

# 北京郊区设施菜地剖面中重金属的分布特征

贾月慧, 郭家选, 刘 杰, 王敬贤, 杜景东, 高 凡\*

(农业应用新技术北京市重点实验室/北京农学院植物科学技术学院, 北京 102206)

**摘要:**以北京郊区典型的设施菜地为研究对象,研究了土壤中 Cd、Cr、Cu、Zn、Pb 和 As 6 种重金属的含量和剖面分布特征。结果表明:除 As 外,Cd、Cr、Cu、Zn 和 Pb 含量随着土壤垂直剖面(0~100 cm)的加深而明显下降,表层土壤中(0~20 cm)Cd、Cr、Zn、Cu 和 Pb 的含量,设施菜地比对照(露天菜地)分别提高了 21.8%、11.3%、29.4%、27.6%和 5.8%,而 As 的含量变化不大;在土壤 80~100 cm 的剖面中,Cd、Cr、Cu、Zn、Pb 和 As 6 种重金属的含量比对照分别增加了 12.5%、6.7%、1.4%、1.5%、17.3%和 1.3%。此外,随着种植年限的增加,表层土壤中的 Zn、Cr、Cd、Cu 和 Pb 的含量也显著增加,其积累速率分别为 4.584、0.933 8、0.013 3、1.243 mg·kg<sup>-1</sup>·a<sup>-1</sup> 和 0.641 7 mg·kg<sup>-1</sup>·a<sup>-1</sup>。6 种重金属含量与土壤中的有机质、全氮含量都呈显著的正相关关系,Zn、Cr、Cd、Cu 和 Pb 含量与全磷含量也表现出显著的正相关关系;因此有机肥、化肥的施用可能是设施菜地土壤中重金属含量升高的重要原因。

**关键词:**设施菜地;重金属;累积特征;垂直分布

中图分类号:X833

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2015)03-0282-07

doi: 10.13254/j.jare.2014.0338

## Vertical Distribution of Heavy Metals in Soil of Facility Vegetable Fields from Beijing Suburbs, China

JIA Yue-hui, GUO Jia-xuan, LIU Jie, Wang Jing-xian, DU Jing-dong, GAO Fan\*

(New Technological Key Laboratory of Agricultural Application in Beijing/Plant Science and Technology College, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China)

**Abstract:** The vertical distribution of cadmium (Cd), chromium (Cr), copper (Cu), zinc (Zn), arsenic (As) and lead (Pb) in the soils of the facility vegetable fields from Beijing suburbs were studied. With increasing depth in the soil profile (0~100 cm), the concentrations of heavy metals decreased, except As. By comparison with those of the control (open vegetable fields), the concentrations of Cd, Cr, Cu, Zn and Pb in the soil profile (0~20 cm) of the facility vegetable fields increased 21.8%, 11.3%, 29.4%, 27.6% and 5.8%, respectively, but Cd, Cr, Cu, Zn, Pb and As concentrations in the soil profile (80~100 cm) increased by 12.5%, 6.7%, 1.4%, 1.5%, 17.3% and 1.3%, respectively. Besides, the contents of Zn, Cr, Cd, Cu and Pb in the soil profile (0~20 cm) of facility vegetable fields, had significant positive correlations with planting years, with the accumulation rates of Cd, Cr, Zn, Cu and Pb being 4.584, 0.933 8, 0.013 3, 1.243, 0.641 7 mg·kg<sup>-1</sup>·a<sup>-1</sup>, respectively. Meanwhile, the test six heavy metals contents were significantly positively correlated with the contents of soil organic matter and total nitrogen, and the Zn, Cr, Cd, Cu and Pb contents were significantly correlated with the content of soil total phosphorus, applying organic fertilizer and chemical fertilizer could induce the heavy metals accumulation in the soils of facility vegetable fields to some extent.

**Keywords:** facility vegetable field; heavy metal; accumulation character; vertical distribution

随着设施栽培技术不断推广和壮大,到2010年全国的设施栽培面积将超过166.7万hm<sup>2</sup>,设施蔬菜的人均占有量达到70kg<sup>[1]</sup>,可见设施蔬菜生产正日益成为重要的农业生产方式。由于设施蔬菜的生产已不

再完全受季节栽培的控制,通过人为设定环境条件使得土壤能达到了常年生产的目的,这大大丰富了人们的“菜篮子”,提高了农民的收入,促进了农业经济的发展。但是由于设施菜地上人为覆盖物的存在,使得设施菜地常年处于半封闭状态,所以造成设施菜地空间内气温高、湿度大以及不受外界降雨等淋溶作用,加之高投入、高产和复种指数高等特点,与露天土壤的生态环境条件有了非常明显的差异,特别是肥料(有机肥和化肥)的大量施用,导致设施土壤酸化<sup>[2]</sup>,土壤盐碱化<sup>[3]</sup>,土壤养分不平衡<sup>[4]</sup>以及土壤的结构性、孔

收稿日期:2014-12-01

基金项目:国家自然科学基金(41101467);北京高等学校青年英才计划项目(YETP1715);北京农学院科技创新团队科研能力提升工程“设施园艺产品品质调控的技术研究”(2014)

作者简介:贾月慧(1970—),女,副教授,主要从事土壤重金属与植物营养研究。E-mail: yhjzxd@126.com

\*通信作者:高 凡 E-mail: gaofan0324@163.com

性发生变化<sup>[5]</sup>,土壤病虫害频发<sup>[6]</sup>等一系列问题,人们对此做了大量的研究。但是有关设施菜地中重金属方面的系统研究并不多,研究主要针对在污水灌溉、工矿业污染、大气沉降等露天菜地<sup>[7-9]</sup>,有研究者对山东寿光设施菜地中重金属累积的研究<sup>[10-12]</sup>结果表明设施菜地土壤中 As、Cd、Cu、Zn、Cr、Ni 6 种重金属的含量与小麦地相比,相同土层均明显较高。北京作为设施菜地相对集中、且离城市距离近、农用化学品投入量大的地区,设施菜地中重金属的现状及其发展趋势则尚未见报道。基于此,本文以北京市郊区县主要设施菜地为研究对象,对菜地中 Cu、Zn、Cr、Cd、As、Pb 6 种元素随种植年限在土壤中的垂直分布规律做了相关研究,为设施菜地的合理利用和质量监控提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

北京位于华北平原的西北部,地理位置是东经 115°25'~117°30',北纬 39°28'~41°05',其总面积为 1.64×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,山地面积约占 62%,平原地区约占 38%。地势西北高东南低,其海拔高度为 10~2 303 m,从高向低依次出现山地、丘陵、岗台地、冲洪积平原。北京属于暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均温度为 11.8℃,年平均降雨量为 440~670 mm,大多集中在 7 月下旬和 8 月上旬这段时间。成土母质为各类岩石风化物 and 第四纪疏松沉积物 2 大类<sup>[13]</sup>,采样点主要土类为褐土和潮土,质地为轻壤土,一般一年种植 2~3 茬,采用轮作制,大棚种植的蔬菜主要是生菜、油麦菜、芹菜、西红柿、菜椒等。肥料主要以有机肥和复合肥为主,有机肥主要是市售以鸡粪、牛粪为主的有机肥料,每年施用量为 210.0 t·hm<sup>-2</sup>(以鲜重计),复合肥(N:P:K<sub>2</sub>O=15:15:15)的年累计施用量约为 13.75 t·hm<sup>-2</sup>,所施用的农药多为低毒的生物农药,用地下水灌溉。

### 1.2 采样与分析

采样点主要布置在具有一定规模的商品设施蔬菜基地上,除 6 个采样点的面积小于 1 km<sup>2</sup> 外,其他种植面积均在 1 km<sup>2</sup> 以上,采样点共计 41 个。本试验选取的采样大棚,土壤质地基本为轻壤土,其本底值相对一致,种植蔬菜的种类、日常的管理措施与施肥种类及数量也相对一致,在同一个区的取样点中尽量包含不同种植年限的大棚,并且这些不同种植年限的大棚基本是相邻的,以保证测定结果具有可比性。同时在各采样大棚的周围采集露天菜地的土样作为对照。各大棚的种植年限及数量分别为 1 年(1 个)、2 年

(1 个)、3 年(5 个)、4 年(3 个)、5 年(6 个)、6 年(3 个)、7 年(5 个)、9 年(1 个)、10 年(4 个)、11 年(2 个)、12 年(2 个)、13 年(2 个)、15 年(3 个)、16 年(2 个)、30 年(1 个)。每 3 个大棚为一个采样单元,在每一个采样单元内采用“S”形布点 5~10 个样点,在每个样点用不锈钢土钻按照 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 分层,不同层次的土样混合均匀,用四分法留取 1 kg 土壤作为代表该点的混合样品,装入土袋中。将采集的土壤样品进行风干、粉碎,全部过 1 mm 尼龙筛,然后取其一半左右过 0.25 mm 尼龙筛,最后再取已过 0.25 mm 的土样 100 g 左右在玛瑙研钵上进一步磨碎,过 0.1 mm 的尼龙筛,将各粒径的土样保存到广口瓶中备用。

土壤采用 HNO<sub>3</sub>-HCl 微波消解,ICP-MS 仪测定重金属 Cu、Zn、Cr、Cd、As、Pb。分析过程加入国家标准土壤样品(GSS-3)进行分析质量控制,所用试剂均为优级纯,水为超纯水。

### 1.3 数据处理

根据大棚的种植年限,将测得的数据按照 1~5、6~10、11~15、15 年以上分为不同的组进行分析,用 DPS 软件进行统计,用 LSD 法进行显著性差异分析,用 SigmaPlot 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同种植年限下土壤剖面中重金属分布特征

图 1 是不同种植年限下 6 种重金属的含量在不同深度的变化趋势。由图 1 可以看出,随着土壤深度的增加,6 种重金属的含量都在一定程度上表现为下降趋势,其中 Cd 下降幅度最大,在 1~5、6~10、11~15 年以及 15 年以上时 80~100 cm 土层的含量分别比 0~20 cm 土层中 Cd 的含量下降了 27.5%、52.7%、41.4%和 49.7%,除了 As 外,其他 5 种重金属也表现出随土层加深而含量下降的变化趋势,因此京郊设施菜地中重金属的含量较明显地呈自上而下逐渐降低的垂直变化规律。除 As 在个别土层中的含量外,其他 5 种重金属的含量在种植年限为 1~5、6~10、11~15 年以及 15 年以上各土层均比同一土层的对照土壤中的含量高;就 0~20 cm 土壤各种种植年限下 Cd、Cr、Zn、Cu、Pb 重金属的平均值比对照提高了 21.8%、11.3%、29.4%、27.6%和 5.8%,但是 As 的含量变化不大;而 80~100 cm 土层 6 种重金属的平均值比对照增加 12.5%、6.7%、1.4%、1.5%、17.3%和 1.3%,因此京郊设施菜地土壤 6 种重金属都有一定的积累特征,同时也

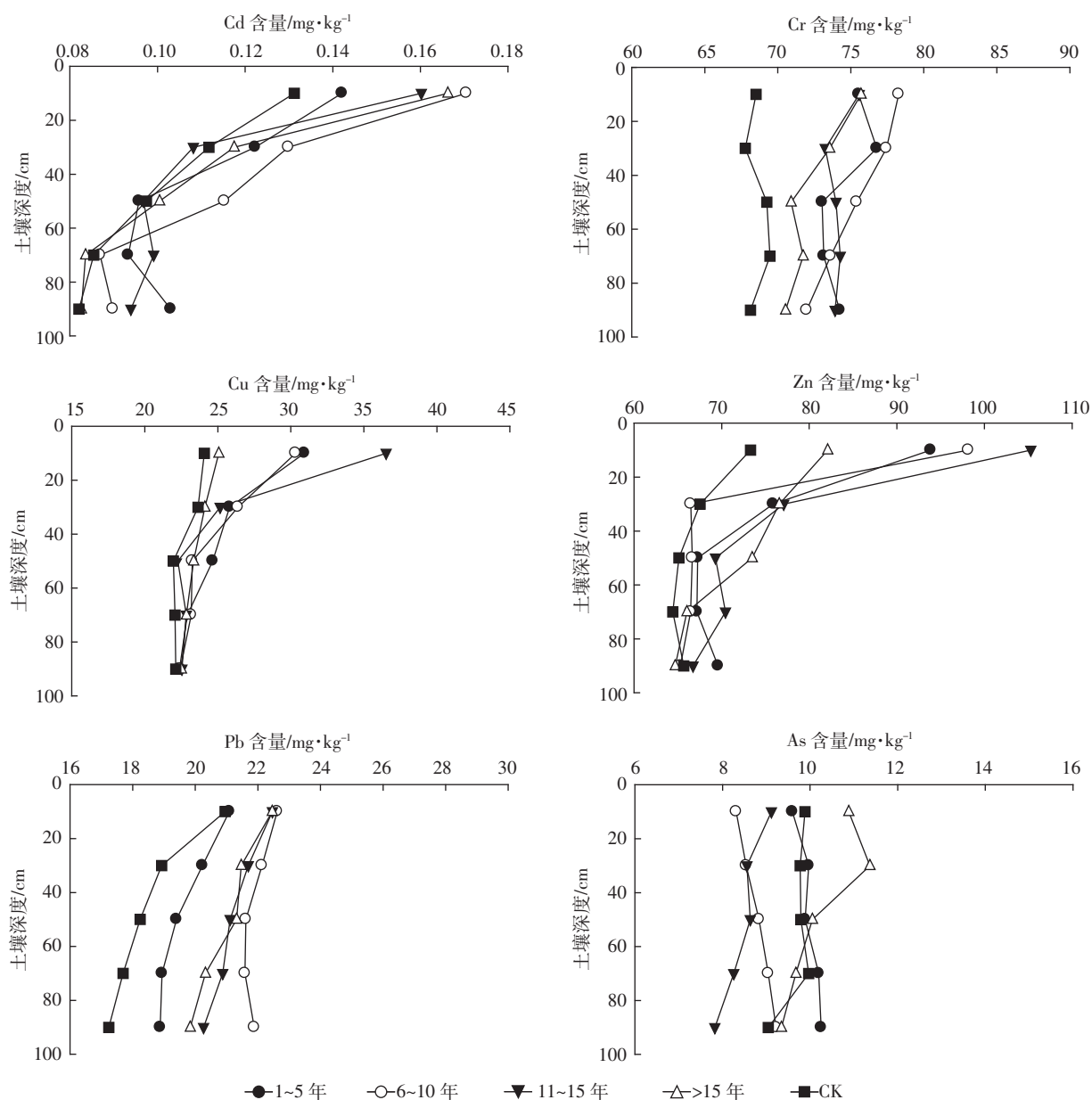


图 1 不同种植年限的土壤剖面各重金属含量的分布

Figure 1 Distribution of heavy metal contents in the profile with different cultivation years

存在向下部土层迁移的趋势。

## 2.2 表层土壤(0~20 cm)中重金属含量随种植年限的变化趋势

将种植年限 15 年以内的菜地土壤中 6 种重金属元素在 0~20 cm 土层中的含量与种植年限之间进行了相关分析,见图 2。由图 2 可以看出,除重金属 As 外,其余 5 种重金属含量都表现出随种植年限的变长而增加的趋势,用  $Y=aX+b$  (式中:Y 是重金属的含量( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),X 是种植年限(年))表示重金属的含量和种植年限的关系,可以得到 0~20 cm 土层 Zn、Cr、Cd、Cu、Pb 含量的年积累速度依次为 4.583 5、0.933 8、

0.013 3、1.242 9、0.641 7  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,耕作层中 Zn 的累积速度每年可达 4.584  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。这些结果表明,在本次试验中 0~20 cm 土层内重金属元素的含量存在随种植年限的增加而累积的现象,其中 Zn、Cu、Cr 以及 Pb 表现的特别明显。而对 20 cm 以下土层中重金属含量与种植年限之间也进行相关分析,但未发现二者间有显著的相关性。

## 2.3 土壤重金属含量与土壤有机质、全氮、全磷含量之间的相关性

将不同深度土层、不同种植年限下,土壤中重金属含量与相应土壤中有机质含量之间进行相关分析,

发现这 6 种重金属含量与土壤有机质含量间均有显著的相关关系(图 3),而且也都可以用关系式  $Y=aX+b$  表示出来(式中: $Y$  代表重金属的含量( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); $X$  代表土壤有机质的含量(%))。土壤中 Cr、Cu、Zn、Cd、As、Pb 的含量与有机质含量的相关系数( $r$ )分别为

0.436、0.625、0.584、0.591、0.481 和 0.453,均达到极显著的正相关。这表明设施菜地中有机质含量的增加可能会导致重金属在土壤中的积累。

表 1 是对设施菜地土壤中 6 种重金属含量与相应土层及年限土壤中全氮和全磷含量的相关分析。结

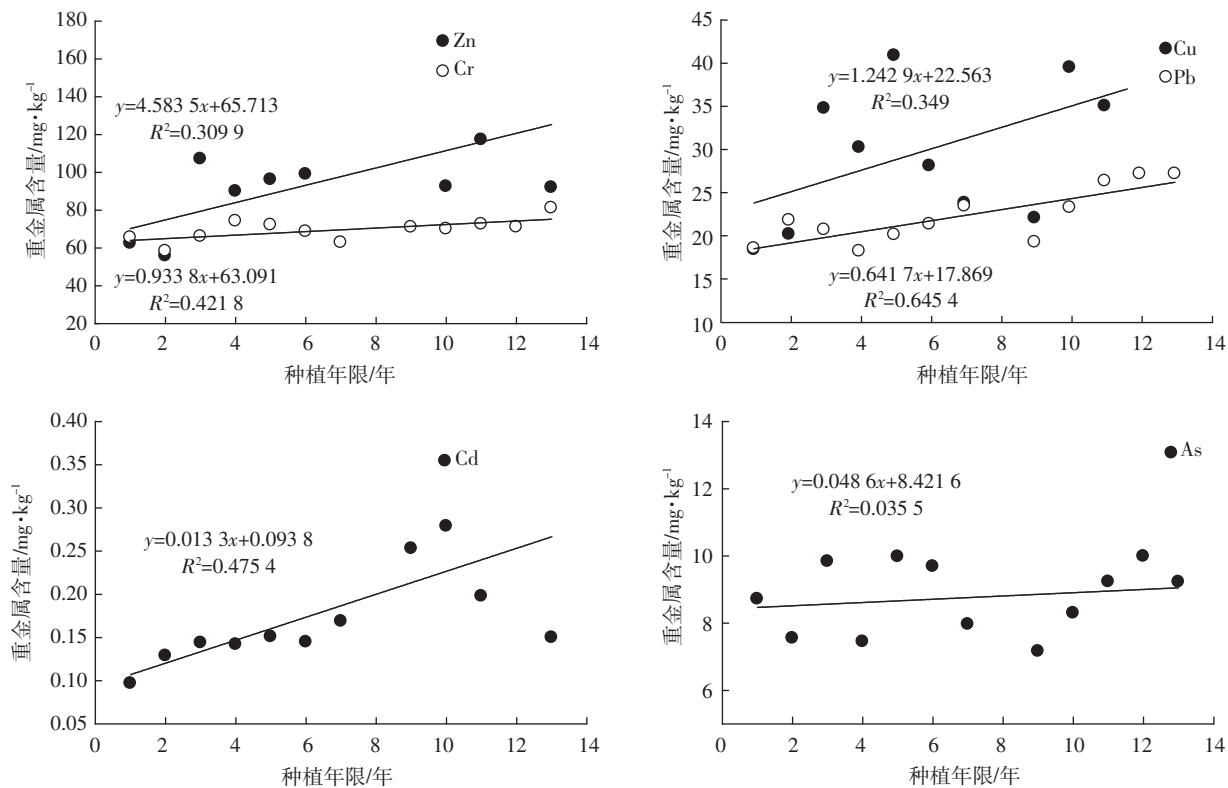


图 2 表层(0~20 cm)土壤各重金属含量与设施栽培年限的相关关系

Figure 2 Correlations between heavy metal contents in surface soil (0~20 cm) and cultivation years

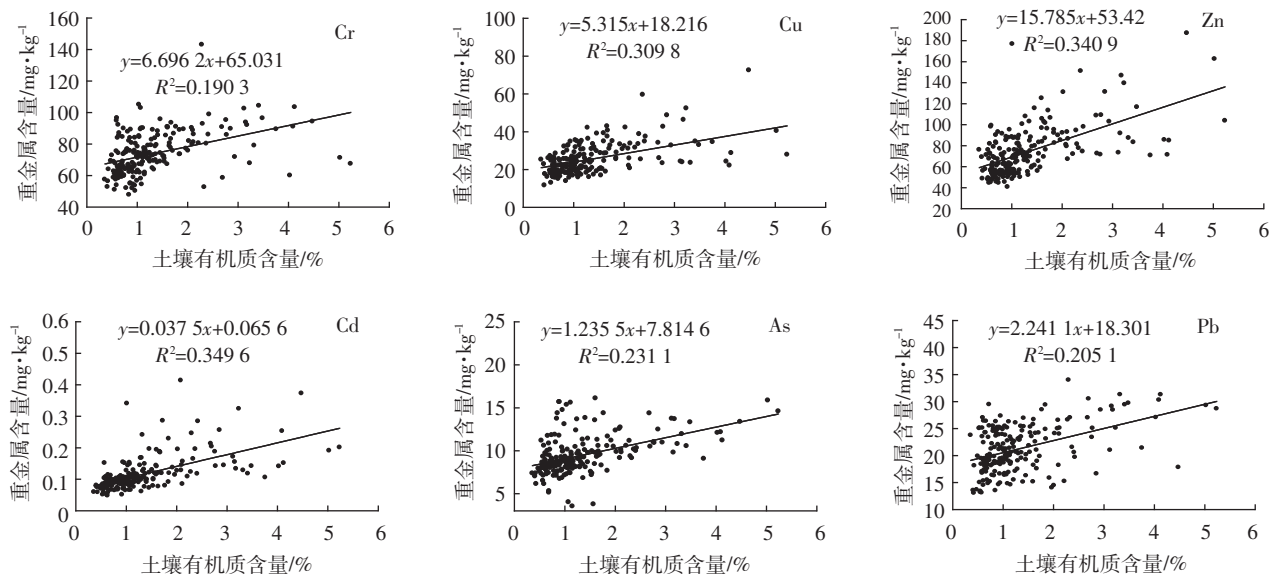


图 3 土壤重金属含量与有机质含量的相关关系

Figure 3 Correlations between heavy metal contents and organic matter contents in soil

表 1 土壤重金属含量与土壤全氮、全磷含量的相关关系

Table 1 Correlation between heavy metal contents and total N, total P contents in soil

| 重金属 | N       | P       | Cr    | Cu      | Zn      | As    | Cd    | Pb |
|-----|---------|---------|-------|---------|---------|-------|-------|----|
| N   | 1       |         |       |         |         |       |       |    |
| P   | 0.597** | 1       |       |         |         |       |       |    |
| Cr  | 0.342*  | 0.480** | 1     |         |         |       |       |    |
| Cu  | 0.467** | 0.532** | 0.084 | 1       |         |       |       |    |
| Zn  | 0.418** | 0.615** | 0.107 | 0.856** | 1       |       |       |    |
| As  | 0.402** | 0.129   | 0.248 | 0.262   | 0.457** | 1     |       |    |
| Cd  | 0.346*  | 0.603** | 0.103 | 0.535** | 0.413** | 0.279 | 1     |    |
| Pb  | 0.554** | 0.366*  | 0.212 | -0.018  | 0.054   | 0.289 | 0.121 | 1  |

注:“\*\*”为  $P<0.01$ ;“\*”为  $P<0.05$ 。

果发现全氮含量与 6 种重金属含量均存在正相关关系,其中 Cu、Zn、As、Pb 达到极显著相关,其  $r$  分别是 0.467、0.418、0.402 和 0.554;除 As 外,其余 5 种重金属含量与土壤全磷含量也达到显著相关,特别是与 Cu、Zn、Cd、Cr 含量的  $r$  分别是 0.532、0.615、0.603、0.480,呈极显著正相关。这表明土壤中重金属的累积可能与菜田施用化肥有一定的关系。同时,各重金属之间也有一定的相关关系,Cu、Zn、Cd 含量达极显著相关,Zn 与 As 含量也达到极显著相关,但 Cr 与 Pb 含量无显著相关,与其他 4 种重金属之间也无明显相关。因此 Cu、Zn、Cd 在土壤中的积累可能具有一定的同源性,Zn 与 As 也可能有相同的来源途径。

### 3 讨论

#### 3.1 设施菜地土壤中重金属积累的原因

由于污水灌溉、工矿开采以及大气沉降,特别是交通密集区产生的尾气等诸多因素造成土壤中重金属的含量不断升高,这一点已被前人的研究所证实<sup>[14]</sup>。但是在设施这种特殊的栽培环境下土壤中重金属含量也逐渐累积,这引起研究者的普遍关注<sup>[15]</sup>。2005 年李见云等<sup>[16]</sup>、2010 年李树辉等<sup>[10]</sup>研究山东寿光,2009 年叶丽丽等<sup>[17]</sup>对长沙,2012 年于志民等<sup>[18]</sup>对黑龙江设施菜地土壤中重金属研究都证实了这一点。从本实验结果看,6 种重金属含量在 0~20 cm 土层中较下部土层高,特别是 Cu、Zn、Cd、Cr 的表聚性明显,也验证了设施菜地中重金属含量在不断累积的结论。之所以重金属在土壤中积累,通过调查发现在北京郊区蔬菜基地每年施入土壤中的有机肥主要是养殖场所产生的鸡粪、猪粪等半腐熟或新鲜的畜禽粪便,而有研究发现<sup>[19]</sup>这些粪肥中含有大量的 Cu、Zn 等重金属,这些重金属主要来源于饲料添加剂<sup>[20]</sup>,因此施用大量的有机肥可能是土壤重金属累积的原因之一。本实验中 Cu、

Zn 的含量与土壤有机质含量之间存在极显著相关关系,也佐证了这一推论。同时设施菜地 0~20 cm 内土壤中 Cd、Cr、Zn、Cu、Pb 的平均含量分别是 0.159 8、76.28、94.86、30.71  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 22.66  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,而对照即露天菜地的含量分别为 0.131 2、68.51、73.30、24.07、20.95  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,因此可以看出这 5 种重金属的含量在设施菜地相对露天菜地都提高了,其中 Cd、Zn、Cu 高出 20%以上,特别是 Zn 的含量提高近 30%,这也说明随着集约化生产、复种指数的提高,在提高土壤有机质含量的同时,也把一些有毒物质带进了土壤。当然施用化肥也有可能引起土壤重金属的累积,本实验通过表 1 中 6 种重金属含量与土壤中氮含量和磷含量的相关分析证实随着施入化肥量的加大,土壤中的重金属含量也在升高,特别是磷肥的施用,有研究发现磷肥对土壤中 Cd 累积的贡献率达 54%~58%<sup>[21]</sup>。尽管中国自产的磷肥中重金属含量相对进口磷肥较低,但长期大量施用也可能会带来土壤重金属的累积<sup>[22]</sup>。因此连年种植后土壤中的重金属也会随之增加,本实验的结果(图 2)、李见云等<sup>[23]</sup>以及刘苹等<sup>[12]</sup>对山东寿光设施菜地土壤的研究都证实了这一点。这些结果应该引起人们的注意,即如何将含有害物质的肥料进行无害化处理是当前研究工作者的首要任务。此外在本实验中尽管有 15 年以上的大棚,但是在调查中发现由于连坐重茬现象严重,棚内大约 30 cm 的土壤都是在种植 10 年左右时被换过,因此本实验中种植年限与重金属含量的关系未列出 15 年以上的大棚。此外还有人研究认为土壤中重金属含量的升高与施用含重金属的农药有关<sup>[24]</sup>,因为设施菜地的利用率高、半封闭环境等特点,为了高产施用农药量大大增加,当然其数量关系有待进一步研究。

#### 3.2 设施菜地土壤中重金属含量的剖面分布

从本实验的研究结果来看,重金属有向下迁移的

趋势。重金属元素的迁移、转化和毒性,除与重金属的含量有关,与重金属元素的存在形态有很大的关系,按照操作定义上划分的类型中 Zn、Cu、Cr、As 残渣态占全量 1/2~2/3 或以上<sup>[25-26]</sup>,而 Pb 的主要存在形态是铁锰结合态,但是 Cd 主要是离子交换态占总量的 1/3<sup>[27]</sup>,因此大部分的重金属在土壤中的移动性很弱,这也可能是当人类活动将重金属带入土壤后,重金属则在表层集聚的原因。但是本实验(图 1)的结果可以看出除 As 外其他 5 种重金属设施菜地土壤在土体中的含量基本都比对照高,说明重金属也在向下移动,影响重金属向下移动的因素前人的研究认为有机质的增加<sup>[8]</sup>、频繁灌溉、干湿交替<sup>[28]</sup>等导致重金属移动性变强,而有机肥的大量施用、大水大肥、高温的特点恰恰是设施菜地环境所具备的。此外,大量的研究也发现设施菜地土壤的酸化严重<sup>[29]</sup>,当土壤中的 pH 值降低时,重金属在土壤中的溶解度会大大升高,因此随灌溉水重金属将向下淋溶,因此土壤酸化也可能是土壤重金属向下移动的主要原因。而在本实验中露天菜地各土层中的重金属含量除 Pb 和 Cd 表层比下部土层的略高外,其他 4 种上下土层中的含量变化不大,其原因可能是有机质施用量相对少,北方冬季休闲、灌溉不及设施菜地中频繁等原因所致。同时李树辉<sup>[30]</sup>的研究发现土壤 pH 值与重金属砷、镉、铜、锌的含量间呈现显著的负相关关系,即土壤 pH 值降低,4 种重金属的总量反而升高,其原因有待进一步研究。

## 4 结论

北京 8 个郊区(县)设施菜地土壤 0~20 cm 的土层内,除 As 外,Cr、Cu、Zn、Cd、Pb 含量比 80~100 cm 土层的含量高出 1.75%、38.3%、34.9%、37.9%和 11.7%,因而呈现一定的“表聚性”特征,同时这 5 种重金属随种植年限的提高含量在显著增加。

设施菜地土壤中 Cr、Cu、Zn、Cd、As、Pb 6 种重金属含量与土壤有机质含量间均有显著的相关关系,其相关系数( $r$ )分别为 0.436、0.625、0.584、0.591、0.481 和 0.453;它们还与全氮含量之间存在正相关关系,同时除 As 外,其余 5 种重金属含量与土壤全磷含量也达到显著相关,这表明土壤中重金属的累积可能与施用大量有机肥以及磷肥有一定的关系。

## 参考文献:

[1] 张志斌. 关于我国设施蔬菜生产可持续发展的探讨[J]. 沈阳农业大学学报, 2000, 31(1): 15-17.

- ZHANG Zhi-bin. Discussion on the sustainable development of vegetable protected production in China[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2000, 31(1): 15-17. (in Chinese)
- [2] Riffaldi R, Saviozzi A, Levi-Minzi, et al. Organically and conventionally managed soils: characterization of composition[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2003, 49: 349-355.
- [3] 姜 勇, 张玉革, 梁文举. 温室蔬菜栽培对土壤交换性盐基离子组成的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 78-81.  
JIANG Yong, ZHANG Yu-ge, LIANG Wen-ju. Influence of greenhouse vegetable cultivation on composition of soil exchangeable base cations [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(6): 78-81. (in Chinese)
- [4] 黄化刚, 张锡洲, 李廷轩, 等. 典型设施栽培地区养分平衡及其环境风险[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 676-682.  
HUANG Hua-gang, ZHANG Xi-zhou, LI Ting-xuan, et al. Nutrient balance and its environmental risks in typical greenhouse system [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2): 676-682. (in Chinese)
- [5] 吴凤芝, 赵凤艳, 刘元英. 设施蔬菜连作障碍原因综合分析与防治措施[J]. 东北农业大学学报, 2000, 31(3): 241-247.  
WU Feng-zhi, ZHAO Feng-yan, LIU Yuan-ying. On the reasons of continuous cropping obstacles in vegetable facility gardening[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2000, 31(3): 241-247. (in Chinese)
- [6] Liu Y, Hua J, Jiang Y, et al. Nematode communities in greenhouse soil of different ages from Shenyang suburb[J]. *Helminthologia*, 2006, 43(1): 51-55.
- [7] 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[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 107: 151-165.
- [8] 章明奎, 刘兆云, 周 翠. 铅锌矿区附近大气沉降对蔬菜中重金属积累的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2010, 36(2): 221-229.  
ZHANG Ming-kui, LIU Zhao-yun, ZHOU Cui. Effect of atmospheric deposition on heavy metal accumulation in vegetable crop near a lead-zinc smelt mine[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Science)*, 2010, 36(2): 221-229. (in Chinese)
- [9] George K A, Singh B. Heavy metals contamination in vegetables grown in urban and metal smelter contaminated sites in Australia[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2006, 169: 101-123.
- [10] 李树辉, 曾希柏, 李莲芳, 等. 设施菜地重金属的剖面分布特征[J]. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2397-2402.  
LI Shu-hui, ZENG Xi-bai, LI Lian-fang, et al. Distribution characteristics of heavy metals in soil profile of facility vegetable fields[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(9): 2397-2402. (in Chinese)
- [11] 黄 霞, 李廷轩, 余海英. 典型设施栽培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 Xia, LI Ting-xuan, YU Hai-ying. Risk assessments of heavy metals in typical greenhouse soils[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(4): 833-839. (in Chinese)

- [12] 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 Ping, YANG Li, YU Shu-fang, et al. Evaluation on environmental quality of heavy metal contents in soils of vegetable greenhouses in Shouguang City[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(5): 66-71. (in Chinese)
- [13] 张凤荣, 赵华甫, 陈 阜, 等. 都市型现代农业产业布局[M]. 北京: 中国石油大学出版社, 2007: 194.  
ZHANG Feng-rong, ZHAO Hua-fu, CHEN fu, et al. Adjusting industrial structures agriculture in city countryside[M]. Beijing: China University of Petroleum, 2007: 194. (in Chinese)
- [14] 曾路生. 寿光设施蔬菜土壤有效态 Hg、As、Cu 和 Zn 含量的变化[J]. 环境化学, 2013, 23(2): 1743-1748.  
ZENG Lu-sheng. Available Hg, As, Cu and Zn content in vegetable greenhouse soil of Shouguang[J]. *Enironmental Chemistry*, 2013, 23(2): 1743-1748. (in Chinese)
- [15] 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 Xi-bai, LI Lian-fang, MEI Xu-rong. Heavy metal content in soils of vegetable-growing lands in China and source analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(11): 2507-2517. (in Chinese)
- [16] 李见云, 侯彦林, 化全县, 等. 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 Jian-yun, HOU Yan-lin, HUA Quan-xian, et al. Variation of soil nutrient and heavy metal concentrations in greenhouse soils[J]. *Soils*, 2005, 37(6): 626-629. (in Chinese)
- [17] 叶丽丽, 王翠红, 邹 玲, 等. 长沙市郊蔬菜土壤重金属含量及其与土壤肥力的关系[J]. 湖南农业科学, 2009(10): 32-35.  
YE Li-li, WANG Cui-hong, ZOU Ling, et al. The relationship between soil fertility and contents of heavy-metal elements in garden soils at suburban areas of Changsha City[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2009(10): 32-35. (in Chinese)
- [18] 于志民, 沈 光, 吕 品, 等. 黑龙江省典型蔬菜大棚土壤重金属污染评价[J]. 腐蚀酸, 2012(5): 14-17.  
YU Zhi-min, SHEN Guang, LÜ Pin, et al. Evaluation of heavy metals pollution of typical vegetable greenhouse soils in Heilongjiang Province[J]. *Eurasian Soil Science*, 2012(5): 14-17. (in Chinese)
- [19] 张树清, 张夫道, 刘秀梅, 等. 规模化养殖畜禽粪主要有害成分测定分析研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 822-829.  
ZHANG Shu-qing, ZHANG Fu-dao, LIU Xiu-mei, et al. Determination and analysis on main harmful composition in excrement of scale livestock and poultry feedlots[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(6): 822-829. (in Chinese)
- [20] 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 Ping, JIN Sheng-yang, HAO Xiu-zhen, 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. (in Chinese)
- [21] 何振立. 污染及有益元素的土壤化学平衡[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998: 129-130.  
HE Zhen-li. Soil chemical balance of pollution and beneficial elements [M]. Beijing: China Environmental Sciences Press, 1998: 129-130. (in Chinese)
- [22] 高志岭, 刘建玲, 廖文华. 磷肥施用与镉污染的研究现状及防治对策[J]. 河北农业大学学报, 2001, 24(3): 90-94.  
GAO Zhi-ling, LIU Jian-ling, LIAO Wen-hua. Situation of cadmium pollution caused by application of phosphate fertilizer and the counter-measure of prevention and control of cadmium[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2001, 24(3): 90-94. (in Chinese)
- [23] 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[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(3): 43-45.  
LI Jian-yun, HOU Yan-lin, WANG Xin-min, et al. Profile characteristics of available nutrients and heavy metal concentrations in greenhouse soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(3): 43-45. (in Chinese)
- [24] 安 琼, 董元华, 王 辉. 苏南某市农田土壤有毒有害元素分布状况及影响因素[J]. 土壤, 2005, 37(2): 147-151.  
AN Qiong, DONG Yuan-hua, WANG Hui. Distribution of harmful chemical elements in agricultural soil of south Jiangsu, China[J]. *Soils*, 2005, 37(2): 147-151. (in Chinese)
- [25] 王其枫. 广东省主要菜地土壤重金属形态分级研究[D]. 武汉: 华中农业大学硕士学位论文, 2012.  
WANG Qi-feng. Fractionation of heavy metals in the main vegetable soils in Guangdong Province[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University Master Degree Dissertation, 2012. (in Chinese)
- [26] 杨乐超. 重庆云阳地区重金属形态特征及生态效应[D]. 成都: 成都理工大学工程硕士学位论文, 2012.  
YANG Le-chao. On the distribution, speciation and bioavailability of heavy metals in the soils at Yunyang, Chongqing China[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology Master Degree Dissertation, 2012. (in Chinese)
- [27] 代杰瑞, 郝兴中, 庞绪贵, 等. 典型土壤环境中重金属元素的形态分布和转化——以山东烟台为例[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32(6): 713-718.  
DAI Jie-rui, HAO Xing-zhong, PANG Xu-gui, et al. Distribution and transformation of heavy metals in typical soil environments: A case study in Yantai[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2013, 32(6): 713-718. (in Chinese)
- [28] Merckx R, Brans K, Smolders E. Decomposition of dissolved organic carbon after soil drying and rewetting as an indicator of metal toxicity in soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33: 235-240.
- [29] 邓玉龙, 张乃明. 设施土壤 pH 值与有机质演变特征研究[J]. 生态环境, 2006, 15(2): 367-370.  
DENG Yu-long, ZHANG Nai-ming. Soil pH and organic matter in greenhouse[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(2): 367-370. (in Chinese)
- [30] 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: 中国农业科学院博士论文, 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 of Agricultural Sciences Degree Dissertation, 2011. (in Chinese)