

不同栽培方式菜田耕层土壤重金属状况

黄绍文, 唐继伟*, 李春花*

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业部植物营养与肥料重点实验室, 北京 100081)

摘要:【目的】评价不同栽培方式(温室、大棚和露地)菜田土壤重金属状况,为菜田土壤质量改善和蔬菜高效安全施肥提供一定的理论依据。【方法】针对我国北方3个区域(东北、黄淮海、西北地区)和南方4个区域(华中、西南、华东、华南地区)主要蔬菜种植区不同栽培方式的典型菜田耕层土壤展开调查,选择的主要菜区不同栽培方式的菜田均为远离城郊的未受到工业“三废”、汽车尾气等污染的农村菜田,取样时间是2013年作物收获后或蔬菜施肥前或生长后期,共采集503个土壤样品,对温室、大棚和露地三种栽培方式下土壤重金属状况进行了研究。【结果】1) 采样区设施(温室和大棚)菜田土壤重金属Cu、Zn和Cd总量总体上均高于露地菜田土壤,较露地菜田土壤平均分别高12.2%、21.7%和30.4%。2) 随着种菜年限的增加,菜田土壤重金属Cu、Zn和Cd总量呈显著增加的趋势。不同栽培方式菜田土壤中均可能存在几种重金属同时污染的复合污染现象,土壤Cu、Zn、Cd等之间的相关性均达到极显著水平。3) 采样区不同栽培方式菜田土壤Cd的二级超标率在19.2%~22.3%之间,温室、大棚和露地菜田土壤Cd的单项污染指数平均分别为0.97、0.98和0.70;土壤Cu、Zn、Pb、Cr、As和Hg的二级超标率在0~14.6%之间,单项污染指数在0.06~0.52之间。【结论】设施菜田N、P₂O₅和K₂O总量及有机肥用量均显著高于露地菜田,可能是造成设施菜田土壤中重金属Cu、Zn和Cd积累显著高于露地菜田的重要原因。采样区设施(温室和大棚)菜田土壤Cd总体上处于污染警戒级状态,露地菜田土壤总体上未受到Cd的污染;设施和露地菜田土壤Cu、Zn、Pb、Cr、As和Hg总体上均未构成对土壤的污染。

关键词: 菜田土壤;栽培方式;重金属;污染指数

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2016)03-0707-12

Status of heavy metals in vegetable soils under different patterns of land use

HUANG Shao-wen, TANG Ji-wei*, LI Chun-hua*

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract: 【Objectives】 A national vegetable soil survey on total heavy metal concentrations under three patterns of land use (greenhouses with wall or without wall, open field) was evaluated to provide a scientific basis for vegetable soil quality improvement, and high-efficiency and safe fertilizer recommendation. 【Methods】 More than five hundreds of representative soil samples at depth of 0-20 cm were collected from the main vegetable production regions in China (Northeastern, Huanghuaihai, Northwestern, Southwestern, Central China, East China, and South China) located in rural areas away from suburbs of their cities, and not affected by the waste air, water and residue from industry and the tail gases emitted by automobiles etc. The sampling periods comprised after harvest, prior to fertilization, or at late stage of growth in 2013, and the total heavy metal concentrations under the three patterns of land use were investigated in this study. 【Results】 1) The total Cu, Zn and Cd concentrations in the vegetable soils inside the greenhouses (with wall and without wall) are significantly higher than those in open vegetable soils, with average increases of 12.2%, 21.7% and 30.4%, respectively. 2) The total Cu, Zn and Cd concentrations in the vegetable soils are significantly increased with the elongation of vegetable production history.

收稿日期: 2014-04-30 接受日期: 2015-03-23 网络出版日期: 2015-07-21

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-25-C-11); 公益性行业(农业)科研专项(201203095)资助。

作者简介: 黄绍文(1964—),男,湖南桃源人,研究员,博士,博士生导师,主要从事蔬菜营养与高效安全施肥研究。

Tel: 010-82108662, E-mail: huangshaowen@caas.cn

* 通信作者 Tel: 010-82108662, E-mail: tang_jiwei@163.com; Tel: 010-82108653, E-mail: lichunhua@caas.cn

Co-contamination of several heavy metals often might occur synchronously in the vegetable soils under different land use patterns. Significant correlation relationships exist between soil heavy metals (Cu, Zn, Cd, etc.). 3) The total Cd concentrations in 19.2% – 22.3% of soil samples under different land use patterns are beyond the 2nd criterion according to the Soil Environmental Quality Standard for Vegetable Fields (GB15618–2008), and Cd pollution indices of the vegetable soils for greenhouse with wall, the vegetable soils for greenhouse without wall, and the open vegetable soils are 0.97, 0.98 and 0.70 respectively. In 0–14.6% of soil samples, the total Cu, Zn, Pb, Cr, As and Hg concentrations are beyond the 2nd criterion according to the Soil Environmental Quality Standard for Vegetable Fields, and the single-factor pollution indices of soil heavy metals are in the range from 0.06 to 0.52. **【Conclusions】** There are significant higher accumulations of soil Cu, Zn and Cd for the greenhouse vegetable field compared with the open vegetable field in this study, which is probably caused by the corresponding higher application rates of chemical fertilizers and organic manures, especially organic manures. The vegetable soils for greenhouses with wall and greenhouses without wall in sampling areas are at the warning level of Cd pollution, and the soils from the open vegetable fields are not generally contaminated with Cd. All the vegetable soils from different land use patterns are not in danger of contamination of Cu, Zn, Pb, Cr, As and Hg.

Key words: vegetable soil; land use pattern; heavy metals; pollution index

我国是世界上最大的蔬菜生产国,播种面积和产量均占世界的四成多。2014 年我国蔬菜播种面积约为 2127 万公顷,总产量约 7.58 亿吨(国家大宗蔬菜产业技术体系经济室测算,内部资料),播种面积仅约占农作物总播种面积的 1/8,但产值占种植业总产值的 30% 以上^[1]。近些年我国设施蔬菜(温室和大棚)发展迅速,1980 年设施蔬菜不足 0.7 万公顷,目前已达到 366.7 万公顷,产值占蔬菜总产值的 50% 以上。设施蔬菜已成为许多地区的支柱产业,极大增加了农民收入,取得了良好的社会和经济效益。由于设施蔬菜栽培土壤缺少雨水淋洗,且温度、湿度、通气状况、肥水管理等均与露地栽培有较大差别,加之设施栽培又长期处于高度集约化、高复种指数、高肥料施用量的生产状况,其特殊的生态环境与不合理的肥水管理措施常导致土壤的次生盐渍化、酸化、养分比例失调、土壤重金属污染等问题^[2-3]。

环境污染方面所指的重金属主要是指生物毒性显著的汞(Hg)、镉(Cd)、铅(Pb)、铬(Cr)以及类金属砷(As),还包括具有毒性的锌(Zn)、铜(Cu)、钴(Co)、镍(Ni)、锡(Sn)、钒(V)等污染物。土壤重金属污染可导致作物产量和质量的下降,作物积累的重金属可通过食物链进入人体而给人类健康带来高毒危害性,如 Cd 污染可造成贫血、高血压、骨痛病等疾病。土壤重金属污染形成的直接形式可以归纳为大气沉降、农业投入品携带(化肥、畜禽粪便、农药等)、污水灌溉等几类。设施菜田土壤一般不存在大气沉降和污水灌溉这两种形式,而以农业投

入品携带为主。由于设施蔬菜生产对农药使用的限制越来越严格,土壤中重金属主要来源于施用的化肥和畜禽粪便有机肥。由于原料、矿石本身所含的杂质以及生产工艺流程的污染,磷肥或其它化学肥料中含有一定量的重金属 Cd、Zn 等^[4-5],化肥尤其是磷肥长期过量施入土壤后,可发生一定程度 Cd、Zn 等积累。我国农民在蔬菜尤其是设施蔬菜生产中大量使用鸡粪、猪粪等畜禽粪便,而畜禽粪便中 Cu、Zn、Cd 等重金属含量较高^[6]。在动物饲料中添加的 Cu、Zn 等对畜禽生长发育、生殖等有重要作用,Cd 与 Zn 伴生,而畜禽对重金属元素利用率低,绝大部分随畜禽粪便排出体外,如长期大量使用畜禽粪便,会显著增加土壤中 Zn、Cu、Cd 等重金属含量^[7-8]。

蔬菜对重金属有较强的富集能力,其施肥量一般远高于粮食作物,因此,与粮食作物相比,长期过量施肥(尤其是磷肥和有机肥)造成蔬菜尤其是设施蔬菜遭受重金属污染的潜在威胁更为突出。目前国内外对城市郊区、污水灌溉区、交通繁忙区、受工矿活动影响区的菜田土壤重金属积累乃至超标问题进行了大量研究^[9-14]。一些研究表明,我国一些城市和城郊菜区蔬菜中 Cd、Hg、Cr、As、Pb 等中一种或几种重金属元素含量超标,局部地区污染严重;不同城市和城郊菜区蔬菜重金属污染的程度、重金属种类及成因有所不同^[15-16]。我国有关设施菜田土壤这类相对封闭的农业生态系统中重金属积累方面也有许多报道。李瑞琴等^[17]研究指出,武威市凉州区设施菜田土壤 As 和 Hg 呈现明显累积,分别高出露

地农田土壤 3.1 和 8.7 倍。一些研究显示,设施菜田土壤中 Cu、Zn、Cd 等含量均随种植年限的增加出现了明显的积累,以 Cd 污染较为突出^[18-21]。刘苹等^[22]研究表明,寿光市设施菜田土壤存在重金属积累的现象;按照温室蔬菜土壤重金属含量评价标准,土壤 Cd 的样本超标率为 15.4%。设施菜田是继工矿/污灌菜田之后重金属积累较为严重的菜田栽培方式类型^[23],土壤重金属积累已成为制约设施蔬菜高效安全生产的一个重要障碍因子。

了解菜田土壤重金属状况是蔬菜安全高效施肥的基础。然而,目前有关全国农村不同栽培方式菜田土壤重金属状况方面较为系统的研究鲜见报道。为此,2013 年国家大宗蔬菜产业技术体系开展了全国菜田土壤重金属状况的普查工作,为全国菜田土壤质量改善和蔬菜安全高效施肥提供一定的理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 土壤样品采集

调查范围包括北方 3 个区域(东北、黄淮海和

西北地区)和南方 4 个区域(华中、西南、华东和华南地区)。调查对象为温室(有后墙)、大棚(无后墙)和露地菜田 3 种栽培方式。选择的主要菜区不同栽培方式菜田均为远离城郊的未受到工业“三废”、汽车尾气等污染的农村菜田。土壤样品由国家大宗蔬菜产业技术体系 34 个综合试验站负责采取,从每个示范基地县选择代表性栽培方式和栽培制度下 3~4 个典型菜田作为取样地块(每个综合试验站 3~5 个示范基地县,1 个地块采集 1 个混合样),每个试验站采集 15 个左右耕层土壤样品。取样时间是作物收获后、蔬菜施肥前或生长后期。取样方法是在地块内按“S”形布点或“梅花形”布点(要避开路边、田埂、沟边、肥堆等特殊部位),用不锈钢、木质或塑料工具采取耕层 0—20 cm 土壤样品。从全国主要菜区共采取 503 个耕层土壤样品,其中温室、大棚和露地菜田土壤样品数分别为 112、157 和 234 个;不同栽培方式下各区域土壤样品数目见表 1。

表 1 不同菜区土壤样品数目

Table 1 Number of soil samples for different vegetable production regions surveyed

| 栽培方式 Land use pattern | 东北 North -eastern | 黄淮海 Huanghuaihai | 西北 North -western | 华中 Central China | 西南 South -western | 华东 East China | 华南 South China |
|----------------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------|----------------------|
| 温室 Greenhouse with wall | 23 | 64 | 14 | 0 | 3 | 8 | 0 |
| 大棚 Greenhouse without wall | 20 | 38 | 4 | 22 | 9 | 60 | 4 |
| 露地 Open field | 20 | 37 | 22 | 43 | 25 | 40 | 47 |
| 总计 Total | 63 | 139 | 40 | 65 | 37 | 108 | 51 |

1.2 肥料使用情况调查

收集上述所有取样区域的种菜历史,2011~2013 年蔬菜种类、栽培制度、化肥和有机肥投入等资料。

1.3 土壤样品分析

土壤样品经风干、磨碎、过筛(0.149 mm),用于土壤重金属含量测定。

土壤 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 总量测定 土样经王水-高氯酸法消煮^[24]后,土壤 Cu、Zn、Pb、Cr 在原子吸收分光光度计上采用火焰原子光谱法测定,土壤 Cd 用 ICP-MS 法测定。

土壤 As 和 Hg 总量测定 土样经 1+1 王水(王水:水=1:1)法消煮^[25]后,土壤 As 和 Hg 均在双道原子荧光光度计上测定。

分析过程中加入国家标准土壤样品(GBW08301 河流沉积物、GBW08302 西藏土壤和 GBW07430 珠江三角洲土壤)和空白对照进行质量控制,所用水为超纯水,试剂采用优级纯。

1.4 土壤重金属状况评价标准

土壤重金属状况评价采用 GB15618-2008 土壤环境质量标准,该标准把土壤环境质量分为 3 个等级。其中二级标准是保障农业生产,维护人体健康的土壤临界值。超出了二级标准就意味着已经对农业生产和人类健康构成潜在威胁。本文选取二级标准对菜田土壤重金属污染状况进行评价,具体指标见表 2。土壤重金属二级超标率(%)指所取样本中重金属含量超过 GB 15618-2008 中规定的二级标准值的样本的百分数。

表 2 GB15618-2008 土壤环境质量标准(修订)菜地
第二级标准值(mg/kg, 风干土重)

Table 2 The 2nd criterion of soil environmental quality
standard for vegetable fields (GB15618-2008,
weight of air-dried soil)

| 项目 Item | pH≤5.5 | 5.5 < pH ≤ 6.5 | 6.5 < pH ≤ 7.5 | pH > 7.5 |
|---------|--------|----------------|----------------|----------|
| Cu | 50 | 50 | 100 | 100 |
| Zn | 150 | 200 | 250 | 300 |
| Cd | 0.25 | 0.30 | 0.40 | 0.60 |
| Pb | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Cr | 120 | 150 | 200 | 250 |
| As | 35 | 30 | 25 | 20 |
| Hg | 0.20 | 0.30 | 0.40 | 0.80 |

1.5 土壤重金属污染评价方法

重金属污染既可能是单一因素作用的结果,也可能是多元素共同作用的结果。土壤重金属污染评价方法采用单项污染指数法和综合污染指数法。

1.5.1 单项污染指数法 单项污染指数定义为:

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

式中, P_i 为土壤重金属元素 i 的污染指数, C_i 为土

壤重金属元素 i 的实测浓度, S_i 为土壤重金属元素 i 的限量标准值(表 1 中的二级标准);当 $P_i \leq 1$ 时,表示土壤未受污染; $P_i > 1$ 时,表示土壤受到污染,且 P_i 越大则污染越严重^[26-27]。土壤重金属单项污染评价分级标准见表 3。

1.5.2 综合污染指数法 为全面反映各重金属对土壤的作用,并突出高浓度重金属元素对环境质量的影响,采用内梅罗综合污染指数法对土壤重金属污染进行综合评价,其定义为:

$$P_{\text{综合}} = \sqrt{\frac{(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i)^2 + (P_i)_{\text{max}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中, $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$ 为土壤各单项污染指数之和的平均值, $(P_i)_{\text{max}}$ 为土壤各单项污染指数中的最大值^[27-28]。土壤重金属综合污染评价的具体标准同土壤重金属单项污染评价分级标准(表 3)。

1.6 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 16.0 统计软件进行数据分析。

表 3 土壤重金属单项污染评价分级标准

Table 3 Evaluation class of single heavy metal pollution in soil

| 污染指数(P_i) Pollution index | 污染等级 Pollution class | 污染水平 Pollution level |
|----------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------|
| $P_i \leq 0.7$ | 安全 Safety class | 清洁 Clean |
| $0.7 < P_i \leq 1$ | 警戒级 Warning class | 尚清洁 Still clean |
| $1 < P_i \leq 2$ | 轻污染 Slightly polluted class | 土壤轻污染,作物开始受污染 Soil and crop slightly contaminated |
| $2 < P_i \leq 3$ | 中污染 Moderately polluted class | 土壤、作物均受中度污染 Soil and crop moderately contaminated |
| $P_i > 3$ | 重污染 Heavily polluted class | 土壤、作物已严重受污染 Soil and crop heavily contaminated |

2 结果与分析

2.1 不同栽培方式菜田土壤重金属含量

表 4 和表 5 表明,采样区设施(温室和大棚)菜田土壤重金属 Cu、Zn 和 Cd 总量总体上均高于露地菜田土壤,较露地菜田土壤平均分别高 12.2%、21.7% 和 30.4%,其中北方采样区设施菜田土壤 Cu、Zn 和 Cd 总量较露地菜田土壤的增幅明显高于南方土壤。

按全国不同栽培方式菜田统计,与露地菜田土壤相比,设施(温室和大棚)菜田土壤 Cu、Zn 和 Cd 总量均有升高的趋势,其中温室土壤 Cu 总量显著高于露地土壤,设施土壤 Zn 总量显著高于露地土

壤,大棚土壤 Cd 总量显著高于露地土壤。与露地菜田土壤相比,温室和大棚土壤 Cu 分别升高 15.6% 和 8.7%, Zn 分别升高 17.6% 和 25.8%, Cd 分别升高 21.4% 和 39.3% (表 4)。

将北方和南方分开统计,发现设施(温室和大棚)菜田土壤 Cu、Zn 和 Cd 总量亦均有较露地菜田土壤高的趋势,其中北方主要菜区采样区温室土壤 Cu 总量显著高于露地土壤,温室和大棚土壤 Zn 总量显著高于露地土壤,大棚土壤 Cd 总量显著高于露地土壤;南方主要菜区采样区大棚土壤 Zn 总量显著高于露地土壤。北方主要菜区采样区,与露地土壤相比,温室和大棚土壤 Cu 分别升高 44.3% 和 21.7%, Zn 总量分别升高 43.0% 和 35.5%, Cd 分别

表 4 不同栽培方式菜田土壤重金属含量
Table 4 Soil heavy metal concentrations under different patterns of land use

| 重金属 Heavy metal | 项目 Item | 温室 ($n=112$) Greenhouse with wall | 大棚 ($n=157$) Greenhouse without wall | 露地 ($n=234$) Open field |
|--------------------|--------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------|
| Cu | 范围 Range (mg/kg) | 8.4 ~ 120.1 | 10.3 ~ 171.3 | 4.3 ~ 113.6 |
| | 平均 Mean (mg/kg) | 30.4 a | 28.6 ab | 26.3 b |
| | 中位数 Median (mg/kg) | 25.5 | 24.3 | 23.2 |
| | 变异系数 CV (%) | 55.3 | 60.2 | 60.5 |
| Zn | 范围 Range (mg/kg) | 24.0 ~ 271.5 | 30.7 ~ 314.8 | 8.9 ~ 337.0 |
| | 平均 Mean (mg/kg) | 83.0 a | 88.8 a | 70.6 b |
| | 中位数 Median (mg/kg) | 74.5 | 79.8 | 63.7 |
| | 变异系数 CV (%) | 42.9 | 46.8 | 50.2 |
| Cd | 范围 Range (mg/kg) | 0.05 ~ 2.94 | 0.03 ~ 3.64 | 0.00 ~ 1.46 |
| | 平均 Mean (mg/kg) | 0.34 ab | 0.39 a | 0.28 b |
| | 中位数 Median (mg/kg) | 0.22 | 0.20 | 0.20 |
| | 变异系数 CV (%) | 116.0 | 148.8 | 93.1 |
| Pb | 范围 Range (mg/kg) | 8.0 ~ 29.4 | 6.9 ~ 152.9 | 6.7 ~ 184.1 |
| | 平均 Mean (mg/kg) | 19.1 b | 27.5 a | 27.1 a |
| | 中位数 Median (mg/kg) | 19.1 | 23.4 | 23.5 |
| | 变异系数 CV (%) | 22.0 | 62.4 | 67.6 |
| Cr | 范围 Range (mg/kg) | 10.6 ~ 135.3 | 7.3 ~ 92.9 | 1.1 ~ 192.6 |
| | 平均 Mean (mg/kg) | 33.0 a | 29.3 a | 29.6 a |
| | 中位数 Median (mg/kg) | 27.7 | 27.4 | 25.1 |
| | 变异系数 CV (%) | 58.6 | 41.5 | 79.1 |
| As | 范围 Range (mg/kg) | 5.1 ~ 36.3 | 1.5 ~ 26.7 | 1.8 ~ 54.9 |
| | 平均 Mean (mg/kg) | 11.2 ab | 10.6 b | 11.8 a |
| | 中位数 Median (mg/kg) | 10.3 | 10.2 | 10.6 |
| | 变异系数 CV (%) | 34.7 | 36.7 | 56.9 |
| Hg | 范围 Range (mg/kg) | 0.03 ~ 2.77 | 0.00 ~ 1.58 | 0.03 ~ 1.12 |
| | 平均 Mean (mg/kg) | 0.17 a | 0.21 a | 0.18 a |
| | 中位数 Median (mg/kg) | 0.10 | 0.15 | 0.12 |
| | 变异系数 CV (%) | 213.4 | 107.0 | 94.8 |

注 (Note): 同行数据后不同字母表示不同栽培方式间在 $P < 0.05$ 水平差异显著 Values followed by different letters in a row are significantly different at $P < 0.05$ for different land use patterns.

升高 38.5% 和 61.5%。南方主要菜区采样区大棚土壤 Cu、Cd、Pb、Cr、As、Hg 总量与露地土壤差异不显著, 大棚土壤 Zn 总量较露地土壤升高了 23.5% (表 5)。

从表 4、表 5 可看出, 按全国和按北方、南方分开统计的不同栽培方式菜田土壤 Pb 的变化趋势有所不同。按北方和南方主要菜区采样区分开统计的不同栽培方式菜田土壤 Pb 总量差异不显著, 而按全

国主要菜区采样区统计的温室土壤 Pb 总量显著低于大棚和露地土壤, 主要原因是南方主要菜区采样区大棚和露地土壤 Pb 总量 (南方温室土壤样品数仅 11 个, 代表性较差, 未作统计) 明显高于北方, 导致按全国主要菜区采样区进行统计时温室土壤 Pb 总量明显偏低。在南方主要菜区采样区温室土壤 Pb 总量样本数较少的情况下, 按北方和南方分开统计有利于正确评价不同栽培方式菜田土壤 Pb 含量状况。

表 5 按北方和南方主要菜区采样区分别统计的不同栽培方式菜田土壤重金属含量(mg/kg)

Table 5 Average concentrations of heavy metals in soils calculated by different land use patterns of sampling areas of southern and northern main vegetable production regions, respectively

| 重金属 Heavy metal | 北方 Northern China | | | | | | 南方 Southern China | | | |
|-----------------------|------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|---------------------------|---------------|--------------------------------|---------------|----------------------------|---------------|
| | 温室 GH with wall (n = 101) | | 大棚 GH without wall (n = 62) | | 露地 Open field (n = 79) | | 大棚 GH without wall (n = 95) | | 露地 Open field (n = 155) | |
| | 均值 Mean | 中位数 Median | 均值 Mean | 中位数 Median | 均值 Mean | 中位数 Median | 均值 Mean | 中位数 Median | 均值 Mean | 中位数 Median |
| Cu | 30.6 a | 25.5 | 25.8 b | 23.1 | 21.2 b | 20.3 | 30.5 a | 24.8 | 28.8 a | 25.8 |
| Zn | 84.1 a | 77.1 | 79.7 a | 70.1 | 58.8 b | 56.1 | 94.7 a | 81.8 | 76.7 b | 73.0 |
| Cd | 0.36 ab | 0.23 | 0.42 a | 0.22 | 0.26 b | 0.17 | 0.36 a | 0.17 | 0.29 a | 0.21 |
| Pb | 19.1 a | 19.0 | 20.0 a | 18.8 | 19.0 a | 18.5 | 32.4 a | 28.5 | 31.3 a | 27.1 |
| Cr | 33.7 a | 28.0 | 31.0 ab | 26.8 | 27.1 b | 25.0 | 28.1 a | 28.1 | 30.8 a | 25.5 |
| As | 10.7 a | 10.2 | 10.1 a | 9.8 | 10.8 a | 10.5 | 10.9 a | 10.4 | 12.4 a | 10.6 |
| Hg | 0.17 a | 0.10 | 0.18 a | 0.09 | 0.15 a | 0.07 | 0.23 a | 0.18 | 0.20 a | 0.14 |

注(Note): GH—Greenhouse. 同行数据后不同字母表示不同栽培方式间在 $P < 0.05$ 水平差异显著(北方和南方分别作显著性检验) Values followed by different letters in a row are significantly different at $P < 0.05$ for different land use patterns (Data were analyzed by northern and southern China, respectively). 对南方温室菜田的各测试项目不作统计(土壤样品数小于 30 个) Data was not calculated for soil samples below 30.

表 4 和表 5 显示,按全国和按北方和南方分开统计的不同栽培方式菜田土壤 Cr、As 和 Hg 总量的趋势基本一致,温室、大棚和露地土壤 Cr、As 和 Hg 总量总体上差异均不明显。

2.2 种菜历史对不同栽培方式菜田土壤重金属含量的影响

由表 6 可见,随着种菜年限的增加,菜田土壤重金属 Cu、Zn 和 Cd 总量显著增加,种菜年限 10~20 年和 >20 年的土壤重金属(Cu、Zn 和 Cd)总量较种菜年限 ≤ 10 年的增加幅度平均分别在 12.8%~33.3% 和 28.7%~59.3% 之间。种菜年限 10~20 年和 >20 年的土壤 Cu 总量较种菜年限 ≤ 10 年的平均分别增加 13.1% 和 34.4%,其中温室土壤 Cu 总量平均分别增加 14.2% 和 32.0%,大棚土壤 Cu 总量平均分别增加 19.5% 和 48.7%,露地土壤 Cu 总量平均分别增加 8.5% 和 29.6%;种菜年限 10~20 年和 >20 年的土壤 Zn 总量较种菜年限 ≤ 10 年的平均分别增加 12.8% 和 28.7%,其中温室土壤 Zn 总量平均分别增加 14.2% 和 33.4%,大棚土壤 Zn 总量平均分别增加 11.9% 和 26.4%,露地土壤 Zn 总量平均分别增加 12.1% 和 34.9%;种菜年限 10~20 年和 >20 年的土壤 Cd 总量较种菜年限 ≤ 10 年的平均分别增加 33.3% 和 59.3%,其中温室土壤 Cd 总量平均分别增加 33.3% 和 50.0%,大棚土壤 Cd 总量平均分别增加 43.8% 和 56.3%,露地

土壤 Cd 总量平均分别增加 42.9% 和 81.0%。

2.3 不同栽培方式菜田土壤重金属含量之间的关系

本研究选择的主要菜区不同栽培方式菜田均为远离城郊的未受到工业“三废”、汽车尾气等污染的农村菜田,且蔬菜生产对农药使用的限制越来越严格,土壤中重金属可能主要来源于施用的化肥和畜禽粪便有机肥。从表 7 可看到,不同栽培方式菜田土壤中均可能存在几种重金属同时污染的复合污染现象,其中菜田不同栽培方式对其含量影响较大的 Cu、Zn、Cd 等元素之间的相关性均达到极显著水平。

2.4 不同栽培方式菜田土壤重金属污染评价

采样区设施(温室和大棚)菜田土壤 Cd 总体上处于污染警戒级状况,露地菜田土壤总体上未受到 Cd 的污染;采样区设施和露地菜田土壤 Cu、Zn、Pb、Cr、As 和 Hg 总体上均未构成对土壤的污染(表 8)。采样区不同栽培方式菜田土壤 Cd 的二级超标率及单项污染指数均较高,温室、大棚和露地土壤 Cd 的二级超标率分别达到 22.3%、20.4% 和 19.2%,单项污染指数分别为 0.97、0.98 和 0.70,按土壤重金属单项污染评价分级标准,设施菜田土壤 Cd 总体上处于污染警戒级(尚清洁水平)状况,露地菜田土壤 Cd 总体上居安全级(清洁水平)。

表 6 不同种菜历史下不同栽培方式菜田土壤重金属含量 (mg/kg)

Table 6 Concentrations of heavy metals in soils under different vegetable production history

| 重金属 Heavy metal | 栽培方式 Land use pattern | | ≤10 年 ≤ Ten years | 10~20 年 Ten to twenty years | >20 年 > Twenty years |
|--------------------|--------------------------|-------------|----------------------|--------------------------------|-------------------------|
| Cu | 温室 GH with wall | 均值 Mean | 28.1 ± 18.8 | 32.1 ± 13.2 | 37.1 ± 22.0 |
| | | 中位数 Median | 25.2 | 25.7 | 30.0 |
| | 大棚 GH without wall | 均值 Mean | 26.1 ± 10.0 | 31.2 ± 17.3 | 38.8 ± 35.1 |
| | | 中位数 Median | 23.7 | 25.0 | 27.6 |
| | 露地土壤 Open field | 均值 Mean | 24.7 ± 15.3 | 26.8 ± 17.6 | 32.0 ± 14.2 |
| | | 中位数 Median | 22.4 | 23.4 | 27.5 |
| 全部 All | 均值 Mean | 25.9 ± 14.6 | 29.3 ± 16.2 | 34.8 ± 24.1 | |
| | 中位数 Median | 23.8 | 24.5 | 27.6 | |
| Zn | 温室 GH with wall | 均值 Mean | 79.3 ± 36.7 | 90.6 ± 34.3 | 105.8 ± 29.0 |
| | | 中位数 Median | 69.3 | 75.6 | 109.2 |
| | 大棚 GH without wall | 均值 Mean | 82.5 ± 30.1 | 92.3 ± 45.6 | 104.3 ± 71.8 |
| | | 中位数 Median | 74.6 | 82.6 | 81.4 |
| | 露地土壤 Open field | 均值 Mean | 65.4 ± 27.1 | 73.3 ± 37.8 | 88.2 ± 53.5 |
| | | 中位数 Median | 61.5 | 69.1 | 69.9 |
| 全部 All | 均值 Mean | 74.1 ± 31.2 | 83.6 ± 39.7 | 95.4 ± 59.0 | |
| | 中位数 Median | 68.2 | 75.1 | 81.4 | |
| Cd | 温室 GH with wall | 均值 Mean | 0.30 ± 0.41 | 0.40 ± 0.37 | 0.45 ± 0.42 |
| | | 中位数 Median | 0.19 | 0.23 | 0.30 |
| | 大棚 GH without wall | 均值 Mean | 0.32 ± 0.42 | 0.46 ± 0.48 | 0.50 ± 0.45 |
| | | 中位数 Median | 0.19 | 0.25 | 0.27 |
| | 露地土壤 Open field | 均值 Mean | 0.21 ± 0.15 | 0.30 ± 0.35 | 0.38 ± 0.32 |
| | | 中位数 Median | 0.17 | 0.22 | 0.27 |
| 全部 All | 均值 Mean | 0.27 ± 0.32 | 0.36 ± 0.56 | 0.43 ± 0.38 | |
| | 中位数 Median | 0.18 | 0.22 | 0.29 | |

注 (Note): GH—Greenhouse. 种菜历史 ≤10 年的温室、大棚和露地土壤样品数分别为 62、109 和 141 个, 种菜历史 10~20 年的温室、大棚和露地土壤样品数分别为 35、27 和 60 个, 种菜历史 >20 年的温室、大棚和露地土壤样品数分别为 15、21 和 33 个 Soil samples collected from the vegetable fields of greenhouse with wall, the vegetable fields of greenhouse without wall, and the open vegetable fields were respectively 62, 109 and 141 for vegetable production history below ten years, 35, 27 and 60 for vegetable production history ranging from ten to twenty years, and 15, 21 and 33 for vegetable production history above twenty years.

不同栽培方式菜田土壤 Hg 的单项污染指数均低于污染警戒级水平, 表明土壤总体上未受到 Hg 的污染, 但大棚和露地菜田土壤 Hg 的二级超标率也达到了一定比例, 分别为 14.6% 和 12.8%, 对大棚和露地菜田土壤 Hg 的污染问题应引起重视。

采样区不同栽培方式菜田土壤 Cu、Zn、Pb、Cr 和 As 的二级超标率及单项污染指数均较低, 三种栽培方式下二级超标率在 0~7.6% 之间, 单项污染指数在 0.06~0.52 之间, 显示设施菜田和露地菜田土壤 Cu、Zn、Pb、Cr 和 As 均处于安全级, 暂未构成对土壤和蔬菜的威胁。

采样区设施菜田土壤重金属综合污染指数高于

露地菜田土壤, 温室、大棚和露地土壤重金属综合污染指数分别为 0.75、0.81 和 0.56, 按照土壤重金属综合污染评价分级标准, 设施菜田土壤重金属处于污染警戒级状况, 露地菜田土壤重金属居安全级。

3 讨论

3.1 设施菜田土壤重金属含量变化特征

本研究表明, 采样区设施 (温室和大棚) 菜田土壤重金属 Cu、Zn 和 Cd 总量总体上均高于露地菜田土壤; 随着种菜年限的增加, 土壤重金属 Cu、Zn 和 Cd 总量显著增加, 这主要与设施菜田长期过量施肥有关。本研究选择的不同栽培方式菜田均为远离城

表 7 不同栽培方式菜田土壤重金属之间的相关性(r)
Table 7 Correlation coefficients between the concentrations of heavy metals in vegetable soils under different patterns of land use

| 栽培方式 Land use pattern | 重金属 Heavy metal | Cu | Zn | Cd | Pb | Cr | As | Hg |
|------------------------------------------------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----|
| 温室 Greenhouse with wall ($n = 112$) | Cu | 1 | | | | | | |
| | Zn | 0.760** | 1 | | | | | |
| | Cd | 0.359** | 0.485** | 1 | | | | |
| | Pb | 0.191* | 0.285** | 0.051 | 1 | | | |
| | Cr | 0.192* | 0.429** | 0.278** | 0.162 | 1 | | |
| | As | 0.193* | 0.007 | -0.030 | 0.374** | -0.055 | 1 | |
| | Hg | 0.124 | 0.272** | 0.065 | 0.286** | 0.137 | -0.004 | 1 |
| 大棚 Greenhouse without wall ($n = 157$) | Cu | 1 | | | | | | |
| | Zn | 0.767** | 1 | | | | | |
| | Cd | 0.271** | 0.468** | 1 | | | | |
| | Pb | 0.360** | 0.422** | 0.055 | 1 | | | |
| | Cr | 0.282** | 0.351** | 0.410** | -0.010 | 1 | | |
| | As | 0.312** | 0.347** | 0.215** | 0.387** | 0.150 | 1 | |
| | Hg | 0.203* | 0.399** | 0.114 | 0.270** | 0.078 | 0.033 | 1 |
| 露地土壤 Open field ($n = 234$) | Cu | 1 | | | | | | |
| | Zn | 0.565** | 1 | | | | | |
| | Cd | 0.222** | 0.387** | 1 | | | | |
| | Pb | 0.338** | 0.463** | 0.332** | 1 | | | |
| | Cr | 0.438** | 0.309** | 0.106 | 0.169** | 1 | | |
| | As | 0.531** | 0.477** | 0.304** | 0.459** | 0.487** | 1 | |
| | Hg | 0.215** | 0.352** | 0.212** | 0.261** | 0.130* | 0.227** | 1 |

注(Note): *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.

郊的未受到工业“三废”、汽车尾气等污染的农村菜田。磷肥、复合肥等化肥中含有一定量的重金属,有机肥中 Zn、Cu、Cd 等重金属含量较高,过量施肥会造成菜田土壤中重金属积累。由表 9 可以看出,不同栽培方式菜田肥料使用差异很大,设施菜田的 N、 P_2O_5 和 K_2O 总量及有机肥用量均显著高于露地菜田, N、 P_2O_5 和 K_2O 总量平均分别高 44.1%、92.0% 和 1.46 倍,其中有机肥中 N、 P_2O_5 和 K_2O 用量平均分别高 1.31、1.44 和 1.39 倍。

设施栽培条件下,种植户为了追求设施利用率及蔬菜高产,通常都在棚室内进行连续种植,蔬菜复种指数高且肥料投入量大,化肥和有机肥的投入量远高于露地蔬菜栽培,并大大超过蔬菜养分需求量。山东省惠民设施蔬菜产区氮(N)、磷(P_2O_5)和钾(K_2O)年均施入量分别为 4670、1409 和 1916 kg/hm^2 ,分别相当于对照农田的 7.0、12.8 和 18.6

倍,超过蔬菜需要量的数倍^[29]。余海英等^[30]对山东寿光温室蔬菜种植情况调查显示,有机肥以鸡粪和猪粪为主,56%的温室全部用高浓度复合肥(N— P_2O_5 — K_2O 为 15—15—15),温室栽培每年 N、 P_2O_5 和 K_2O 的平均投入量分别达到 4088、3656 和 3438 kg/hm^2 。Huang 和 Jin^[31]对北京市、天津市、河北省和山东省 4 个省市 10 个区县的肥料使用情况进行调查表明,设施蔬菜和露地蔬菜的总施肥量(养分)分别为粮食作物的 5.2 倍和 2.5 倍。徐勇贤等^[32]对长三角无锡市城乡交错区蔬菜基地土壤重金属平衡的研究显示,有机肥施用是生产系统重金属输入的主要来源,占输入量的 89%,土壤 Cu、Zn、Cd 等存在积累的趋势。李树辉^[33]通过在甘肃武威开展的两年田间定位试验研究的结果表明,设施蔬菜种植过程中重金属的输入途径主要来自化肥和有机肥,其中有机肥对设施菜田重金属的输入通量远

表 8 不同栽培方式菜田土壤重金属的二级超标率、单项污染指数和综合污染指数

Table 8 Percentage of soil samples with heavy concentrations beyond the 2nd criterion of Environmental Quality Standard for Soils, and the single-factor and comprehensive pollution indices of soil heavy metals under different patterns of land use

| 重金属 Heavy metal | 项目 Item | 温室 GH with wall | 大棚 GH without wall | 露地 Open field |
|--------------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|------------------|
| Cu | 二级超标率 PSS-SS-SEQ (%) | 2.7 | 3.8 | 1.7 |
| | 单项污染指数 SPI-SS-SEQ | 0.39 ± 0.28 a | 0.39 ± 0.28 a | 0.36 ± 0.27 a |
| Zn | 二级超标率 PSS-SS-SEQ (%) | 0.9 | 1.9 | 0.4 |
| | 单项污染指数 SPI-SS-SEQ | 0.34 ± 0.17 b | 0.39 ± 0.19 a | 0.31 ± 0.17 b |
| Cd | 二级超标率 PSS-SS-SEQ (%) | 22.3 | 20.4 | 19.2 |
| | 单项污染指数 SPI-SS-SEQ | 0.97 ± 1.32 a | 0.98 ± 1.49 a | 0.70 ± 0.69 b |
| Pb | 二级超标率 PSS-SS-SEQ (%) | 0.0 | 7.6 | 5.6 |
| | 单项污染指数 SPI-SS-SEQ | 0.06 ± 0.02 a | 0.09 ± 0.06 a | 0.09 ± 0.07 a |
| Cr | 二级超标率 PSS-SS-SEQ (%) | 0 | 0 | 0.4 |
| | 单项污染指数 SPI-SS-SEQ | 0.17 ± 0.11 a | 0.15 ± 0.07 a | 0.15 ± 0.13 a |
| As | 二级超标率 PSS-SS-SEQ (%) | 1.8 | 2.5 | 5.1 |
| | 单项污染指数 SPI-SS-SEQ | 0.38 ± 0.15 a | 0.35 ± 0.16 a | 0.40 ± 0.23 a |
| Hg | 二级超标率 PSS-SS-SEQ (%) | 3.6 | 14.6 | 12.8 |
| | 单项污染指数 SPI-SS-SEQ | 0.34 ± 0.90 b | 0.52 ± 0.75 a | 0.41 ± 0.49 ab |
| 7 种重金属的综合污染指数 CPI-SS-SEQ | | 0.75 ± 0.95 ab | 0.81 ± 1.06 a | 0.56 ± 0.50 b |

注 (Note): PSS-SS-SEQ—Percentage of soil samples beyond the 2nd criteria of Environmental Quality Standard for Soils; SPI-SS-SEQ—The single-factor pollution index based on the 2nd criterion of Environmental Quality Standard for Soils; CPI-SS-SEQ—The comprehensive pollution index of 7 heavy metals based on the 2nd criterion of Environmental Quality Standard for Soils, respectively. 同行数据后不同字母表示不同栽培方式间在 $P < 0.05$ 水平差异显著 Values followed by different letters in a row are significantly different at $P < 0.05$ for different land use patterns.

表 9 不同栽培方式菜田 2011 ~ 2013 年肥料使用情况 [kg/(hm² · season)]

Table 9 Fertilizer application rates from 2011–2013 for vegetable soils under different land use patterns

| 肥料 Fertilizer | | 温室 Greenhouse with wall (n = 376) | | 大棚 Greenhouse without wall (n = 202) | | 露地 Open field (n = 649) | |
|-------------------------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|-----------------------------------------|---------------|----------------------------|---------------|
| | | 均值 Mean | 中位数 Median | 均值 Mean | 中位数 Median | 均值 Mean | 中位数 Median |
| | | N | 化肥 Chemical fertilizer | 501.8 ± 438.2 | 406.9 | 514.3 ± 598.4 | 310.5 |
| | 有机肥 Organic manure | 300.7 ± 309.9 | 234.9 | 325.4 ± 463.4 | 155.6 | 135.6 ± 180.5 | 81.9 |
| | 总量 Total | 802.5 ± 579.5 | 705.8 | 839.7 ± 958.7 | 543.2 | 569.8 ± 348.6 | 492.1 |
| P ₂ O ₅ | 化肥 Chemical fertilizer | 352.4 ± 371.2 | 280.5 | 344.7 ± 444.6 | 192.0 | 218.8 ± 161.9 | 183.9 |
| | 有机肥 Organic manure | 349.3 ± 382.6 | 233.6 | 321.9 ± 486.2 | 145.9 | 137.4 ± 204.8 | 48.8 |
| | 总量 Total | 701.7 ± 587.1 | 536.1 | 666.6 ± 750.2 | 380.9 | 356.3 ± 266.0 | 288.6 |
| K ₂ O | 化肥 Chemical fertilizer | 461.9 ± 429.6 | 377.9 | 566.4 ± 630.5 | 240.0 | 206.3 ± 170.7 | 174.0 |
| | 有机肥 Organic manure | 268.8 ± 309.8 | 172.1 | 277.1 ± 432.4 | 104.9 | 114.2 ± 165.4 | 58.3 |
| | 总量 Total | 730.7 ± 585.8 | 607.0 | 843.5 ± 993.1 | 410.6 | 320.5 ± 234.9 | 279.0 |

远超过化肥。黄霞等^[34]报道,我国农民在设施蔬菜生产中大量使用鸡粪、猪粪等畜禽粪便,年用量高的

在 153.9 ~ 240.0 t/hm² 之间。曾希柏等^[35]调查指出,山东寿光市设施蔬菜有机肥年用量平均为

207.2 t/hm²,最高施用量达到493.8 t/hm²。陈碧华等^[21]对河南新乡市无公害蔬菜生产基地的调查显示,设施蔬菜和露地蔬菜有机肥年施用量分别平均达到150和100 t/hm²。因此,我国设施菜田长期过量施肥尤其是有机肥造成了土壤中重金属Cu、Zn、Cd等逐渐积累,遭受重金属污染的潜在威胁较露地菜田更为突出;随着种菜年限的增加,土壤中重金属积累会越多。

本研究还表明,采样区设施(温室和大棚)菜田土壤Cd总体上处于污染警戒级状况,露地菜田土壤总体上未受到Cd的污染;采样区设施和露地土壤Cu、Zn、Pb、Cr、As和Hg均未构成对土壤的污染。施用有机肥是蔬菜优质高产和养分循环利用不可缺少的重要措施,但有机肥是土壤中重金属积累的主要来源。尽管目前采样区设施菜田土壤Cd总体上处于污染警戒级状况,但逐渐积累的趋势势必加重土壤Cd的危险性。值得指出的是,本研究局部地区设施菜田土壤Cd处于轻污染级状况,对于这类处于轻度污染的设施菜田土壤,可以利用间/套作等的栽培制度,在保证设施蔬菜生产的同时修复被污染的土壤。更为重要的是,如何合理施用肥料尤其是畜禽粪便有机肥,是设施蔬菜安全高效生产的关键。

3.2 菜田土壤重金属之间的关系

土壤中的重金属污染往往是以某一重金属元素为主,但大多是几种重金属元素同时污染的复合污染。研究土壤重金属元素之间的相关性,有利于对它们分布情况的掌握和了解,进而确定它们是否来自相同污染源,以分析复合污染产生原因。重金属复合污染不仅在工矿区、污灌区和城区的土壤上发生,而且在城郊的菜田土壤中也普遍存在^[23]。彭晓春等^[36]报道,长沙-株洲-湘潭(长株潭)城市群的土壤Cd、Cu、Ni、Pb、Zn两两之间均存在极显著的相关性,表明这些元素具有相似的来源,这可能与湖南湘江流域的有色矿业Pb、Zn、Cd冶炼活动密集、工业废水无序排放密切相关。冉延平^[37]研究表明,某城市土壤中As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn的空间相关性显著,存在8种重金属元素共生混合污染的潜在危害,污染源具有多源性,Cr、Ni污染可能与工业区有关,Zn、Pb、Cd、As主要来源于汽车尾气的排放、燃料及润滑油的泄漏以及轮胎和机械部件的磨损,Hg、Cu的污染主要来自生活污染和公园绿地农药化肥污染。关共凑等^[38]研究显示,佛山市郊主要

菜地土壤Cu、Zn、Ni、Pb和Cr之间存在极显著或显著正相关关系,它们主要来自污水灌溉,具有明显的同源关系,并呈现复合污染的趋势。而本研究发现,我国农村主要菜区土壤中也存在多种重金属同时污染的复合污染现象,其中不同栽培方式影响较大的元素Cu、Zn、Cd等之间的相关性均达到极显著水平,证实了农村不同栽培方式菜田土壤重金属复合污染具有同源性。主要原因是本研究选择的主要菜区不同栽培方式菜田均为远离城郊的未受到工业“三废”、汽车尾气等污染的农村菜田,土壤中重金属主要来源于施用的化肥和畜禽粪便有机肥。而磷肥、复合肥等化肥中含有一定量的Cd、Zn等重金属,有机肥中Cu、Zn、Cd等重金属含量较高,因此,我国主要菜区不同栽培方式菜田长期过量施肥尤其是大量使用畜禽粪便造成了土壤中Cu、Zn、Cd等重金属同步积累的趋势。

4 结论

1) 采样区设施(温室和大棚)菜田土壤重金属Cu、Zn和Cd总量总体上均高于露地菜田土壤,较露地菜田土壤平均分别为高12.2%、21.7%和30.4%。由于本研究选择的主要菜区不同栽培方式菜田均为远离城郊的未受到工业“三废”、汽车尾气等污染的农村菜田,设施菜田长期过量施肥尤其是有机肥可能是土壤中重金属Cu、Zn、Cd等逐渐积累的主要原因,因此设施菜田遭受重金属污染的潜在威胁较露地菜田更为突出。

2) 随着种菜年限的增加,菜田土壤重金属Cu、Zn和Cd总量显著增加,种菜年限10~20年和>20年的土壤重金属(Cu、Zn和Cd)总量较种菜年限≤10年的增幅平均分别在12.8%~33.3%和28.7%~59.3%之间。不同栽培方式菜田土壤均存在几种重金属同时污染的复合污染现象,其中菜田不同栽培方式对土壤重金属含量影响较大的Cu、Zn、Cd等之间的相关性均达到极显著水平,相关系数在0.222~0.767之间。

3) 采样区不同栽培方式菜田土壤Cd的二级超标率在19.2%~22.3%之间,设施(温室和大棚)菜田土壤Cd总体上处于污染警戒级状况,露地菜田土壤总体上未受到Cd的污染;全国不同栽培方式菜田土壤Cu、Zn、Pb、Cr、As和Hg的二级超标率在0~14.6%之间,设施和露地土壤Cu、Zn、Pb、Cr、As和Hg总体上均未构成对土壤的污染。按照土壤重

金属综合污染评价分级标准, 采样区设施菜田土壤重金属处于污染警戒级状况, 露地菜田土壤重金属居安全级。

致谢: 土壤样品采集由国家大宗蔬菜产业技术体系各综合试验站站长负责, 其他岗位专家参与并给予了指导, 在此一并感谢。

参考文献:

- [1] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.
China Agricultural Yearbook Editing Committee. China Agriculture Yearbook[M]. China Agriculture Press. 2013.
- [2] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [3] 李精超, 胡小凤, 李文一, 徐卫红. 设施蔬菜基地土壤重金属污染分析及防治研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(18): 393-396.
Li J C, Hu X F, Li W Y, Xu W H. Study on heavy metal pollution analysis and control in protected vegetable base soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(18): 393-396.
- [4] 陈林华, 倪吾钟, 李雪莲, 孙建兵. 常用肥料重金属含量的调查分析[J]. 浙江理工大学学报, 2009, 26(2): 223-227.
Chen L H, Ni W Z, Li X L, Sun J B. Investigation of heavy metal concentrations in commercial fertilizers commonly used [J]. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University*, 2009, 26(2): 223-227.
- [5] 何飞飞, 任涛, 杨君. 三元复混肥和鸡粪肥中重金属含量特征分析与评价[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2011, 37(6): 665-668.
He F F, Ren T, Yang J. Investigation of heavy metal characteristic of N-P-K compound fertilizer and chicken manure in Shouguang [J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science)*, 2011, 37(6): 665-668.
- [6] 刘荣乐, 李书田, 王秀斌, 王敏. 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 R L, Li S T, Wang X B, Wang M. Contents of heavy metal in commercial organic fertilizers and organic waste [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2): 392-397.
- [7] 黄治平, 徐斌, 张克强, 杨秀春. 连续四年施用规模化猪场猪粪温室土壤重金属积累研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 239-244.
Huang Z P, Xu B, Zhang K Q, Yang X C. Accumulation of heavy metals in the four years' continual swine manure-applied greenhouse soil [J]. *Transactions of the CASE*, 2007, 23(11): 239-244.
- [8] 姜萍, 金盛杨, 郝秀珍, 等. 重金属在猪饲料-粪便-土壤-蔬菜中的分布特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(5): 942-947.
Jiang P, Jin S Y, Hao X Z, *et al.* Distribution characteristics of heavy metals in feeds, pig manures, soils and vegetables [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5): 942-947.
- [9] Mapanda F, Mangwayana E N, Nyamangara J, *et al.* The effect of long-term irrigation using wastewater on heavy metal contents of soils under vegetables in Harare, Zimbabwe [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2005, 107: 151-165.
- [10] George K A, Singh B. Heavy metals contamination in vegetables grown in urban and metal smelter contaminated sites in Australia [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2006, 169: 101-123.
- [11] Huang B, Shi X, Yu D, *et al.* Environmental assessment of small-scale vegetable farming systems in peri-urban areas of the Yangtze River Delta Region, China [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2006, 112: 391-402.
- [12] Nabulo G., Oryem O H, Diamond M. Assessment of lead, cadmium, and zinc contamination of roadside soils, surface films, and vegetables in Kampala City, Uganda [J]. *Environmental Research*, 2006, 101: 42-52.
- [13] 崔玉静, 张旭红, 王丽明. 广西某污染区金属元素在土壤-植物系统中的迁移规律[J]. 生态学杂志, 2008, 27(10): 1822-1823.
Cui Y J, Zhang X H, Wang L M. Transfer patterns of metal elements in soil-plant system in a contaminated area in Guangxi China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(10): 1822-1823.
- [14] 李瑞琴, 于安芬, 白滨, 王婧. 甘肃中部高原露地菜田土壤重金属污染及潜在生态风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 103-110.
Li R Q, Yu A F, Bai B, Wang J. Analysis on current situation and potential ecological risk and the characteristic of heavy metals pollution of soil in the central plateau of Gansu province, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1): 103-110.
- [15] 李雪梅, 王祖伟, 邓小文. 天津郊区菜田土壤重金属污染环境质量评价[J]. 天津师范大学学报, 2005, 25(1): 69-72.
Li X M, Wang Z W, Deng X W. The assessment of heavy metal pollution in soil in Tianjin suburb [J]. *Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition)*, 2005, 25(1): 69-72.
- [16] 黄勇, 郭庆荣, 任海, 等. 城市土壤重金属污染研究综述 [J]. 热带地理, 2005, 25(1): 14-18.
Huang Y, Guo Q R, Ren H, *et al.* A review of the study on heavy metal pollution in urban soils [J]. *Tropical Geography*, 2005, 25(1): 14-18.
- [17] 李瑞琴, 于安芬, 车宗贤, 等. 河西走廊日光温室不同建棚年限土壤养分及重金属残留研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(5): 1165-1169.
Li R Q, Yu A F, Che Z X, *et al.* The study of soil nutrient and heavy metals in the soil of sunlight greenhouse with different building-up ages in Hexi corridor [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(5): 1165-1169.
- [18] 李见云, 侯彦林, 化全县, 董县中. 大棚设施土壤养分和重金属状况研究[J]. 土壤, 2005, 37(6): 626-629.
Li J Y, Hou Y L, Hua Q X, Dong X Z. Variation of soil nutrient and heavy metal concentrations in greenhouse soils [J]. *Soils*, 2005, 37(6): 626-629.

- [19] 蒋光月, 郭熙盛, 朱宏斌, 何传龙. 合肥地区大棚土壤 7 种重金属相关环境质量评价[J]. 土壤通报, 2008, 39(5): 1230-1232.
Jiang G Y, Guo X S, Zhu H B, He C L. Environment quality evaluation with 7 heavy metals of greenhouse soil in Hefei city [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(5): 1230-1232.
- [20] 于志民, 沈光, 吕品, 周琳. 黑龙江省典型蔬菜大棚土壤重金属污染评价[J]. 腐植酸, 2012, 5: 14-17.
Yu Z M, Shen G, Lü P, Zhou L. Evaluation of heavy metal pollution of typical vegetable greenhouse soils in Heilongjiang province[J]. Humic Acids, 2012, 5: 14-17.
- [21] 陈碧华, 杨和连, 周俊国, 等. 大棚菜田种植年限对土壤重金属含量及酶活性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 213-218.
Chen B H, Yang H L, Zhou J G, *et al.* Effect of cultivating years of vegetable field on soil heavy metal content and enzyme activity in plastic shed[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 213-218.
- [22] 刘苹, 杨力, 于淑芳, 等. 寿光市蔬菜大棚土壤重金属含量的环境质量评价[J]. 环境科学研究, 2008, 21(5): 66-71.
Liu P, Yang L, Yu S F, *et al.* Evaluation on environmental quality of heavy metal contents in soil of vegetable greenhouses in Shouguang city[J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21(5): 66-71.
- [23] 曾希柏, 李莲芳, 梅旭荣. 中国蔬菜土壤重金属含量及来源分析[J]. 中国农业科学, 2007, 40(11): 2507-2517.
Zeng X B, Li L F, Mei X R. Heavy metal content in soils of vegetable-growing lands in China and source analysis [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(11): 2507-2517.
- [24] 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.
Lu R K. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Publishing House, 2000.
- [25] NY/T 1121.11-2006, 中华人民共和国农业行业标准[S]. NY/T 1121.11-2006, Agricultural industry standard of the people's Republic of China [S].
- [26] Zheng G Z, Yue L P, Li Z P, Chen C. Assessment on heavy metal pollution of agricultural soil in Guanzhong district [J]. Journal of Geographical Sciences, 2006, 16(1): 105-113.
- [27] 李晓勇. 农田土壤重金属污染评价方法研究——以株洲市白马乡为例[J]. 土壤通报, 2009, 40(2): 390-393.
Li X Y. Methods for assessment of heavy metal pollution in cropland soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(2): 390-393.
- [28] 邓秋静, 宋春然, 谢锋, 等. 贵阳市耕地土壤重金属分布特征及评价[J]. 土壤, 2006, 38(1): 53-60.
Deng Q J, Song C R, Xie F, *et al.* Distribution and evaluation of heavy metals in cultivated soil of Guiyang[J]. Soils, 2006, 38(1): 53-60.
- [29] Ju X T, Kou C L, Christie P, *et al.* Changes in the soil environment from excessive application of fertilizers and manures to two contrasting intensive cropping systems on the North China [J]. Environmental Pollution, 2007, 145: 497-506.
- [30] 余海英, 李廷轩, 张锡洲. 温室栽培系统的养分平衡及土壤养分变化特征[J]. 中国农业科学, 2010, 43(3): 514-522.
Yu H Y, Li T X, Zhang X Z. Budget and soil nutrient status in greenhouse system [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(3): 514-522.
- [31] Huang S W, Jin J Y. Status of heavy metals in agricultural soils as affected by different patterns of land use [J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2008, 139: 317-327.
- [32] 徐勇贤, 王洪杰, 黄标, 等. 长三角工业型城乡交错区蔬菜生产系统重金属平衡及健康风险[J]. 土壤, 2009, 41(4): 548-555.
Xu Y X, Wang H J, Huang B, *et al.* Balance of heavy metals and healthy risks in vegetable farming system of an industry-based peri-urban area in Yangtze river delta region [J]. Soils, 2009, 41(4): 548-555.
- [33] 李树辉. 北方设施菜地重金属的积累特征及防控对策研究[D]. 北京: 中国农业科学院博士论文, 2011.
Li S H. Characteristics of heavy metal accumulation and regulation strategies in soils of protected vegetable cultivation in the North China [D]. Beijing: PhD Dissertation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011.
- [34] 黄霞, 李廷轩, 余海英. 典型设施土壤重金属含量变化及其风险评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 833-839.
Huang X, Li T X, Yu H Y. Risk assessments of heavy metals in typical greenhouse soils [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(4): 833-839.
- [35] 曾希柏, 李莲芳, 白玲玉, 等. 山东寿光农业利用方式对土壤砷积累的影响[J]. 应用生态学报, 2007b, 18(2): 310-316.
Zeng X B, Li L F, Bai L Y, *et al.* Arsenic accumulation in different agricultural soils in Shouguang of Shandong province [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(2): 310-316.
- [36] 彭晓春, 陈志良, 董家华, 杨兵. 长株潭城市群的土壤重金属分布特征[J]. 贵州农业科学, 2011, 39(9): 213-216.
Peng X C, Chen Z L, Dong J H, Yang B. Distribution characteristics of heavy metals in soil in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2011, 39(9): 213-216.
- [37] 冉延平. 城市表层土壤重金属空间分布特征[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(13): 7829-7831.
Ran Y P. Spatial distribution characteristics of urban topsoil heavy metals [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(13): 7829-7831.
- [38] 关共凑, 魏兴琥, 陈楠纬. 佛山市郊菜地土壤理化性质与重金属含量及其相关性[J]. 环境科学与管理, 2013, 38(2): 78-82.
Guan G C, Wei X H, Chen N W. Study on physical-chemical properties and contents of heavy metals and their correlation in vegetable fields of Foshan [J]. Environmental Science and Management, 2013, 38(2): 78-82.