

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017120501

梁蕾, 李季, 杨合法, 等. 长期温室菜地土壤重金属累积状况及污染评价[J]. 环境化学, 2018, 37(7): 1515-1524.

LIANG Lei, LI Ji, YANG Hefa, et al. Soil heavy metal accumulation and risk assessment in a long-term vegetable-growing greenhouse [J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(7): 1515-1524.

## 长期温室菜地土壤重金属累积状况及污染评价\*

梁蕾<sup>1</sup> 李季<sup>2</sup> 杨合法<sup>3</sup> 张萍<sup>1</sup> 黄玮祎<sup>1</sup> 王琳<sup>1\*\*</sup>

(1. 河南大学环境与规划学院, 开封, 475004; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京, 100193;  
3. 中国农业大学曲周实验站, 曲周, 057250)

**摘 要** 为研究温室菜地种植对土壤重金属含量的影响,以中国农业大学曲周实验站长期定位试验土壤为研究对象,分析了土壤重金属含量累积变化特征并对其进行了污染评价.结果表明,与河北省重金属土壤背景值相比,0—40 cm 土壤重金属 Cd、Cr、Cu、Zn、Pb 的含量均有不同程度的累积,其中 Cd 和 Cu 累积程度最高;除 As 和 Ni 外,0—20 cm 土壤重金属 Cd、Cr、Cu、Zn、Pb 的含量均有随种植年限的增长而增加的趋势;0—20 cm 土壤 Cd、Cu、Zn 含量均分别显著高于 20—40 cm 土壤 Cd、Cu、Zn 含量 ( $P < 0.05$ ), 0—20 cm 土壤 As 含量显著低于 20—40 cm 土壤 As 含量;0—20 cm 土壤中,重金属 Cu、Pb、Ni、Cr 与土壤 pH 呈显著负相关关系 ( $P < 0.05$ ). 根据《土壤环境质量标准》(GB15618—1995)二级标准限值评价,2016 年曲周实验站温室菜地 0—20 cm 土壤重金属环境质量处于轻污染状态,其中重金属 Cd 是主要的污染因子.

**关键词** 长期温室菜地, 重金属, 土壤污染, Cd.

## Soil heavy metal accumulation and risk assessment in a long-term vegetable-growing greenhouse

LIANG Lei<sup>1</sup> LI Ji<sup>2</sup> YANG Hefa<sup>3</sup> ZHANG Ping<sup>1</sup> HUANG Weiyi<sup>1</sup> WANG Lin<sup>1\*\*</sup>

(1. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng, 475004, China;

2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing, 100193, China;

3. Quzhou Experimental Station, China Agricultural University, Quzhou, 057250, China)

**Abstract:** In order to research the impact of greenhouse vegetable growing on soil heavy metal accumulation, we measured heavy metal concentrations, analyzed their variation characteristics, and evaluated their pollution status based on a long-term experiment which has been conducted in a vegetable-growing greenhouse located at the Quzhou Field Research Station in Hebei Province, China. The results showed that the contents of Cd, Cr, Cu, Zn and Pb accumulated in different degrees in 0—40 cm soil compared with the background values of soil heavy metals in Hebei Province, among which the accumulation rates of Cd and Cu were the highest. The contents of soil heavy metals Cd, Cr, Cu, Zn and Pb in 0—20 cm soil layer increased with the increasing of plantation years except As and Ni. We also found that the contents of Cd, Cu and Zn in 0—20 cm soil were significantly higher than those in 20—40 cm soil layer, but the content of As in 0—20 cm soil was significantly lower than that in 20—40 cm soil layer ( $P < 0.05$ ). In addition, there was a significant negative correlation between the heavy metal Cu, Pb, Ni, Cr and soil pH ( $P < 0.05$ ). According to Environmental Quality Standards for soil (GB15618—1995), the soil environment

2017 年 12 月 5 日收稿 (Received: December 5, 2017).

\* 国家自然科学基金(51309093)和河南省高等学校重点科研项目(15A610009)资助.

**Supported by** the National Science Foundation of China (51309093) and Key Scientific Research Projects of Colleges and Universities in Henan Province (15A610009).

\*\* 通讯联系人, Tel: 15937848363, E-mail: wanglin@henu.edu.cn

**Corresponding author**, Tel: 15937848363, E-mail: wanglin@henu.edu.cn

quality of long-term greenhouse vegetable field in the Quzhou Field Research Station was lightly polluted by heavy metals in 2016, in which Cd is the main pollution factor.

**Keywords:** long-term vegetable-growing greenhouse, heavy metal, soil pollution, Cd.

随着菜地土壤环境质量和健康质量逐渐引起人们的关注,关于菜地土壤重金属富集累积及其污染的研究越来越多.一些研究已表明,我国菜地土壤重金属含量与全国土壤背景值相比出现了明显的富集累积现象<sup>[1-2]</sup>,且以 Cd 和 Hg 的累积较为明显;相比于露天菜地、农田、林地等土地利用方式,温室菜地土壤中 Cr、Ni、Cu、As、Cd、Pb、Zn 等重金属积累最多<sup>[2-6]</sup>,温室菜地重金属含量随种植年限的增加而不断累积<sup>[7-10]</sup>,导致相应的环境风险增加,其中土壤 Zn 含量随土壤深度的增加呈下降趋势,而且与温室种植年限呈显著正相关( $P < 0.01$ ).分析显示<sup>[10]</sup>,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,而且,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;同时,很多地方蔬菜存在不同程度的重金属污染<sup>[10-13]</sup>,叶菜类蔬菜对 Cd 的富集能力最强,部分叶菜中的 Cd 含量超过了食品中污染物限量标准<sup>[12]</sup>.因此,了解温室蔬菜生产中土壤环境和健康现状及其主控因子,探明温室菜地土壤重金属的含量状况及累积特征,为防控土壤重金属污染、保障蔬菜质量安全提供可靠有力的数据参考成为亟待解决的问题.

本文以曲周实验站长期定位试验的温室土壤为研究对象,研究日光温室菜地土壤重金属的累积特征;旨在阐明温室蔬菜土壤主要重金属的变化规律,评价其土壤环境状况随时间的变化情况,为土壤重金属防控与温室蔬菜的无污染生产技术体系提供参考.

## 1 材料与方法 (Materials and methods)

### 1.1 试验地概括

本试验为长期定位试验,开始于 2002 年 3 月,在中国农业大学曲周实验站(36°52'N, 115°01'E)进行,实验站位于河北省邯郸市曲周县北部,属温带半湿润季风气候区,光、热、水等气候资源比较丰富,但受季风的强烈影响,冬春寒冷干燥,夏季温暖多雨,属一年两熟种植区.年均降雨量 604 mm.

试验采用的日光温室为拱圆式,长 60 m、宽 7 m,面积为 420 m<sup>2</sup>.日光温室管理参照当地主要生产模式(表 1),施用少量干鸡粪、化肥的使用品种为尿素(含氮 46%)、磷酸二铵(含氮 14%、含磷 40%)等.病虫害的防治以化学防治为主.

试验的供试土壤为改良后的盐化潮土,并属于盐碱地改造土<sup>[39]</sup>.试验地基础土壤肥力水平基本相同(原始土样取于 2002 年试验开始之前).

表 1 日光温室养分投入、农药施用及灌溉情况

Table 1 Average input of nutrients, pesticides and irrigations in the long-term experiments

N/ (kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /(kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	K <sub>2</sub> O /(kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	每年喷药次数 Spraying times	施用量 Use rate/ (kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	每年灌溉次数 Irrigation times	灌溉量 Irrigation capacity/ (mm·a <sup>-1</sup> )
861.50	327.00	281.25	20	29.10	8	390

### 1.2 样品采集与分析

本试验采取 3 次土样.采样时间分别为 2012 年 10 月、2013 年 10 月、2016 年 10 月.采样方法:用土钻进行取样,取样深度分别为 0—20 cm、20—40 cm 位于植株行内并且距植株主根 10 cm 处,按 S 型选取 16 个点,每相邻 4 个点为 1 个混合样.

新鲜土样去除植物残体、根系和可见的土壤动物(如蚯蚓)等,室内风干后研磨过尼龙筛(10 目),一部分用于土壤理化性质分析,一部分继续研磨过尼龙筛(100 目),用于土壤重金属含量分析.

土壤 pH 采用电位法( $V$ (蒸馏水): $m$ (土壤) = 2.5:1)测定,土壤有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定.土壤重金属 Cd、Cr、Pb、Zn、Cu 全量分析采用  $\text{HNO}_3$ -HF- $\text{HClO}_4$  消解,ICP-MS(X SERIES2)测定的方法.具体如下:称取 0.1000 g 过 100 目的风干土样于聚四氟乙烯消解管中,加入 10 mL 浓硝酸,振荡后于通风橱内放置一夜;将消解管放置消解仪中,在 120℃ 下消解 1 h,冷却 10 min 后加入氢氟酸 3.5 mL,振荡后继续在 140℃ 下消解 1 h,冷却 10 min 后加入高氯酸 1 mL,振荡并在 160℃ 下消解 1 h,接着在 180℃ 下继续消解到不再冒白烟为止.冷却 30 min 后加入 1 mL 硝酸溶液( $V/V$ , 1:1).将溶液转移至 50 mL 容量瓶中,并用去离子水定容.将容量瓶中溶液过滤至小白瓶中,并用 ICP-MS(X SERIES2)测定.

土壤 As 全量分析采用王水消解-原子荧光法(AFS-3100 双道原子荧光计)进行测定.具体如下:称取过 100 目风干土样 0.2000 g 于 25 mL 比色管中,加入 3 mL 王水( $V/V$ , 9:1),振荡后置于沸水浴中分解 1 h,中途摇动 2—3 次.取下冷却,加入 5% 硫脲和 5% 抗坏血酸的混合溶液 5 mL,摇匀后,用含  $5.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  酒石酸的  $3.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  HCL 稀释至刻度,澄清后用原子荧光仪进行测定.样品分析过程中用环境土壤标准样品 GSS-8 进行分析质量控制.

### 1.3 土壤环境质量评价标准与方法

重金属污染的作用因素既可能是单一的,也可能是多元的.所以采用单项污染指数法和综合污染指数法相结合进行评价.

单项污染指数评价采用以下公式

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

式中, $P_i$ 为第  $i$  种污染物的单因子指数; $C_i$ 为第  $i$  种污染物的测定值; $S_i$ 为第  $i$  种污染物的污染评价标准值.

综合土壤环境质量评价采用内梅罗指数综合指数法.内梅罗综合指数是一种兼顾极值或突出最大值的加权型多因子环境质量指数,其在加权过程中避免了人为主观因素的影响,因此评价结果比较客观,能够全面反映土壤中各污染物的平均污染水平,强调主导因子的影响作用,但在求均值过程中弱化或强化一些因素的作用.

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

式中, $P_{\text{综}}$ 为综合评价指数; $P_i$ 为第  $i$  种污染物的单因子指数; $\text{Ave } P_i$ 为土壤中各污染指数的平均值; $(P_i)_{\text{max}}$ 为土壤中最大污染物的单因子指数.土壤重金属污染标准限值参考表 2,土壤重金属污染等级采用《土壤环境监测技术规范》进行评定<sup>[18]</sup>.

表 2 土壤重金属评价参考标准( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

Table 2 The evaluation standard of soil heavy metal( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

项目 Item	pH	Pb	Cd	Cr	As	Ni	Cu	Zn
河北省土壤背景值 <sup>1)</sup> Soil background value	7.9	21.5	0.094	68.3	13.6	30.8	21.8	78.4
土壤环境质量标准 <sup>2)</sup> Soil environment quality Standard	一级自然背景	35	0.20	90	15	40	35	100
	二级 <6.5	250	0.3	150	40	40	50	200
	6.5—7.5	300	0.3	200	30	50	100	250
	>7.5	350	0.6	250	25	60	100	300
	三级 >6.5	500	1.0	300	40	200	400	500
食用农产品产地环境 质量评价标准 <sup>3)</sup>	<6.5	50	0.30	150	30	40	50	200
	6.5—7.5	50	0.30	200	25	50	100	250
	>6.5	50	0.40	250	20	60	100	300
温室蔬菜产地环境质量 评价标准 <sup>4)</sup>	<6.5	50	0.30	150	30	40	50	200
	6.5—7.5	50	0.30	200	25	50	100	250
	>6.5	50	0.40	250	20	60	100	300

注:1)背景值来自《中国土壤元素背景值》<sup>[14]</sup>;2)GB15618—1995,土壤环境质量标准<sup>[17]</sup>;3)HJ/T 332—2006,食用农产品产地环境质量评价标准<sup>[15]</sup>;4)HJ/T 333—2006,温室蔬菜产地环境质量评价标准<sup>[16]</sup>.

同时,本文还采用《食用农产地环境质量评价标准》以及《温室蔬菜产地环境质量评价标准》作为另

—评价依据(表2)<sup>[15-16]</sup>.《温室蔬菜产地环境质量评价》中根据污染指标的毒理学特性和蔬菜吸收、富集能力将评价指标分为严格控制指标(Cd、As、Pb、Cr、Cu)和一般给控制指标(Zn、Ni)两类.严格控制指标依据各单项质量指数进行评价,一般控制指标依据环境要素综合质量指数评定.

$$\text{单项质量指数} = \text{单项实测值} / \text{单项标准值} \quad (3)$$

$$\text{单项分担率} = (\text{某单项质量指数} / \text{各项质量指数之和}) \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{各环境要素综合质量指数} = \sqrt{\frac{(\text{平均单项质量指数})^2 + (\text{最大单项质量指数})^2}{2}} \quad (5)$$

#### 1.4 数据处理

数据处理及图表分析应用 Excel、SPSS 19.0 软件.

## 2 结果与讨论(Results and discussion)

### 2.1 温室蔬菜土壤理化性质统计分析

温室蔬菜土壤理化性质统计分析结果如表3所示.对于土壤 pH,不同种植年限对 0—40 cm 土壤 pH 有显著影响,2016 年 0—20 cm 土壤 pH 相比 2012 年土壤 pH 显著下降了 0.22 个单位( $P < 0.05$ ); 2016 年 20—40 cm 土壤 pH 相比 2012 年土壤 pH 显著下降了 0.36 个单位.20—40 cm 土壤 pH 显著高于 0—20 cm 土壤 pH.

对于土壤有机质,不同种植年限对 0—40 cm 土壤有机质含量有显著影响,2016 年 0—20 cm 土壤有机质含量相比 2012 年增加了 16.69%; 0—20 cm 土壤有机质含量显著高于 20—40 cm 土壤( $P < 0.05$ ).

表3 温室蔬菜土壤理化性质统计分析

Table 3 Statistical analysis of soil physicochemical properties in a long-term vegetable-growing greenhouse

Item	Soil layer	Sampling time		
		2012 年	2013 年	2016 年
pH	0—20 cm	7.67±0.21	7.86±0.17	7.45±0.10
	20—40 cm	8.36±0.06	8.37±0.17	8.00±0.08
有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	0—20 cm	21.39±2.15	19.50±4.14	24.96±2.63
	20—40 cm	4.18±0.37	7.31±3.27	8.64±3.48

综合来看,温室蔬菜土壤 pH 随土壤层次加深而增加,有机质随着土壤层次的加深而降低,与邓玉龙等<sup>[19-20]</sup>的研究结果一致.随着种植年限的增加,土壤 pH 总体有下降的趋势,其原因<sup>[24]</sup>主要是土壤硝态氮和速效磷及有机质的累积,与井永萍<sup>[21-23]</sup>等的研究结果一致.但在 2013 年 0—40 cm 土壤 pH 有所上升,而土壤有机质含量有所下降,出现此现象的原因可能是由于 2013 年采样时土壤中温湿度较高,微生物活性较强,致使土壤有机质的矿化比较快,不利于有机质的快速积累.

### 2.2 温室蔬菜土壤重金属含量统计分析

曲周实验站温室蔬菜土壤重金属含量统计分析结果如图1所示.对于 0—20 cm 土壤,与河北省土壤重金属背景值相比,各重金属累积程度大小排序为: Cd>Cu>Zn>Pb>Cr>As>Ni(2012 年)、Cd>Cu>Zn>Cr>Pb>As>Ni(2013 年)、Cd>Cu>Zn>Cr>Pb>Ni>As(2016 年).由此可见,除 As 含量与土壤背景值的水平接近,而 Ni 平均含量明显低于河北省土壤背景值外,其它重金属均有不同程度的积累,其中土壤重金属 Cd 和 Cu 累积程度最高:土壤 Cd 平均含量分别为 0.31(2012 年)、0.35(2013 年)、0.35(2016 年) mg·kg<sup>-1</sup>,分别比河北省土壤重金属 Cd 背景值(0.094 mg·kg<sup>-1</sup>)高出 229.8%、272.3%、272.3%;土壤 Cu 含量分别为 45.97(2012 年)、48.71(2013 年)、52.51(2016 年) mg·kg<sup>-1</sup>,分别比河北省土壤重金属 Cu 背景值(21.8 mg·kg<sup>-1</sup>)高出 110.9%、123.4%、140.9%.白玲玉等<sup>[3]</sup>研究了设施菜地的 Cr、Ni、Cu、As、Cd、Zn 等 7 种重金属,Cd 和 Cu 的累积程度较为严重,与本研究结果一致.而曾希柏等<sup>[2]</sup>发现设施菜地的 Cu、Cr 含量超标较为突出,同时应警惕 Cd 和 As 的问题.从累积趋势上看,除 As 和 Ni 外,其余重金属含量总体均有随种植年限的增长而增加的趋势,研究表明<sup>[10]</sup>土壤中随种植年限增加而增加的重金属均来自各种农用投入品(肥料、农药等)的输入.在常用的几类化学肥料中,通常氮素肥料和钾肥的重金属含量

较低,但磷肥以及一些含磷复合肥会混杂重金属<sup>[25-27]</sup>.不合格磷肥的施用是土壤中 Cd 累积的重要原因之一<sup>[28-30]</sup>;在人类活动对土壤 Cd 的贡献中,磷肥施用药 54%—58%<sup>[31]</sup>.王美<sup>[32]</sup>对肥料中重金属的含量状况进行了系统总结和分析,结果表明过磷酸钙中 Zn、Cu、Cd、Pb 含量高于氮肥、钾肥和三元复合肥,有机—无机复混肥料中的 Pb 含量高于其他化肥。

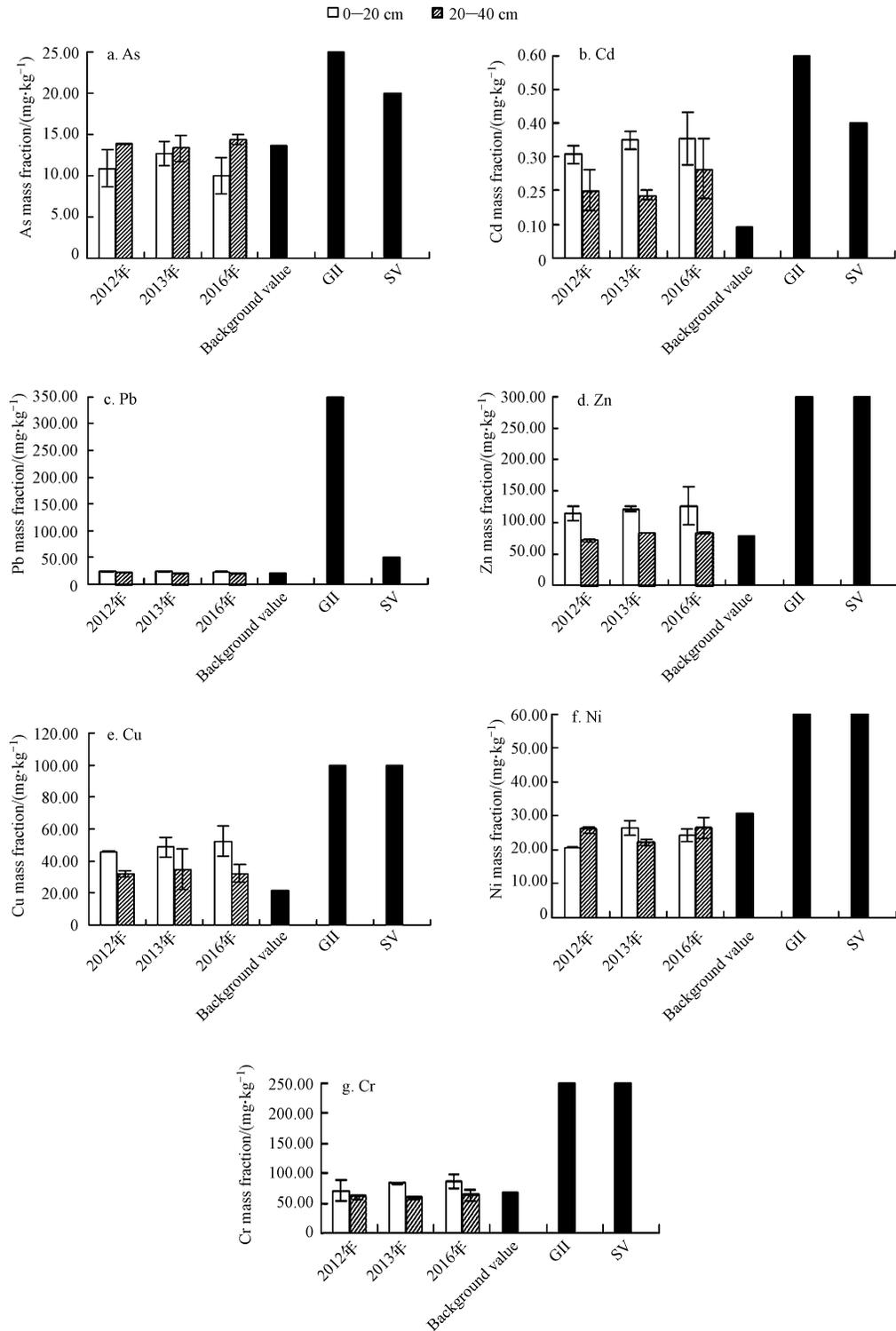


图 1 温室蔬菜土壤重金属质量分数统计分析

注:图中“background value”采用《中国土壤元素背景值》<sup>[14]</sup>中的标准值;“G II”为《土壤环境质量标准》中的二级标准值;“SV”为《食用农产品产地环境质量评价标准》和《温室蔬菜产地环境质量评价标准》中蔬菜产地各相应重金属元素的限量值<sup>[15-16]</sup>。

Fig.1 Descriptive statistics for heavy metal mass fraction in a long-term vegetable-growing greenhouse

对于 20—40 cm 土壤,与河北省土壤重金属背景值相比,各重金属累积程度大小排序为: Cd>Cu>Pb>As>Zn>Cr>Ni(2012 年)、Cd>Cu>Zn>As>Pb>Cr>Ni(2013 年)、Cd>Cu>Zn>As>Pb>Cr>Ni(2016 年)。由此可见,土壤重金属 Cd 和 Cu 累积程度最高;土壤 Cd 含量分别为 0.20(2012 年)、0.19(2013 年)、0.26 mg·kg<sup>-1</sup>(2016 年),分别比河北省土壤重金属 Cd 背景值(0.094 mg·kg<sup>-1</sup>)高出 112.8%、102.1%、176.6%,总体趋势呈上升状态;土壤 Cu 含量分别为 32.03(2012 年)、35.05(2013 年)、32.25 mg·kg<sup>-1</sup>(2016 年),分别比河北省土壤重金属 Cu 背景值(21.8 mg·kg<sup>-1</sup>)高出 46.9%、60.8%、47.9%,变化趋势不明;土壤重金属 Ni 未呈现累积状态,其含量小于土壤重金属背景值。从累积趋势上看,相对于 0—20 cm 土壤,20—40 cm 土壤重金属含量随种植年限的变化趋势不明显,这与毛明翠等<sup>[10]</sup>研究结果一致。

对比 0—20 cm 与 20—40 cm 土层重金属含量累积变化,温室菜地 0—20 cm 土壤 Cd、Cu、Zn 含量均分别显著高于 20—40 cm 土壤( $P<0.05$ ),表明土壤重金属 Cd、Cu、Zn 主要在 0—20 cm 土壤累积。这是由于重金属进入菜地生态系统后,常被土壤强烈吸附和固定,Pb、Cd、Hg 大部分积累于耕作层土壤,不易向下层迁移,易被蔬菜吸收。夏增禄等<sup>[36]</sup>、丁中元等<sup>[37]</sup>研究结果表明,重金属元素主要集中在土壤耕作层。在污染土壤中,重金属进入土壤中,由于土壤对其吸附固定能力较强,不易向下迁移,多集中分布在表层 0—20 cm,尤其以 0—10 cm 的表层为最高。0—20 cm 土壤 As 含量显著低于 20—40 cm 土层 As 含量,其原因<sup>[38]</sup>可能是 As 的挥发性和在土层的向下迁移行为。

### 2.3 温室蔬菜土壤 pH、有机质与重金属间相关性特征

从土壤性质与重金属含量之间的相关关系可看出,土壤 pH 和有机质间达到显著的负相关关系(表 4)。这与伊田等<sup>[24]</sup>的研究结果一致。对于 0—20 cm 土壤,除了元素 As 以外,其余元素均与土壤 pH 呈显著的负相关,而与土壤有机质含量呈较弱的正相关;元素间相关关系除 Ni 和 As 外,其余元素之间均呈现显著或极显著正相关( $P<0.01$ )。对于 20—40 cm 土壤,仅有重金属 Cd 与 Zn 与土壤 pH 呈显著负相关,元素 As 与土壤有机质呈显著负相关,其余元素与土壤 pH 和土壤有机质含量间相关性没有达到显著性,但依然存在与 Cd 和 Zn 类似的相关趋势。

表 4 温室蔬菜土壤各土层土壤性质与重金属含量间相关系数

Table 4 Correlation coefficient between soil properties and heavy metals in a long-term vegetable-growing greenhouse

Item	As	Cd	Cu	Pb	Zn	Ni	Cr	pH	有机质
As		0.070	0.147	-0.054	0.178	0.009	0.164	0.334	-0.455*
Cd	0.306		0.746**	0.890**	0.743**	0.403*	0.617**	-0.193	0.218
Cu	0.188	0.300		0.808**	0.866**	0.692**	0.752**	-0.528*	0.126
Pb	0.308	0.691**	0.322		0.869**	0.379	0.754**	-0.450*	0.301
Zn	0.227	0.875**	0.535*	0.536*		0.458*	0.708**	-0.370	0.520*
Ni	0.337	0.340	0.724**	0.714*	0.576*		0.598*	-0.642**	0.504*
Cr	0.129	0.870**	0.547*	0.134	0.643**	0.449		-0.483*	0.238
pH	0.221	-0.419*	-0.268	-0.142	0.445*	-0.046	-0.135		-0.743**
有机质	-0.505*	0.055	0.050	0.079	0.068	0.286	0.034	-0.594*	

注:右上角数字和左下角数字分别表示 0—20 cm 土壤和 20—40 cm 土壤的相关系数;\* 和 \*\* 分别表示相关系数在  $P<0.05$  和  $P<0.01$  条件下显著相关。

### 2.4 温室蔬菜土壤重金属污染状况评价结果

依《土壤环境质量标准》和《土壤环境监测技术规范》,对曲周实验站温室菜地土壤重金属含量评价结果表明(图 2),对于 0—20 cm 土壤, $P_i$ 由高到低依次为: Cd>Cu>As>Cr>Ni>Zn>Pb(2012 年); Cd>Cu>As>Ni>Zn>Cr>Pb(2013 年); Cd>Cu>Zn>Ni>Cr>As>Pb(2016 年)。2012 年和 2013 年  $P_i$ 均小于 1.0,处于 I 级水平,属于“清洁(安全)”的等级(图 2);2016 年试验田除  $P_{Cd}$ 大于 1.0,处于 III 级水平,属于“轻污染”的等级(图 2)外,其余均属于“清洁(安全)”的等级。温室菜地土壤  $P_{综}$ 分别为 0.47(2012 年)、0.53(2013 年)、1.13(2016 年),处于 I 级、I 级、III 级水平,属于“清洁(安全)、清洁(安全)、轻污染”等级,说明 2016 年土壤重金属含量超标,蔬菜可能受到污染。

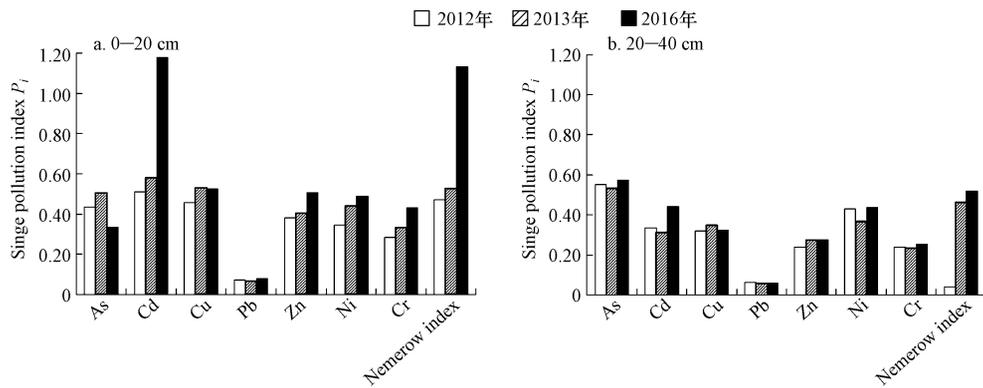


图2 温室菜地土壤重金属单项、综合污染指数

Fig.2 Single pollution index and Nemerow index of soil heavy metal in a long-term vegetable-growing greenhouse

对于 20—40 cm 土壤,  $P_i$  由高到低依次为:  $As > Ni > Cd > Cu > Zn = Cr > Pb$  (2012 年);  $As > Ni > Cu > Cd > Zn > Cr > Pb$  (2013 年);  $As > Ni = Cd > Cu > Zn > Cr > Pb$  (2016 年). 2012 年、2013 年和 2016 年  $P_i$  均小于 1.0, 处于 I 级水平, 属于“清洁(安全)”的等级(图 2). 温室菜地土壤  $P_{综}$  分别为 0.04 (2012 年)、0.46 (2013 年)、0.52 (2016 年), 处于 I 级水平, 属于“清洁(安全)”的等级.

分别依《食用农产品产地环境质量评价标准》和《温室蔬菜产地环境质量评价标准》对曲周试验站温室菜地土壤进行评价, 结果如表 5、6 所示. 对于 0—20 cm 土壤(表 5), 重金属 Cd 单项质量指数分别为 0.77 (2012 年)、0.87 (2013 年)、1.18 (2016 年), 属于“尚清洁(II 级)、尚清洁(II 级)、超标(III 级)”的等级; 其余重金属元素均  $\leq 0.7$ , 属于“清洁(I 级)”的等级. 温室菜地土壤综合质量指数分别为 0.68 (2012 年)、0.76 (2013 年)、1.15 (2016 年), 属于“清洁(I 级)、尚清洁(II 级)、超标(III 级)”的等级, 土壤已处于重金属超标污染的状态. 各项评价指标中, 土壤 Cd 单项质量指数和分担率均高于其他指标, 单项分担率越大则该指标影响越大, 严格控制指标中, 土壤 Cd 和 Cr 单项质量指数稳步增长, 土壤 Pb 和 As 单项质量指数均有所起伏; 相比之下, 一般控制指标单项质量指数基本处于稳定状态, 增长幅度不大; 单项分担率基本相同.

表 5 温室菜地(0—20 cm)土壤环境质量评价

Table 5 Assessment of soil environmental quality in a long-term vegetable-growing greenhouse (0—20 cm)

指标 index	2012 年温室菜地土壤		2013 年温室菜地土壤		2016 年温室菜地土壤		
	单项质量指数 Single quality index	单项分担率 Single share ratio/%	单项质量指数 Single quality index	单项分担率 Single share ratio/%	单项质量指数 Single quality index	单项分担率 Single share ratio/%	
严格控制指标 Strict control index	Cd	0.77	23.48	0.87	23.68	1.18	29.48
	Pb	0.48	14.78	0.48	12.91	0.47	11.72
	As	0.54	16.67	0.63	17.18	0.40	10.02
	Cr	0.28	8.72	0.33	9.04	0.43	10.81
一般控制指标 General control index	Ni	0.34	10.55	0.44	11.96	0.49	12.21
	Zn	0.38	11.66	0.40	10.86	0.51	12.65
	Cu	0.46	14.14	0.53	14.37	0.53	13.13
各环境要素综合质量指数 Comprehensive quality index		0.68		0.76		1.15	
环境质量等级 Environmental quality grade		清洁 I		尚清洁 II		超标 III	

对于 20—40 cm 土壤(表 6), 2012—2013 年各评价指标单项质量指数以及土壤综合质量指数均  $\leq 0.7$ , 环境质量等级均处于“I 级, 清洁”水平. 在 2016 年, 严格控制指标中土壤 Cd 的单项质量指数(0.66)临近于 I 级界限值( $\leq 0.7$ ), 应特别注意该重金属的污染风险; 土壤 As 的单项质量指数(0.72)和土壤综合质量指数(0.76)已超过 I 级界限值, 环境质量等级处于“II 级, 尚清洁”水平, 土壤环境已处于

警戒线值,应特别注意土壤重金属污染风险.各项评价指标中,土壤 Cd 和 As 单项质量指数和分担率均高于其他指标,单项分担率越大则该指标影响越大.

表 6 温室菜地(20—40 cm)土壤环境质量评价

Table 6 Assessment of soil environmental quality in a long-term vegetable-growing greenhouse (20—40 cm)

指标 index		2012 年温室菜地土壤		2013 年温室菜地土壤		2016 年温室菜地土壤	
		单项质量指数 Single quality index	单项分担率 Single share ratio/%	单项质量指数 Single quality index	单项分担率 Single share ratio/%	单项质量指数 Single quality index	单项分担率 Single share ratio/%
严格控制指标 Strict control index	Cd	0.50	17.58	0.47	16.95	0.66	21.43
	Pb	0.44	15.44	0.40	14.43	0.41	13.39
	As	0.69	24.12	0.67	24.11	0.72	23.27
	Cr	0.24	8.31	0.23	8.49	0.25	8.23
一般控制指标 General control index	Ni	0.43	15.07	0.37	13.32	0.44	14.25
	Zn	0.24	8.29	0.28	10.03	0.28	8.97
	Cu	0.32	11.19	0.35	12.67	0.32	10.46
各环境要素综合质量指数 Comprehensive quality index		0.57		0.59		0.76	
环境质量等级 Environmental quality grade		清洁 I		清洁 I		尚清洁 II	

注:表中单项质量指数根据式 3) 计算得到;单项分担率根据式 4) 计算得到;各环境要素综合质量指数,根据式 5) 计算得到.表中各评价指标计算所需标准值以及环境质量等级划定分别依照《食品农产品产地环境质量评价标准》和《温室蔬菜产地环境质量评价标准》进行<sup>[15-16]</sup>.

### 3 结论 (Conclusion)

(1) 曲周实验站温室菜地 0—20 cm 和 20—40 cm 土壤重金属 Cd、Cu、Zn、Cr、Pb 均有不同程度的累积,重金属 As 和 Ni 未呈现累积状态,其中重金属 Cd、Cu 累积程度最高;从累积趋势上看,除 As 和 Ni 外,其余 0—20 cm 土壤重金属含量均有随种植年限的增长而增加的趋势,20—40 cm 土壤重金属随种植年限的变化趋势不明显.

(2) 不同种植年限对土壤 pH 和有机质含量有显著影响,且二者之间存在显著的负相关关系.0—20 cm 土壤中除 As 外,其余元素与土壤 pH 呈显著的负相关,元素间多数呈显著的正相关.

(3) 依《土壤环境质量标准》、《食用农产品产地环境质量评价标准》和《温室蔬菜产地环境质量评价标准》,对曲周实验站温室菜地土壤重金属质量分数评价结果表明,20—40 cm 土壤环境处于重金属“清洁(安全)”的等级;0—20 cm 土壤环境在 2016 年处于重金属“轻污染”的水平,其中重金属 Cd 是主要的污染因子.

### 参考文献 (References)

- [1] 王丽英,陈丽莉,张彦才,等.河北省设施蔬菜土壤微量金属元素状况评价及来源分析[J].华北农学报,2009,24(Z2): 268-272.  
WANG L Y, CHEN L L, ZHANG Y C, et al. The evaluation and sources analysis of heavy metal and micro-element in soil for protected vegetable in Hebei Province[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2009, 24(Z2): 268-272 (in Chinese).
- [2] 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 soil of vegetable-growing lands in China and source analysis[J]. Scientia Agricultura Ssinica, 2007, 40(11): 2507-2517 (in Chinese).
- [3] 白玲玉,曾希柏,李莲芳,等.不同农业利用方式对土壤重金属累积的影响及原因分析[J].中国农业科学,2010,43(1): 96-104.  
BAI L Y, ZENG X B, LI L F, et al. Effects of land use on heavy metal accumulation in soils and source analysis[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(1): 96-104 (in Chinese).
- [4] 陈永,黄标,胡文友,等.设施蔬菜生产系统重金属积累特征及生态效应[J].土壤学报,2013,50(4): 693-702.  
CHEN Y, HUANG B, HU W Y, et al. Heavy metals accumulation in greenhouse vegetable production systems and its ecological effects

- [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(4): 693-702 (in Chinese).
- [5] 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 (in Chinese).
- [6] 马智宏, 王北洪, 王纪华, 等. 不同种植方式下土壤中重金属分布的研究及评价[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(13): 5596-5598.
- MA Z H, WANG B H, WANG J H, et al. Research and evaluation on the distribution of heavy metals in soil under different planting models[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(13): 5596-5598 (in Chinese).
- [7] 刘小诗, 李莲芳, 曾希柏, 等. 典型农业土壤重金属的累积特征与源解析[J]. *核农学报*, 2014, 28(7): 1288-1297.
- LIU X S, LI L F, ZENG X B, et al. Characterization of heavy metal accumulation in typical agriculture soils and its source analysis[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2014, 28(7): 1288-1297 (in Chinese).
- [8] 李见宏, 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 J Y, HOU Y L, HUA Q X, et al. Variation of soil nutrient and heavy metal concentrations in greenhouse soils[J]. *Soils*, 2005, 37(6): 626-629 (in Chinese).
- [9] 王俊, 郭颖, 吴蕊, 等. 不同种植年限和施肥量对日光温室土壤锌累积的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(1): 89-94.
- WANG J, GUO Y, WU R, et al. Effects of different planting years and organic manure fertilization on Zn accumulation in greenhouse soil[J]. *Journal of Agricultural Environment Science*, 2009, 28(1): 89-94 (in Chinese).
- [10] 毛明翠, 黄标, 李元, 等. 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[J]. *土壤学报*, 2013, 50(4): 835-841.
- MAO M C, HUANG B, LI Y, et al. Trends of heavy metals accumulation in soils for vegetable farming in sunlight greenhouse in north China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(4): 835-841 (in Chinese).
- [11] 马智宏, 李吉进, 潘立刚, 等. 不同有机肥处理对土壤及芹菜中重金属残留的影响[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(21): 9181-9183.
- MA Z H, LI J J, PAN L G, et al. The influence of different organic fertilizer on the heavy metal residual in the soil and celery[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(21): 9181-9183 (in Chinese).
- [12] 胡文友, 黄标, 马宏卫, 等. 南方典型设施蔬菜生产系统镉和汞累积的健康风险[J]. *土壤学报*, 2014, 51(5): 1045-1055.
- HU W Y, HUANG B, MA H W, et al. Health risk of accumulation of cadmium and mercury in greenhouse vegetable production systems typical of south China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(5): 1045-1055 (in Chinese).
- [13] 吴燕明, 吕高明, 周航, 等. 湘南某矿区蔬菜中 Pb、Cd 污染状况及健康风险评估[J]. *生态学报*, 2014, 34(8): 2146-2154.
- WU Y M, LV G M, ZHOU H, et al. Contamination status of Pb and Cd and health risk assessment on vegetables in a mining area in southern Hunan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(8): 2146-2154 (in Chinese).
- [14] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- China National Environmental Monitoring Centre. Chinese soil element background values[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990 (in Chinese).
- [15] 国家环境保护总局. HJ/T 332-2006 食用农产品产地环境质量评价标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- State Environmental Protection Administration of China. HJ/T 332-2006 Environmental quality evaluation standards for farmland of edible agricultural products[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2007 (in Chinese).
- [16] 国家环境保护总局. HJ/T 333-2006 温室蔬菜产地环境质量评价标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- State Environmental Protection Administration of China. HJ333-2006 Environmental quality evaluation standard for farmland of greenhouse vegetables production [J]. Beijing: China Environmental Science Press, 2007 (in Chinese).
- [17] 国家环境保护局. GB 15618—1995 土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- State Environmental Protection Administration of China. GB 15618—1995 Soil environmental quality standard [S]. Beijing: China Standards Press, 1995 (in Chinese).
- [18] 国家环境保护总局. HJ/T 166—2004 土壤环境监测技术规范[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
- State Environmental Protection Administration of China. HJ/T 166—2004 The technical specification for soil environmental monitoring[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2004 (in Chinese).
- [19] 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 Y L, ZHANG N M. Soil pH and organic matter in greenhouse[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(2): 367-367 (in Chinese).
- [20] 李粉茹, 于群英, 邹长明. 设施菜地土壤 pH 值、酶活性和氮磷养分含量的变化[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(1): 217-222.
- LI F R, YU Q Y, ZOU C M. Variations of pH value, enzyme activity and nitrogen phosphorus content in protected vegetable soils[J]. *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(1): 217-222 (in Chinese).
- [21] 井永萍, 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 Y P, LI Y, BO L J, 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 (in Chinese).

- [22] 张菊,董杰,邓焕广,等. 山东聊城不同种植年限蔬菜大棚土壤理化性质的演变[J]. 土壤通报, 2016, 47(5): 1120-1125.  
ZHANG J, DONG J, DENG H G, et al. Temporal changes of soil physiochemical properties in vegetable greenhouse in Liaocheng, Shandong Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(5): 1120-1125 (in Chinese).
- [23] 武建华,刘文辉,郭永东,等. 日光温室土壤盐分、pH及重金属垂直分布特征研究[J]. 山西农业科学, 2007, 35(9): 67-70.  
WU J H, LIU W H, GUO Y D, et al. Vertical distribution of soil salinity, pH value and heavy metal in sunlight greenhouse[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2007, 35(9): 67-70 (in Chinese).
- [24] 伊田,梁东丽,王松山,等. 不同种植年限对设施栽培土壤养分累积及其环境的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(7): 112-116.  
YI T, LIANG D L, WANG S S, et al. Effect of different cultivation years on nutrients accumulation and environment impacts of facilities cultivation soil[J]. Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.), 2010, 38(7): 112-116 (in Chinese).
- [25] 王超起,麻壮伟. 某些市售化肥的重金属含量水平及环境风险[J]. 农村生态环境, 2004, 20(2): 62-64.  
WANG Q C, MA Z W. Heavy metal in chemical fertilizer and environmental risks[J]. Rural Ecological Environment, 2004, 20(2): 62-64 (in Chinese).
- [26] 陈海燕,高雪,韩峰. 贵州省常用化肥重金属含量分析及评价[J]. 耕作与栽培, 2006(4): 18-19.  
CHEN H Y, GAO X, HAN F. Analysis and evaluation of heavy metal content in common chemical fertilizer in Guizhou[J]. Tillage and Cultivation, 2006(4): 18-19 (in Chinese).
- [27] 陈林华,倪吾钟,李雪莲,等. 常用肥料重金属含量的调查与分析[J]. 浙江理工大学学报, 2009, 26(2): 223-227.  
CHEN L H, NI W Z, LI X L, et al. Investigation of heavy metal concentrations in commercial fertilizers commonly-used[J]. Journal of Zhejiang Science and Technology University, 2009, 26(2): 223-227 (in Chinese).
- [28] Tyler G, Balsberg AMB, Bengtsson G, et al. Heavy-metal ecology of terrestrial plants, microorganisms and invertebrates. A review[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1989, 47(3/4): 189-215.
- [29] MCLAUGHLIN M J, SINGH B R. Cadmium in Soils and Plants[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1999: 110-113.
- [30] 鲁如坤,时正元,熊礼明. 我国磷矿磷肥中镉的含量及其对生态环境影响的评价[J]. 土壤学报, 1992, 29(2): 150-157.  
LU R K, SHI Z Y, XIONG L M. Cadmium contents of rock phosphates and phosphate fertilizers of China and their effects on ecological environment[J]. Acta Pedologica Sinica, 1992, 29(2): 150-157 (in Chinese).
- [31] 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 Z L. Soil chemical balance of pollution and beneficial elements[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1998: 129-130 (in Chinese).
- [32] 王美,李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 466-480.  
WANG M, LI S T. Heavy metals in fertilizers and effect of fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(2): 466-480 (in Chinese).
- [33] 薛延丰,石志琦. 不同种植年限设施地土壤养分和重金属含量的变化特征[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 125-130.  
XUE Y F, SHI Z Q. Characteristics of soil nutrient and heavy metal content with the different years of cultivation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(4): 125-130 (in Chinese).
- [34] 楚纯洁,王章涵,周金凤,等. 设施菜地和露天菜地的土壤重金属含量及累积特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(4): 125-132.  
CHU C J, WANG Z H, ZHOU J F, et al. Contents and accumulation characteristics of heavy metals in open and protected vegetable soils [J]. Journal of Northwest A&F University(Nat. Sci. Ed), 2013, 41(4): 125-132 (in Chinese).
- [35] 周凯,王智芳,马玲玲,等. 新乡市郊区大棚菜地土壤重金属 Pb、Cd、Cr 和 Hg 污染评价[J]. 生态环境学报, 2013, 22(12): 1962-1968.  
ZHOU K, WANG Z F, MA L L, et al. Pollution and assessment of soil heavy metal Cd, Cr, Pb and Hg in greenhouse vegetable fields of Xinxiang suburb, China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(12): 1962-1968 (in Chinese).
- [36] 丁中元. 重金属在土壤-作物中分布规律研究[J]. 环境科学, 1989, 10(5): 78-84.  
DING Z Y. Study on the distribution of heavy metals in soil crops[J]. Environmental Science, 1989, 10(5): 78-84 (in Chinese).
- [37] 夏增禄,李森照,穆从如,等. 北京地区重金属在土壤中的纵向分布和迁移[J]. 环境科学学报, 1985, 5(1): 105-112.  
XIA Z L, LI S Z, MU C R, et al. Vertical distribution and transfer of heavy metals in soils of Beijing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1985, 5(1): 105-112 (in Chinese).
- [38] 杨振兴,周怀平,解文艳,等. 长期施肥对土壤及玉米籽粒中 Pb、As 含量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4827-4836.  
YANG Z X, ZHOU H P, XIE W Y, et al. Effect of long-term fertilization on Pb, As contents of soil and maize grain[J]. Science Agriculture Sinica, 2015, 48(23): 4827-4836 (in Chinese).
- [39] 张阿克,韩卉,杨合法,等. 常规、无公害和有机蔬菜生产模式对土壤性状的影响[J]. 江苏农业学报, 2013, 29(6): 1345-1351.  
ZHANG A K, HAN H, YANG H F, et al. Effect of conventional, low-input and organic vegetable cropping systems on soil properties[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Science, 2013, 29(6): 1345-1351 (in Chinese).