluation criterion($\text{pH}<6.5$)(SV)/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.3	50	50	200	40	150	30	0.25
FV/BV	2.24	0.92	1.82	2.56	1.15	1.53	0.55	10.43
FV/SV	0.57	0.36	0.48	0.42	0.46	0.34	0.11	0.96

表5 不同年限设施菜地土壤重金属含量统计分析结果($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 5 The content of heavy metals in the soil of vegetable fields with different planting years($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

种植年限 Planting years/a	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Cr	As	Hg
1~5	0.07b	17.94a	23.80a	74.83a	18.24a	44.52b	3.16a	0.23a
6~10	0.26a	19.91a	27.18a	85.86a	19.09a	51.06ab	3.86a	0.34a
11~15	0.15ab	17.01a	22.54a	89.85a	18.45a	53.55a	3.50a	0.22a
16~20	0.27a	17.70a	24.10a	89.62a	18.59a	56.53a	3.13a	0.16a

注:表中数据为平均值,数据后不同小写字母表示指标在不同年限处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Data are shown as means. Different lowercase letters in the same column mean the difference significant at $P<0.05$ level.

间的关系,得到两者之间的线性关系分别为 $Y_{Cd}=0.020X+0.147$ ($R^2=0.155$) 和 $Y_{Cr}=0.646X+45.264$ ($R^2=0.314$),即 Cd 和 Cr 的年累积速率分别为 0.646 、 $0.020 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

2.3 设施菜地土壤重金属污染等级评价

利用单项污染指数和内梅罗综合污染指数对设施菜地土壤重金属污染等级进行评价^[30]。其中,单项污染指数计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式中: P_i 为单项污染指数, C_i 为重金属的测量结果,而 S_i 是《温室蔬菜产地环境质量评价标准》(HJ 333—2006) 中的重金属(取土壤 pH<6.5)限值。当 $P_i \leq 1$ 时,表示土壤未受污染; $P_i > 1$ 时,表示土壤受到了污染。

内梅罗综合污染指数计算方法为:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{P_i^2 + P_{\text{max}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中: $P_{\text{综}}$ 代表综合污染指数; P_i 代表单项污染指数的平均值; P_{max} 代表最大污染指数。根据评价标准,对新民设施菜地土壤的重金属含量进行分级评价。综合污染指数 $P_{\text{综}} \leq 0.7$ 时,为安全等级; $0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$ 时,为警戒限; $1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$ 时,为轻污染; $2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$ 时,为中污染; $P_{\text{综}} > 3.0$ 时,为重污染。

设施菜地各采样点土壤中重金属的单项污染指数计算结果表明, Cd、Cu 和 Hg 的单项污染指数中 $P_i > 1$ 的个数分别为 11、1 个和 10 个,最大值为 1.77、1.24 和 5.31。设施菜地样点单项污染指数的平均值计算结果如表 6 所示,单项污染指数从大到小的顺序分别为 $\text{Hg} > \text{Cd} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{As}$, 其中, Hg 的单项污染指数最大为 1.02, 已经达到了污染水平, Cd 的单项污染指数平均值为 0.56, 处于尚清洁状态, 其余 6 种重金属的单项污染指数平均值均小于 0.50, 处于尚清洁状态。

设施菜地、露天菜地和大田对照土壤的重金属单项污染指数如表 6。研究表明, 4 组年限的 Pb、Cu、Zn、Ni、As、Hg 含量没有显著差异, 1~5 年组的 Cd 单项污染指数与 6~10、16~20 年组的指数具有显著差异性, 1~5 年组的 Cr 单项污染指数与 11~15、16~20 年组的指数具有显著差异性。

不同种植年限的设施菜地土壤重金属中, Cd、Cu、Zn 和 As 的单项污染指数均大于露天菜地和大田对照; Cu 污染指数分别超过露天菜地和大田对照污染指数的 4.65%~25.6% 和 36.36%~63.64%; Zn 污染指数超过露天菜地和大田对照污染指数 12.12%~36.36%; As 污染指数超过了露天菜地污染指数 233.33%~333.33%, 超出大田对照 100%~160%。

Pb 单项污染指数, 其露天菜地与大田对照具有显著性差异, 设施菜地种植年限为 6~10 年的 Pb 单项污染指数高出露天菜地 5.26%, 其余 3 组年限范围的 Pb 污染指数均低于露天菜地, 4 组年限的 Pb 污染指数高出大田对照 47.83%~73.91%; Ni 的单项污染指数较露天菜地低 4.00%~8.00%; 设施菜地的 Cr 单项污染指数中, 仅有 16~20 年的高于露天菜地, 高出 2.70%; 4 组年限的 Cr 污染指数超出大田对照 0.00%~26.77%; Hg 的单项污染指数超出大田对照 91.66%~183.33%, 1~5 和 6~10 年设施菜地土壤中 Hg 的单项污染指数均值分别为 0.92 和 1.36, 超出露天菜地 8.23% 和 60%, 说明其土壤 Hg 含量已经超出标准。

对新民设施菜地土壤进行的综合污染指数分析发现, 处于安全等级的样点 ($P_{\text{综}} \leq 0.7$) 有 19 个, 占样点数的 46.3%; 达到警戒限 ($P_{\text{综}} \leq 1.0$) 的样点有 9 个, 占 22.0%; 处于轻污染等级 ($P_{\text{综}} \leq 2.0$) 的样点为 11 个, 占 26.8%; 中度 ($P_{\text{综}} \leq 3.0$) 与重度污染 ($P_{\text{综}} > 3.0$) 的样点各 1 个, 均占 2.4%。不同种植年限设施菜地土壤综合污染指数及其平均值结果如图 2, 6~10 年样点的综合污

表 6 重金属单项污染指数

Table 6 The single pollution index of heavy metals

种植年限 Planting years/a		Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Cr	As	Hg
设施菜地	1~5	0.23b	0.36a	0.48a	0.37a	0.46a	0.30b	0.11a	0.92a
Greenhouse vegetable fields	6~10	0.87a	0.40a	0.54a	0.43a	0.48a	0.34ab	0.13a	1.36a
	11~15	0.50ab	0.34a	0.45a	0.45a	0.46a	0.36a	0.12a	0.88a
	16~20	0.90a	0.35a	0.48a	0.45a	0.46a	0.38a	0.10a	0.64a
	Mean	0.63	0.36	0.49	0.43	0.47	0.35	0.12	0.95
露天菜地 Open-air vegetable fields		—	0.38	0.43	0.33	0.50	0.37	0.03	0.85
大田对照 Field control		—	0.23	0.33	0.33	0.41	0.30	0.05	0.48

注: 表中数据为平均值, 数据后不同小写字母表示指标在不同年限处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Data are shown as means. Different lowercase letters in the same column mean the difference significant at $P < 0.05$ level.

染指数平均值最高,为1.03;16~20年样点其次,均值为0.94;1~5年均值0.91;11~15年样点的综合污染指数最低,为0.62;各样点的综合污染指数平均值为0.87,新民设施菜地一些样点的重金属污染问题已达到了轻污染等级,应引起重视。

2.4 重金属含量与土壤基本理化性质相关性

将设施菜地土壤中的重金属含量与土壤有机质含量进行相关性分析,发现重金属Cd、Cu、Zn和Cr与

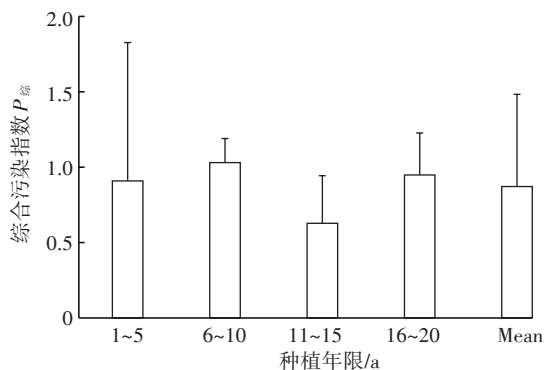


图2 设施菜地土壤的综合污染指数

Figure 2 The comprehensive pollution index of facility vegetable soils

土壤有机质含量之间存在显著的正相关关系,同时,可以用 $Y=A+Bx$ (x 表示土壤中有机质的含量,%; Y 表示重金属元素的含量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的形式表示重金属含量与土壤有机质含量之间的关系,如图3。Zn和Cd与有机质的相关性达到了极显著水平($P<0.01$),Cu和Cr与有机质的相关性达显著水平($P<0.05$)。张慧智等^[31]在对北京市通州区设施蔬菜地土壤重金属积累特征分析时也发现,土壤中Cu、Zn、Cr和Cd与土壤的有机质含量呈明显的正相关关系。研究发现,土壤有机质中的含氧官能团,易和重金属发生络合或螯合反应,土壤中有机质含量的增加会使土壤吸附重金属的能力增加^[32]。

从土壤重金属含量与总氮含量的相关性分析来看(表7),重金属Cu、Zn、Cr与土壤TN之间存在极显著的正相关关系($P<0.05$),说明这几种重金属与菜地土壤肥料施用有关。新民设施菜地土壤的肥料采用化学肥料和有机肥联合施用,氮肥能够通过影响土壤的pH值来影响土壤中重金属的形态,进而影响土壤对重金属的吸附和解吸作用^[33]。为了降低禽畜的发病率,饲料中会添加As、Cr、Cu和Zn等微量元素^[34-36],刘荣乐等^[37]对我国14个省(市)的有机肥中重金属含

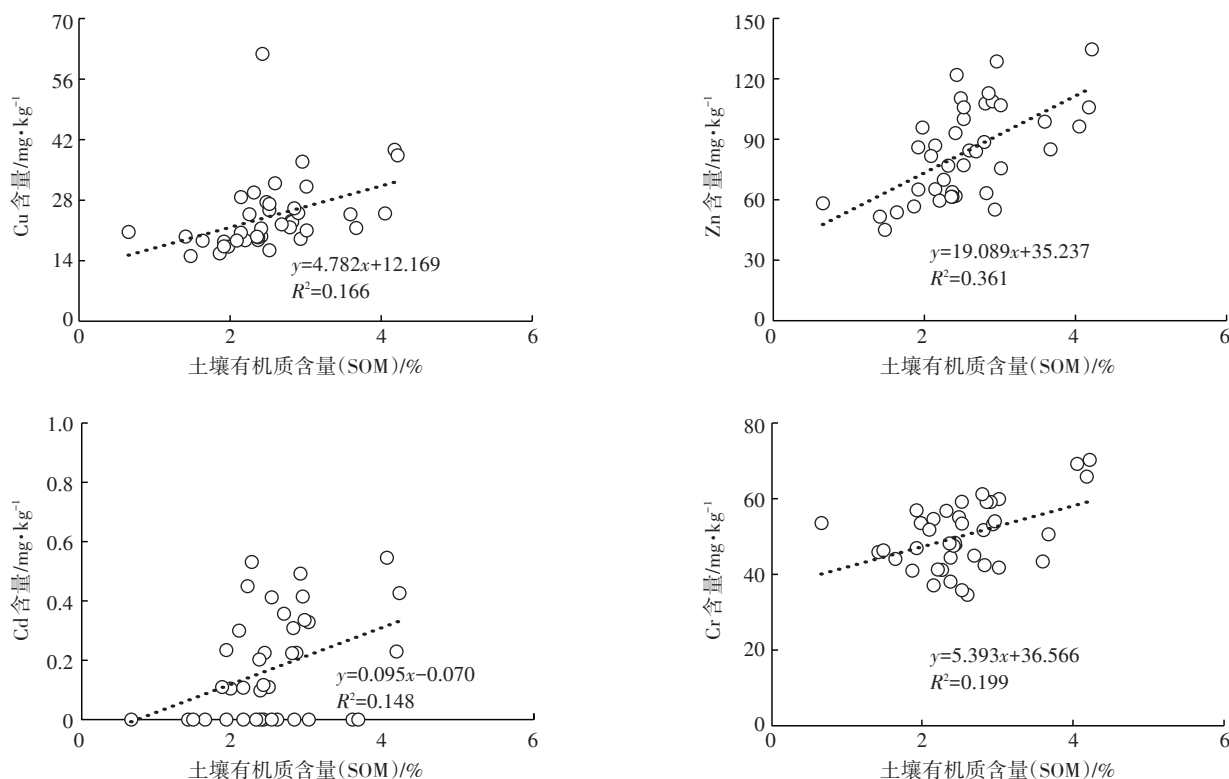


图3 土壤有机质含量与重金属(Cu、Zn、Cd和Cr)含量的线性关系

Figure 3 The linear relationship between the soil organic matter content and heavy metal content

量进行测定,发现鸡粪中Cr含量、猪粪中Cu、Zn、Cd和As含量、牛粪中的Cd含量要高于其他有机废弃物中的含量,且对有机废弃物中重金属含量测定发现,与20世纪90年代比较,鸡粪和猪粪中的Cu、Zn、Cr、Cd、As和Hg含量有所增加。本研究中的有机肥主要施用的是牛粪和鸡粪,这些有机肥和化学肥料中含有一定量的重金属元素,因此,经过多年的连续施用,导致重金属的不断积累。

土壤重金属含量与土壤总磷含量的相关性分析发现(表7),土壤重金属含量与土壤总含磷量之间并无显著相关性($P>0.05$),说明磷肥的施用并不是新民设施菜地土壤重金属污染的主要来源。因此,新民设施菜地的Cd污染来源于畜禽粪便。

2.5 土壤中各种重金属元素间的相关性

对设施菜地土壤中8种重金属含量进行了相关性分析(表8)。结果发现,Cu-Zn、Cr-Zn和Cd-Zn间具有正相关关系,Cu-Zn的相关系数最大, r 为0.629($P<0.01$),Cr-Zn的相关系数 $r=0.441$ ($P<0.01$),Cd-Zn的相关系数 $r=0.404$ ($P<0.01$)。重金属Pb-Ni、Cr-Ni也存在着极显著的正相关关系($P<0.01$),相关系数分别为0.407和0.441。Cd-Cr具有正相关关系($r=0.351$, $P<0.05$)。具有显著相关性的几种重金属在来源上可能具有一定的相似性,这些重金属在土壤中会发生同步积累。

3 结论

(1)新民设施菜地土壤呈微酸性至酸性,设施菜地土壤的有机质(SOM)含量显著高于露天菜地和大田土壤。新民设施菜地种植年限与土壤pH、SOM含量、TN含量和TP含量无显著相关关系。

(2)设施菜地土壤8种重金属单项污染指数从大到小的顺序为 $Hg>Cd>Cu>Ni>Zn>Pb>Cr>As$,其中,Hg的单项污染指数为1.02,已经达到了污染水平,其余均处于尚清洁的状态。综合污染指数评价表明新民设施菜地土壤处于安全等级样点占46.3%,处于警戒等级样点占22.0%,污染点位占31.7%,重金属污染问题应引起重视。

(3)设施菜地土壤中重金属Cd、Cu、Zn和Cr与土壤有机质含量显著正相关,Cu、Zn和Cr与土壤TN显著正相关,推断有机肥和化肥施用是重金属的主要来源。设施菜地土壤的Cd和Cr含量与种植年限之间具有极显著正相关关系。

(4)重金属Cu与Zn、Cr与Zn、Cd与Zn、Pb与Ni、Cr与Ni、Cd与Cr之间具有相关关系,具相关关系的重金属可能具有相同来源。

参考文献:

- [1] Chen Y, Hu W, Huang B, et al. Accumulation and health risk of heavy metals in vegetables from harmless and organic vegetable production

表7 土壤重金属含量与土壤理化性质的相关性分析

Table 7 The correlation of soil heavy metal content with the soil physicochemical properties

指标 Index	Cu	Zn	Pb	Cd	Ni	Cr	As	Hg
SOM	0.388*	0.542**	0.007	0.405**	-0.166	0.356*	-0.123	0.111
TN	0.341*	0.642**	-0.082	0.274	-0.240	0.478**	-0.068	0.070
TP	-0.002	-0.146	-0.092	-0.134	0.013	-0.112	-0.012	-0.072
种植年限 Planting years	0.031	0.282	-0.090	0.371*	0.052	0.466**	0.019	-0.116

表8 设施菜地各重金属元素间的相关性分析

Table 8 Correlation analysis between elements of facility vegetable heavy metals

	Cu	Zn	Pb	Cd	Ni	Cr	As
Zn	0.629**						
Pb	0.014	0.035					
Cd	0.238	0.404**	0.264				
Ni	0.064	-0.067	0.407**	0.044			
Cr	0.225	0.441**	0.238	0.351*	0.441**		
As	-0.053	0.027	0.267	-0.082	0.223	-0.002	
Hg	0.139	0.081	0.134	-0.111	-0.019	-0.035	-0.170

- systems of China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, 98:324-330.
- [2] Vymazal J. Concentration is not enough to evaluate accumulation of heavy metals and nutrients in plants[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 544:495-498.
- [3] Sharma A, Katnoria J K, Nagpal A K. Heavy metals in vegetables: Screening health risks involved in cultivation along wastewater drain and irrigating with wastewater[J]. *Springerplus*, 2016, 5(1):488.
- [4] 黄宝同, 徐永刚, 宇万太, 等. 不同轮作模式下设施菜地土壤和蔬菜中汞镉铬铅的分布特征[J]. 中国科学院研究生院学报, 2012, 29(2):212-219.
- HUANG Bao-tong, XU Yong-gang, YU Wan-tai, et al. Distribution characteristics of As, Hg, Cd, Cr, and Pb in soil and vegetable in protected vegetable field under different rotation modes[J]. *Journal of Graduate University of Chinese Academy of Sciences*, 2012, 29(2):212-219.
- [5] Zhang H, Huang B, Dong L, et al. Accumulation, sources and health risks of trace metals in elevated geochemical background soils used for greenhouse vegetable production in southwestern China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 137:233-239.
- [6] 井永苹, 李彦, 薄录吉, 等. 不同种植年限设施菜地土壤养分、重金属含量变化及主导污染因子解析[J]. 山东农业科学, 2016, 48(4):66-71.
- JING Yong-ping, LI Yan, BO Lu-ji, et al. Variation of soil nutrient and heavy metal accumulation in greenhouse soil with cultivation years and analysis on main pollution factors[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2016, 48(4):66-71.
- [7] 李树辉, 李莲芳, 曾希柏, 等. 山东寿光不同农业利用方式下土壤铬的累积特征[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(8):1539-1545.
- LI Shu-hui, LI Lian-fang, ZENG Xi-bai, et al. Characteristics of chromium accumulation in soils under different agricultural utilization pattern in Shouguang of Shandong Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(8):1539-1545.
- [8] 赵国华, 潘先庭, 沈赟芸, 等. 不同有机物料施用年限对设施菜地土壤养分和重金属含量的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2015, 35(5):509-513.
- ZHAO Guo-hua, PAN Xian-ting, SHEN Yun-yun, et al. Effect of different organic materials application years on soil nutrient and heavy metal content of vegetable soil[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition)*, 2015, 35(5):509-513.
- [9] 李莲芳, 曾希柏, 白玲玉, 等. 山东寿光不同农业利用方式下土壤铅的累积特征[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10):1960-1965.
- LI Lian-fang, ZENG Xi-bai, BAI Ling-yu, et al. Characteristics of lead accumulation in soils under different agricultural utilization pattern in Shouguang of Shandong Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(10):1960-1965.
- [10] 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.
- [11] 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-bai, 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.
- [12] Cao C, Chen X P, Ma Z B, et al. Greenhouse cultivation mitigates metal-ingestion-associated health risks from vegetables in wastewater-irrigated agroecosystems[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 560-561:204-211.
- [13] 李玉双, 陈琳, 郭倩, 等. 沈阳市新民设施农业土壤中邻苯二甲酸酯的污染特征[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(6):1118-1123.
- LI Yu-shuang, CHEN Lin, GUO Qian, et al. Pollution characteristics of phthalate esters in greenhouse agricultural soil in Xinmin, Shenyang City[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(6):1118-1123.
- [14] 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, 2000:12-533.
- LU Ru-kun. Methods of soil and agro-chemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000:12-533.
- [15] Liu L, Lu J, Zhang Z, et al. Heavy metals contamination in greenhouse soils and vegetables in Guanzhong, China[J]. *Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences*, 2014, 4(3):80-88.
- [16] Zhou H, Yang W T, Zhou X, et al. Accumulation of heavy metals in vegetable species planted in contaminated soils and the health risk assessment[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, 13(3):289-300.
- [17] 肖辉, 潘洁, 程文娟, 等. 不同有机肥对设施土壤全盐累积与pH值变化的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(2):248-252.
- XIAO Hui, PAN Jie, CHENG Wen-juan, et al. Effect of organic fertilizer on soil salt accumulation and pH changes in greenhouse[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(2):248-252.
- [18] 曾希柏. 红壤酸化及其防治[J]. 土壤通报, 2000, 31(3):111-113, 145.
- ZENG Xi-bai. Acidification of red soils and control methods[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2000, 31(3):111-113, 145.
- [19] Nguyen V. Alleviating soil acidity with crop residues[J]. *Soil Science*, 2011, 176(10):543-549.
- [20] 李志安, 邹碧, 丁永祯, 等. 植物残茬对土壤酸度的影响及其作用机理[J]. 生态学报, 2005, 25(9):2382-2388.
- LI Zhi-an, ZOU Bi, DING Yong-zhen, et al. Effect of plant residues on soil acidity and its mechanisms[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9):2382-2388.
- [21] Ge T, Nie S, Wu J, et al. Chemical properties, microbial biomass, and activity differ between soils of organic and conventional horticultural systems under greenhouse and open field management: A case study[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11(1):25-36.
- [22] 高新昊, 张英鹏, 刘兆辉, 等. 种植年限对寿光设施大棚土壤生态环境的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(5):1452-1459.

- GAO Xin-hao, ZHANG Ying-peng, LIU Zhao-hui, et al. Effects of cultivating years on soil ecological environment in greenhouse of Shouguang City, Shandong Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(5): 1452-1459.
- [23] 吴燕玉. 沈阳市土壤环境背景值[J]. 环境保护科学, 1986(4): 24-28.
- WU Yan-yu. Soil environmental background value of Shenyang City[J]. *Environmental Protection Science*, 1986(4): 24-28.
- [24] 史崇文, 赵玲芝, 郭新波, 等. 山西省土壤元素背景值的分布规律及其影响因素[J]. 农业环境保护, 1996(1): 24-28.
- SHI Chong-wen, ZHAO Ling-zhi, GUO Xin-bo, et al. Distribution of soil element background value and its influencing factors in Shanxi Province[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1996(1): 24-28.
- [25] Fan Y, Li H, Xue Z, 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.
- [26] 李树辉. 北方设施菜地重金属的累积特征及防控对策研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- LI Shu-hui. Characteristics of heavy metal accumulation and regulation strategies in soils of protected vegetables cultivation in the North China[D]. Beijing: Chinese Academy Agricultural Science, 2011.
- [27] Hu W Y, Huang B, Tian K, et al. Heavy metals in intensive greenhouse vegetable production systems along Yellow Sea of China: Level, transfer and health risk[J]. *Chemosphere*, 2017, 167: 82-90.
- [28] 高阳俊, 张乃明. 施用磷肥对环境的影响探讨[J]. 中国农学通报, 2003, 19(6): 162-165.
- GAO Yang-jun, ZHANG Nai-ming. Studying on the influence of phosphorus fertilizer on environment[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2003, 19(6): 162-165.
- [29] 李本银, 黄绍敏, 张玉亭, 等. 长期施用有机肥对土壤和糙米铜、锌、铁、锰和镉积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 129-135.
- LI Ben-yin, HUANG Shao-min, ZHANG Yu-ting, et al. Effect of long-term application of organic fertilizer on Cu, Zn, Fe, Mn and Cd in soil and brown rice[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(1): 129-135.
- [30] Cheng J, Shi Z, Zhu Y, et al. Assessment and mapping of environmental quality in agricultural soils of Zhejiang Province, China[J]. *Journal of Environmental Sciences-China*, 2007, 19(1): 50-54.
- [31] 张慧智, 李红. 通州区设施菜地土壤重金属积累特征研究[J]. 天津农林科技, 2015(增刊1): 4-6, 56.
- ZHANG Hui-zhi, LI Hong. Study on the accumulation characteristics of heavy metals in soil in vegetable land of Tongzhou District[J]. *Science and Technology of Tianjin Agriculture and Forestry*, 2015(Suppl 1): 4-6, 56.
- [32] Zhang R H, Li Z G, Liu X D, et al. Immobilization and bioavailability of heavy metals in greenhouse soils amended with rice straw-derived biochar[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 98(98): 183-188.
- [33] 梁旭晖. 氮对土壤-植物系统中重金属的影响研究[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2011, 29(3): 44-48.
- LIANG Xu-hui. Effect of nitrogen on behavior of heavy metals in soil-plant system[J]. *Journal of Foshan University (Natural Science Edition)*, 2011, 29(3): 44-48.
- [34] 骆先虎, 吴晋强. 锰、锌、铜对肉用仔鸡营养效应的研究[J]. 安徽农业大学学报, 1997, 24(1): 64-69.
- LU Xian-hu, WU Jin-qiang. Study on nutritional effects of Mn, Zn and Cu on broiler[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 1997, 24(1): 64-69.
- [35] 刘定发, 王治平, 曹迎春. 铬用作饲料添加剂的开发与应用[J]. 饲料工业, 1999, 20(7): 16-17.
- LIU Ding-fa, WANG Zhi-ping, CAO Ying-chun. Development and application of chromium as feed additive[J]. *Feed Industry*, 1999, 20(7): 16-17.
- [36] 陈继兰, 赵玲, 侯永生, 等. 砷制剂对肉仔鸡的促生长效果试验[J]. 中国饲料, 1994(9): 23-24.
- CHEN Ji-lan, ZHAO Ling, HOU Yong-sheng, et al. Effect of arsenic preparation on growth promotion of broilers[J]. *China Feed*, 1994(9): 23-24.
- [37] 刘荣乐, 李书田, 王秀斌, 等. 我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 392-397.
- LIU Rong-le, LI Shu-tian, WANG Xiu-bin, et al. Contents of heavy metal in commercial organic fertilizers and organic wastes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2): 392-397.