

我国北方典型日光温室蔬菜生产系统土壤 重金属积累趋势*

毛明翠^{1,2} 黄标^{2†} 李元¹ 胡文友² 杨岚钦² 陈永² 高新昊³

(1 云南农业大学资源与环境科学学院,昆明 650201)

(2 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(中国科学院南京土壤研究所),南京 210008)

(3 山东省农业科学院农业资源与环境研究所,济南 250100)

TRENDS OF HEAVY METALS ACCUMULATION IN SOILS FOR VEGETABLE FARMING IN SUNLIGHT GREENHOUSE INNORTH CHINA

Mao Mingcui^{1,2} Huang Biao^{2†} Li Yuan¹ Hu Wenyu² Yang Lanqin² Chen Yong² Gao Xinhao³

(1 College of Resources and Environmental Science, Yunnan Agriculture University, Kunming 650201, China)

(2 Soil Environment and Pollution Remediation Laboratory, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(3 Agricultural Resources and Environment Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China)

关键词 日光温室;蔬菜生产系统;重金属;积累趋势

中图分类号 X502 **文献标识码** A

大量研究表明,现代农业生产过程中,随着农用投入品(如化肥、有机肥料、农药等)使用量的增加,不可避免地将伴生的一些重金属带入土壤^[1]。这些重金属有可能在土壤中积累,并进入农产品,给生产者和消费者的健康带来潜在危险性^[2-4]。因此,农田土壤中重金属的积累及其生态效应越来越受到人们的关注。

随着人们对反季节蔬菜需求的增加,近年来设施蔬菜生产发展不断扩大。由于其生产过程中高投入和高产出的特点,人们也开始关注设施蔬菜生产条件下土壤中重金属的积累。如对我国沈阳、哈尔滨、白银、南京等城市周边设施蔬菜土壤及蔬菜中的重金属污染状况及评价工作,揭示了设施蔬菜生产系统重金属存在一定的安全问题^[5-6]。设施蔬菜生产的另一个显著特点是其封闭性,阻断了大气、交通、工业等重金属的来源途径,系统内重金属来源较为单一,主要为农用投入品来源,这为研究这一途径重金属积累的速率及趋势提供了有利的

条件。尽管目前一些研究发现了设施蔬菜生产系统中土壤重金属的积累特征^[7],但系统研究重金属积累速率及演变趋势的并不多见。而这方面的定量结果对于确定农用投入品重金属控制标准、土壤重金属环境阈值、农用投入品使用量控制规范等有重要参考价值。

本文以我国北方某市典型设施蔬菜生产系统——日光温室为研究对象,通过对其所施肥料及土壤和蔬菜中 As、Cd、Cu、Hg、Pb 和 Zn 等 6 种重金属含量的测定,评价了土壤重金属含量随日光温室种植年限增加而积累的速率,分析了土壤重金属的积累趋势。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区所在的典型市,总面积达 2 180 km²,人口 113.9 万。气候上属暖温带半湿润气候,年均温

* 环保公益性行业科研专项(201109018)资助

† 通讯作者:黄标,Tel:025-86881296,E-mail:bhuang@issas.ac.cn

作者简介:毛明翠(1987—),女,海南儋州人,硕士研究生,主要从事土壤重金属方面的研究。E-mail:maomingcui@126.com

收稿日期:2012-10-09;收到修改稿日期:2013-01-08

约 12.4℃, 年均降水量约 608 mm。整体地形为平原, 土壤类型主要为褐土和潮褐土。该市日光温室蔬菜生产开始于 20 世纪 90 年代, 经过 20 多年的发展, 已成为我国最大的设施蔬菜生产基地, 产地主要集中在分布在中南部乡镇。目前蔬菜种植面积达 $5 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 日光温室达 30 多万个^[8]。本文选取该市中南部的六个镇或街道作为研究区域。

1.2 野外调查

经过实地调查可知, 该市日光温室的建造是将原来种植大田作物的土壤挖掘出来, 堆在温室的北侧, 挖掘深度约 1 m 左右, 然后, 在温室的南侧原地面与北侧堆置的土堆顶部搭上支架, 再在支架上覆上塑料薄膜, 以便使温室接受更多的阳光和保温^[9]。温室建成后, 在挖掘过的底部底土上种植蔬菜。蔬菜种类主要有黄瓜、西红柿和青椒等。经与种植户确认, 由于采用了先进的嫁接技术, 上述蔬菜产量均较高, 每茬的蔬菜产量分别为 250 t hm^{-2} (每年 1~2 茬)、 101.8 t hm^{-2} (每年 2 茬) 和 112.5 t hm^{-2} (每年 1~2 茬), 大约是常规蔬菜生产的 3 倍多, 且大部分种植户产量均较为稳定。

在种植过程中, 施用的主要肥料包括无机肥和有机肥两类, 无机肥包括复合肥、可溶性肥料和钾肥等, 而有机肥包括鸡粪、商品有机肥等, 据估算, 两类肥料每年施用量分别约为 34 和 1800 t hm^{-2} 左右。蔬菜生产过程中, 灌溉用水均来自当地的地下水, 开采深度达 40~100 m, 灌溉时, 常将可溶性肥溶于水中进行沟灌。施用的农药中与重金属相关的主要有两大类, 即代森锰锌类和碱式硫酸铜悬浮剂类农药。日光温室常年处于封闭的状态, 每年夏季约有一个月的时间为休耕期, 此时期大部分种植户采取灌水、喷撒杀菌剂对日光温室土壤进行高温灭菌。

1.3 样品采集与分析

样品采集分三个部分。首先是土壤采集。考虑到各镇(街道)蔬菜大棚规模和日光温室的种植年限, 共采集了 58 个样点的土壤, 样点所在日光温室的种植年限在 1~17 年间, 种植作物均为黄瓜、西红柿和青椒等果类作物。大棚外附近小麦种植地表层和亚表层土壤样品作为 0 蔬菜种植年限。每个土壤样品在一个日光温室内随机采集靠近作物根部的 5 处土壤, 考虑这些果类作物根系影响深度, 采样深度分别为 0~30 cm 和 30~60 cm。各层次土样各自混合均匀后作为一个样品, 共采集了 116 个土壤样品。其次是肥料样品, 在农户施用前采集, 共

22 个, 包括前述的各种肥料。有机肥采集时, 均用土样采集器在肥料堆中采集 5 处 1 m 深度的新鲜样品, 混匀后带回实验室。植物样品在蔬菜收获过程中采集可食部分, 共 10 个, 包括黄瓜、西红柿、青椒等。

土壤样品带回实验室后, 在室温下自然风干, 拣出可见的植物根系、残体后磨细分别过 60 目和 100 目尼龙筛, 保存在塑料袋中供分析之用。化肥样品被磨碎至 100 目备用。有机肥被带回实验室风干后, 磨碎至 100 目备用。植物样品带回实验室后首先用自来水冲洗 2 次, 再用去离子水冲洗 1 次, 晾干附着的水分, 然后称量鲜重, 最后放入烘箱内, 70℃ 条件下通风烘干。烘干后的蔬菜样品粉碎装入密封纸袋, 保存在干燥器中备用。

土壤 pH 采用 pH 计在土水比 1:2.5 的浑浊液中测定。有机质采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定^[10]。重金属元素 As 和 Hg 含量的测定是将土壤和化肥样品经王水消解, 植物和有机肥料经硝酸-高氯酸消解, 采用原子荧光法测定; Cd、Cu、Pb 和 Zn 等元素含量测定是将土壤和化肥样品通过硝酸+高氯酸+氢氟酸消解, 植物和有机肥料样品通过硝酸+双氧水微波消解, 采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定。

1.4 数据处理方法

典型日光温室蔬菜生产系统重金属平衡计算可用下列公式计算^[5]:

$$Q = \sum_{i=1}^m M_i \cdot C_i - \sum_{j=1}^n P_j \cdot C_j$$

式中, Q 为重金属土壤积累量 (g hm^{-2}), m 为肥料或农药的种类, M_i 为每茬蔬菜施用肥料或农药的量 (kg hm^{-2}), C_i 为肥料或农药中重金属含量 (mg hm^{-2}); n 为蔬菜的种类, P_j 为蔬菜每茬的产量 (kg hm^{-2}), C_j 为蔬菜中重金属含量 (mg kg^{-1})。

各土层不同年限与其对应的土壤重金属含量坐标图及线性相关分析采用 SigmaPlot 软件进行, 其中, 相同年限的土壤重金属含量取其平均值。各土层土壤重金属之间相关性分析运用 SPSS 软件进行。

2 结 果

2.1 肥料重金属含量特征

整体看, 各种肥料中重金属含量并不高, 有机肥中 As、Cd、Hg 和 Pb 等元素含量均低于我国有机肥重金属含量限值 (NY525-2011)^[11] (表 1)。相

对而言,Cu、Zn 含量较高。这与有机肥中重金属元素含量特征一致^[12-13]。无机肥中 Zn 和 Cd 的含量

相对较高,但从标准差来看,变异较大,变异系数均超过 100%。

表 1 我国北方某市典型日光温室蔬菜种植施用肥料中重金属元素含量

| 肥料 | 样品数(个) | As | Cd | Cu | Hg | Pb | Zn |
|-----------------------|--------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | (mg kg ⁻¹) | (mg kg ⁻¹) | (mg kg ⁻¹) | (μg kg ⁻¹) | (mg kg ⁻¹) | (mg kg ⁻¹) |
| 鸡粪 | 5 | 1.6 ± 0.4 | 0.5 ± 0.3 | 35.0 ± 3.6 | 50 ± 50 | 7.9 ± 2.7 | 317 ± 156 |
| 商品有机肥 | 2 | 3.7 | 0.2 | 24.8 | 140 | 11.8 | 67 |
| 复合肥 | 6 | 28.0 ± 23.0 | 0.8 ± 1.2 | 3.0 ± 2.1 | 20 ± 20 | 3.5 ± 3.2 | 316 ± 635 |
| 可溶性肥料 | 2 | 12.0 | 1.2 | 0.6 | 3 | 0.4 | 438 |
| 钾肥 | 2 | 4.0 | 6.3 | 2.2 | 3 | 3.1 | 57 |
| 有机肥限值 ^[14] | | 15 | 3 | | 2 000 | 50 | |

2.2 土壤 pH、有机质和重金属含量及相关性特征

研究区表层土壤大多呈碱性,平均达 8.12。有机质含量相对较低,平均值仅为 18.7g kg⁻¹(表 2)。土壤 pH 有随着日光温室蔬菜种植年限的增加而逐渐降低的趋势,而有机质含量则随着种植年限的增

加逐渐增加(图 1)。亚表层土壤 pH 较表层土壤高,有机质含量明显低于表层土壤(表 2)。与表层土壤形成明显对比,这两个性质,在底层土壤中变异很小,没有随着种植年限增加而降低的规律(图 1)。

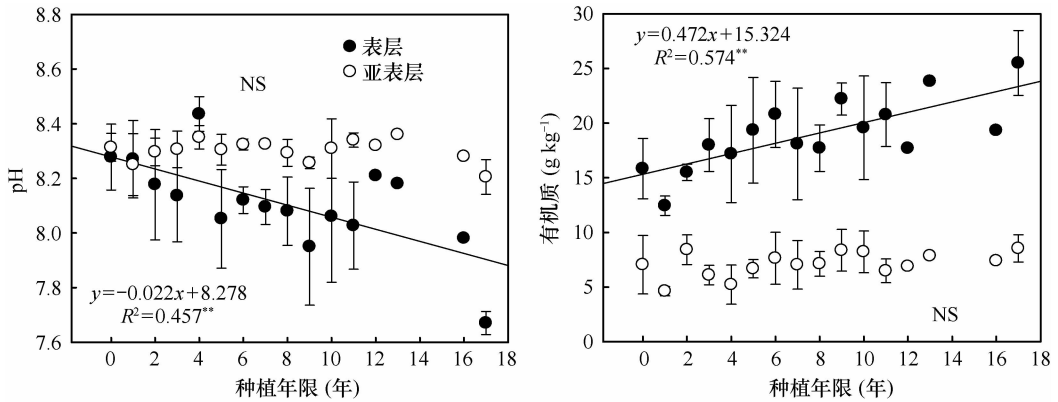
表 2 我国北方某市日光温室蔬菜种植土壤各土层土壤性质与重金属含量

| 项目 | 土层深度(cm) | 平均值 ¹⁾ | 标准差 | 变异系数 | 偏度 | 峰度 |
|--------------------------|----------|-------------------|-------|------|-------|-------|
| pH | 0~30 | 8.12a | 0.20 | 2 | -0.79 | 1.06 |
| | 30~60 | 8.30b | 0.04 | 0.5 | -0.29 | 0.25 |
| 有机质(g kg ⁻¹) | 0~30 | 18.7a | 4.0 | 21 | 0.49 | -0.16 |
| | 30~60 | 7.1b | 1.1 | 16 | -0.75 | 0.26 |
| As(mg kg ⁻¹) | 0~30 | 8.6a | 1.4 | 16 | 0.38 | -0.53 |
| | 30~60 | 9.1a | 1.4 | 15 | -0.25 | 0.15 |
| Cd(mg kg ⁻¹) | 0~30 | 0.32a | 0.40 | 123 | 3.32 | 11.80 |
| | 30~60 | 0.10b | 0.05 | 54 | 4.87 | 28.83 |
| Cu(mg kg ⁻¹) | 0~30 | 32a | 11 | 34 | 2.43 | 7.16 |
| | 30~60 | 22b | 3 | 15 | 0.75 | 0.59 |
| Hg(μg kg ⁻¹) | 0~30 | 0.037a | 0.015 | 40 | 1.08 | 1.36 |
| | 30~60 | 0.024b | 0.013 | 52 | 2.06 | 6.37 |
| Pb(mg kg ⁻¹) | 0~30 | 21a | 3 | 12 | 0.88 | 0.69 |
| | 30~60 | 20b | 2 | 12 | 0.99 | 4.58 |
| Zn(mg kg ⁻¹) | 0~30 | 94a | 27 | 29 | 0.83 | 0.01 |
| | 30~60 | 58b | 8 | 15 | 0.32 | -0.22 |

1)同一列中同一项目字母不同表示不同土层间差异显著

按现行标准,所研究的 As、Hg、Pb、Cu、Zn 等元素在所有表层土壤中的含量均未超出《温室蔬菜产地环境质量评价标准》(HJ333-2006)^[15](pH > 7.5, As: 20 mg kg⁻¹; Hg: 0.35 mg kg⁻¹; Pb: 50 mg kg⁻¹; Cu: 100 mg kg⁻¹; Zn: 300 mg kg⁻¹),其中 As、

Hg、Pb、Cu、Zn 含量,即使在表层中的最大含量,也低于现行标准。而元素 Cd 在表层土壤中的平均含量已接近评价标准(pH > 7.5, Cd: 0.4 mg kg⁻¹),最大值已超出评价标准 5 倍多,底层土壤 Cd 含量的最大值也超出现行标准(表 2)。

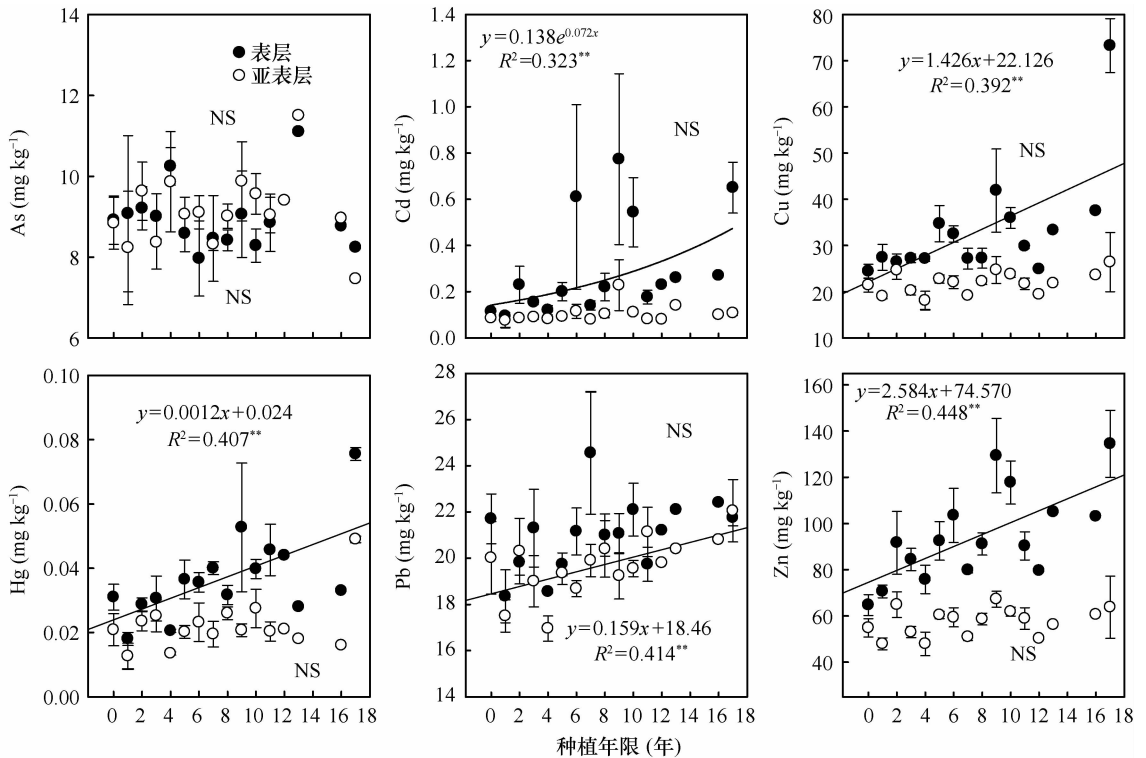


注: NS表示相关性不显著

图1 日光温室蔬菜种植年限与土壤性质的相关关系

除了 As 元素含量在表层与亚表层土壤间没有明显差异外 ($p > 0.05$), 其余元素在表层中含量均明显高于底层 ($p < 0.01$)。从各土层各元素含量的统计参数看, 有如下特点: Cd 和 Hg 元素在表层和亚表层含量变异系数较大, Cd、Cu、Zn 元素表层含量变异系数均明显大于底层; Cd 和 Hg 元素无论是表层土壤还是底层土壤, 其偏度和峰度值均较大, 显示正偏向和高峰度; Cu 元素在表层土壤中也显示了正偏向和高峰度; Pb 元素在亚表层土壤显示出高峰度 (表 2)。

不同种植年限日光温室蔬菜种植土壤重金属含量变化主要表现在表层土壤中 (图 2)。表层土壤中 Cd、Cu、Hg 和 Zn 的含量随着种植年限的增长而增加, 两者之间的相关性达到极显著相关 ($p < 0.01$)。表层土壤 As 和 Pb 未显示此规律。从土壤元素含量与种植年限之间拟合线性方程的斜率可获得每年土壤中重金属的积累量。从图 2 可看出, Cu、Hg 和 Zn 的平均年积累量分别为 1.43、0.002、2.58 mg kg^{-1} 。Cd 元素与种植年限之间呈



注: NS表示相关性不显著

图2 日光温室蔬菜种植年限与土壤重金属含量的相关关系

显著指数正相关,表明随着种植年限的增加年积累量逐渐增加,取其线性相关方程的斜率可作为平均年积累量,为 $0.02 \text{ mg kg a}^{-1}$ 。在亚表层土壤中,除 Pb 元素外,Cd、Cu、Hg 和 Zn 的含量未随着种植年限的增长而有所增加或降低。

详细分析表土层中土壤性质与重金属含量之间的相关关系可看出,土壤 pH 和有机质间达到极显著的负相关(表 3)。同时,较为规律的是,除了元素 As 和 Pb 以外,其余元素均与土壤 pH 呈显著或极显著的负相关,而与土壤有机质含量呈显著或极

显著的正相关。虽然 Pb 元素与土壤性质之间相关性没有达到显著性,但依然存在与其他元素类似的相关趋势。元素按相互间相关关系分为两组,一组为 As 和 Pb 元素,这两元素之间及它们与其他元素之间显著性较弱,仅见 As 与 Hg 元素呈显著负相关,Pb 元素与 Cd 和 Zn 元素间存在显著正相关。另一组元素包括元素 Cd、Cu、Hg、Zn 等元素,它们之间仅 Hg 元素与 Cd 元素间不存在显著相关关系,其余元素对之间均呈现显著正相关关系,且绝大部分呈极显著相关($p < 0.01$)。

表 3 日光温室蔬菜种植土壤各土层土壤性质与重金属含量间相关系数

| 项目 | As | Cd | Cu | Hg | Pb | Zn | pH | OM |
|----|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| As | | -0.14 | 0.08 | -0.26* | 0.14 | -0.06 | 0.25 | -0.2 |
| Cd | 0.29* | | 0.37** | 0.18 | 0.32* | 0.68** | -0.26* | 0.27* |
| Cu | 0.24 | 0.12 | | 0.52** | 0.23 | 0.68** | -0.61** | 0.54** |
| Hg | -0.15 | 0.17 | 0.38** | | 0.20 | 0.31* | -0.48** | 0.39** |
| Pb | 0.34** | 0.03 | 0.55** | 0.30* | | 0.37** | -0.24 | 0.22 |
| Zn | 0.32** | 0.29* | 0.90** | 0.36** | 0.54** | | -0.63** | 0.56** |
| pH | 0.62* | -0.23 | -0.55* | -0.56* | -0.24 | -0.39 | | -0.72** |
| OM | 0.21 | 0.52* | 0.83** | 0.58* | 0.66** | 0.82** | -0.21 | |

注:右上角数字和左下角数字分别表示表层土壤(0~30 cm)和底层土壤(30~60 cm)的相关系数;* 和 ** 分别表示相关系数在 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 条件下显著相关

与表层土壤重金属含量间相关关系不同(表 3),在底层土壤中,仅元素 Cd 与其余元素相关性较弱,仅见其与 Zn 元素间的相关性达到显著水平($p < 0.05$)。其余元素各元素对之间绝大部分达极显著或显著正相关,仅见 As 与 Cu 和 Hg 没有达到显著相关水平。

2.3 蔬菜重金属含量特征

对研究区几种主要蔬菜可食部分的重金属含

量分析表明(表 4),由于主要蔬菜品种均为瓜果类、茄果类,其果实中 As、Cu、Hg、Pb、Zn 等元素的含量均不高,这符合蔬菜重金属的吸收的一般规律^[16-17]。与中国食品污染物限量标准(GB2762-2005)^[18]相比,所有蔬菜的可食部分重金属 As、Hg、Pb 含量明显低于其限量标准,而 Cu、Zn 也明显低于中国食品污染物限量标准(GB18406.1-2001)^[19]的限值,均处于安全级别。

表 4 日光温室新鲜蔬菜可食部分重金属元素含量

| 蔬菜种类 | 样品数 | As ($\mu\text{g kg}^{-1}$) | Cd ($\mu\text{g kg}^{-1}$) | Cu (mg kg^{-1}) | Hg ($\mu\text{g kg}^{-1}$) | Pb ($\mu\text{g kg}^{-1}$) | Zn (mg kg^{-1}) |
|--------|-----|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 黄瓜 | 4 | 6 ± 3 | 1 ± 0.3 | 0.7 ± 0.7 | 0.4 ± 0.2 | 7 ± 5 | 2.6 ± 2.3 |
| 西红柿 | 3 | 1.0 ± 0.1 | 2.0 ± 0.8 | 0.4 ± 0.1 | 0.3 ± 0.1 | 4.0 ± 0.8 | 0.2 ± 0.4 |
| 青椒 | 3 | 2 ± 1 | 4 ± 1 | 0.9 ± 0.4 | 0.4 ± 0.1 | 7 ± 3 | 1.9 ± 0.4 |
| 平均 | | 2 ± 1 | 3 ± 1 | 0.6 ± 0.4 | 0.3 ± 0.1 | 6 ± 2 | 1.5 ± 0.6 |
| 中国安全标准 | | 50 ^[15] | 50 ^[15] | 10 ^[16] | 10 ^[15] | 100 ^[15] | 20 ^[16] |

2.4 蔬菜种植土壤系统重金属平衡状况

经过计算,在日光温室蔬菜地系统中,三种作物生产过程中,重金属输入的主要来源是通过各种肥料的输入,农药施用可带来部分 Cu 和 Zn,但输入量很小,水灌溉带入的量也很少,所以,表 5 仅列出

了肥料输入的各种重金属的量。重金属输入量远远超过了瑞士有机农业检测体系(KRAV)的规定值^[20]。与 2001 年荷兰农业区重金属输入量(Cu 为 350 g hm^{-2} , Zn 为 1000 g hm^{-2} , Cd 为 1.5 g hm^{-2})比较^[21],重金属输入量也较高。

表 5 我国北方某市典型日光温室蔬菜种植系统单季作物管理重金属元素主要输入输出的估算量 (g hm^{-2})

| 蔬菜种类 | 投入/输出量 | As | Cd | Cu | Hg | Pb | Zn |
|------|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 黄瓜 | 有机肥投入量 | 57 ± 35 | 8.5 ± 5.4 | 683 ± 299 | 1.9 ± 1.4 | 216 ± 97 | 4635 ± 3791 |
| | 无机肥投入量 | 46 ± 31 | 59 ± 103 | 7.1 ± 6.3 | 0.03 ± 0.03 | 8.9 ± 9.1 | 771 ± 381 |
| | 果实输出量 | 1.0 ± 0.8 | 0.2 ± 0.1 | 185 ± 177 | 0.1 ± 0.0 | 1.8 ± 1.1 | 639 ± 5834 |
| 西红柿 | 有机肥投入量 | 11.9 | 3.9 | 262 | 0.34 | 59.4 | 2379 |
| | 无机肥投入量 | 17.3 ± 18.3 | 27.2 ± 28.8 | 9.5 ± 10.1 | 0.02 ± 0.02 | 13.4 ± 14.1 | 245 ± 259 |
| | 果实输出量 | 0.07 ± 0.01 | 0.2 ± 0.1 | 41 ± 13 | 0.03 ± 0.00 | 0.5 ± 0.1 | 118 ± 43 |
| 青椒 | 有机肥投入量 | 153 ± 231 | 19 ± 13 | 1636 ± 1401 | 5.3 ± 8.6 | 557 ± 704 | 10109 ± 7012 |
| | 无机肥投入量 | 39 ± 19 | 11 ± 18 | 6.28 ± 5.22 | 0.03 ± 0.01 | 7.9 ± 7.7 | 679 ± 465 |
| | 果实输出量 | 0.3 ± 0.1 | 0.41 ± 0.16 | 96 ± 43 | 0.04 ± 0.01 | 0.8 ± 0.3 | 214 ± 47 |

3 讨 论

由于日光温室全年处于封闭状态,大气沉降污染物加入的可能性小。从日光温室土壤 pH 和有机质含量随着种植年限的增加分别明显减少和增加的变化特点看(图 1),这一规律符合有关设施农业蔬菜种植条件下土壤性质的普遍变化规律^[22]。同时,研究区蔬菜生产是在新鲜的底土上开始种植的,而亚表层的土壤重金属含量在整个研究区均相近(图 2),所以,日光温室表层土壤重金属含量随着设施种植年限的延长而增加的趋势表明土壤产生变化的根本动因是设施蔬菜的生产管理。对日光温室周边小麦种植地而言,表层土壤重金属含量稍高于亚表层土壤。显然,小麦种植对土壤表层重金属的积累作用有限(图 2)。且可以确信,土壤中随着种植年限增加而增加的重金属主要来自各种农用投入品的输入。

上述多方面的结果均显示,土壤中 Cd、Cu、Hg、Zn 等是研究区日光温室蔬菜种植过程中积累的主要重金属。其证据包括:

1) 这几种重金属在表层土壤中均明显高于底层土壤(表 2),且随着种植年限的增加而显著增加(图 2)。其中, Cd 和 Hg 元素变异较大(表 2),表明各日光温室间这两个重金属来源及投入的差异较大,而元素 Cu 和 Zn 变异较小,土壤中的积累较为普遍。至于亚表层中 Pb 元素随着种植年限的增加,可能是背景含量的变化所致,其具体原因有待进一步研究。

2) 表土层土壤性质与重金属含量或各重金属含量之间的相关关系,更确认了上述结论。土壤 pH 和有机质与 Cd、Cu、Hg、Zn 等元素之间有着显著的相关关系,与 As 和 Pb 元素不存在显著的相关关系。

重金属元素之间也是前者四个元素之间关系密切,而与后两个元素间缺乏相关关系(表 3)。这些相关关系与亚表层土中相应的相关关系不同,表明人为作用的深刻影响已经改变了背景的元素分布。

3) 为了了解上述 4 中元素在土壤中积累的可能性,将表 5 中各元素输入和输出的差值转换成 mg kg^{-1} ,结合当地种植实际,以每年两季蔬菜种植来计算, Cd、Cu、Hg、Zn 等元素每年的增加量分别在 0.014 ~ 0.036、0.28 ~ 0.68、0.001 ~ 0.002、0.70 ~ 4.78 mg kg a^{-1} 范围内,尽管估算较为粗略,但与图 2 中获得的元素变化速率还是较为相近的。此外,由于本研究没有进行茎秆的重金属含量测定,而且调查过程中也无法获得茎秆残余量,所以无法获得通过茎秆输出的重金属量,但考虑到该地区这些蔬菜的产量非常大,超过了一般种植方式的 3 倍多,其茎秆所占蔬菜可食部分比例小,所以茎秆输出的重金属量影响不会很大,表明这一估算还是有一定的可信度的。

从输入的肥料样品重金属含量看(表 1),各种肥料中重金属含量并不是特别高,大部分均没有超出目前国家相关的质量标准。但是极度高的施用量输入的重金属还是相当可观的,依然造成了土壤中重金属的积累,给系统带来一定的环境危险性。根据目前土壤中重金属含量、设施蔬菜土壤重金属含量标准值^[15]以及平均的年积累率估算, Cd 在 4 年后平均值即会达到标准限值, Cu、Hg、Zn 平均含量分别在 47、156 和 80 年,可见,土壤中 Cd 元素环境危险性较大。尽管其他重金属还有一定的环境容量,但考虑到土壤性质的变化,随着种植年限的增加土壤 pH 不断降低,会导致这些重金属生物有效性增加^[23],提高其环境危险性。今后对设施蔬菜生产而言,应从两个方面加强环境管理,一方面是制定更严格的肥料重金属含量标准。考虑到肥料

中重金属含量的变异性较大(表 1),还需要对肥料中重金属含量加强监测,防止含量较高的肥料进入系统。另一个更重要的方面是要严格控制各种肥料的施用量,这一管理措施,无论对控制肥料中养分的输入,还是控制重金属的输入量都是有益的。

4 结 论

日光温室蔬菜生产目前的各种农业活动可以导致土壤中某些重金属元素的明显积累,且某些元素的积累已接近环境管理的标准限值。从积累的趋势看,某些元素(如 Cd 元素)有可能在短期内出现普遍超标,再加之,随着蔬菜生产年限的增加,土壤性质也发生了明显变化,其变化可导致重金属生物有效性的增加,这些积累和变化均会给系统带来一定的环境危险性。

由于日光温室蔬菜生产最初均是在底层土壤上开始的,加之封闭的生产环境,背景异常以及其他途径的来源相对较少,土壤中重金属主要应来自各种农用投入品的输入。而各种肥料的高量输入是重金属积累的主要原因。今后对这类设施蔬菜生产的环境管理,除了制定更严格的肥料重金属含量标准外,更重要的是要严格控制各种肥料的施用量,这样即可降低系统养分的输入和盈余,又可减少重金属在土壤的积累,减少蔬菜生产活动对环境的危险性。

参 考 文 献

- [1] 李德成,花建明,李忠佩,等. 不同利用年限蔬菜大棚土壤中微量元素含量的演变. 土壤, 2003, 35(6): 495—499
- [2] 徐勇贤,黄标,史学正,等. 典型农业型城乡交错区小型蔬菜生产系统重金属平衡的研究. 土壤, 2008, 40(2): 249—256
- [3] 刘景红,陈玉成. 中国主要城市蔬菜重金属污染格局的初步分析. 微量元素与健康研究, 2004(21): 42—44
- [4] 师荣光,周其文,赵玉杰,等. 不同土地利用类型下土壤-作物砷的积累特征及健康风险. 土壤学报, 2011, 48(4): 751—758
- [5] 章圣强,郭瑞英,曹靖,等. 白银市日光温室土壤养分累积特征及重金属污染现状评价. 农业环境科学学报, 2010, 29(4): 711—716
- [6] 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. 土壤, 2009, 41(4):

548—555

- [7] 李见云,侯彦林,王新民,等. 温室土壤剖面养分特征及重金属含量演变趋势研究. 中国生态农业学报, 2006, 14(3): 43—45
- [8] 黄霞,李廷轩,余海英. 寿光典型设施栽培土壤重金属含量变化及其风险评价. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(4): 833—839
- [9] 周长吉,杨振声. 准确统一“日光温室”定义的商榷. 农业工程学报, 2002, 18(6): 200—202
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999
- [11] 中华人民共和国农业部. 中华人民共和国农业行业标准(NY525-2011): 有机肥料标准. 2011
- [12] 陈林华,倪吾钟,李雪莲,等. 常用肥料重金属含量的调查分析. 浙江理工大学学报, 2009, 26(2): 223—227
- [13] 朱建华,杨晓磊,严瑾,等. 上海商品有机肥料中重金属含量及影响因素研究[J]. 上海农业学报, 2010, 26(4): 113—116
- [14] 中华人民共和国农业部. 中华人民共和国农业行业标准(NY525-2011): 有机肥料标准. 2011
- [15] 国家环境保护总局. 中华人民共和国国家标准(HJ333-2006): 温室蔬菜产地环境质量评价标准. 2006
- [16] Matos-Reyes M N, Cervera M L, Campos R C, et al. Total content of As, Sb, Se, Te and Bi in Spanish vegetables, cereals and pulses and estimation of the contribution of these foods to the Mediterranean daily intake of trace elements. Food Chemistry, 2010, 122: 188—194
- [17] Huang B, Shi X Z, Yu D S, et al. Environmental assessment of small-scale vegetable farming systems in peri-urban areas of the Yangtze River Delta Region. China Agriculture, Ecosystems and Environment, 2006, 112: 391—402
- [18] 中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国国家标准(GB2762-2005): 食品中污染物限量标准. 2005
- [19] 国家质量监督检验检疫总局. 中华人民共和国国家标准(GB18406.1-2000): 农产品安全质量无公害蔬菜安全要求. 2000
- [20] 易小琳. 瑞士有机农业检测体系(KRAV). 世界农业, 1998(6): 23—24
- [21] Van Noort R B J C, Van Egmond N D. Dutch environmental data compendium. Kluwer: Alphen ann den Rijn, 2001
- [22] 赵彦锋,史学正,于东升,等. 工业型城乡交错区农业土壤Cu、Zn、Pb和Cd的空间分布及影响因素研究. 土壤学报, 2007, 44(2): 227—234
- [23] Ramos-Miras J J, Roca-Perez L, Guzmán-Palomino M, et al. Background levels and baseline values of available heavy metals in Mediterranean greenhouse soils (Spain). Journal of Geochemical Exploration, 2011, 110: 186—192