

姚荣江, 杨劲松, 谢文萍, 等. 江苏沿海某设施农区土壤重金属累积特点及生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8): 1498–1506.

YAO Rong-jiang, YANG Jin-song, XIE Wen-ping, et al. Accumulation and potential ecological risk assessment of heavy metals in greenhouse soils from coastal area of Jiangsu Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8):1498–1506.

江苏沿海某设施农区土壤重金属累积特点及生态风险评价

姚荣江^{1,2}, 杨劲松^{1,2*}, 谢文萍¹, 伍丹华², 余世鹏^{1,2}, 张 新^{1,2}

(1.土壤与农业可持续发展国家重点实验室/中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2.中国科学院南京分院东台滩涂研究院, 江苏 东台 224200)

摘 要:为了揭示设施栽培土壤重金属累积特点及污染风险状况,为沿海设施农区土壤重金属污染的源头消减、生态阻控与风险防范提供科学依据,以近年来高效农业发展迅猛的江苏沿海某设施农地为研究对象,分析了种植方式和棚龄对土壤重金属 Pb、Cr、Cd、As 全量与有效态含量的影响,探讨了重金属有效态含量与理化性质的相关性,并对设施土壤重金属污染综合潜在生态风险进行了评价。结果表明:目前设施农区土壤环境质量状况整体良好,除重金属 Pb 含量超过温室蔬菜产地环境质量评价标准值(HJ/T 333—2006)外,Cr、Cd 和 As 含量均显著低于参考值;种植方式和棚龄不同程度地影响土壤重金属全量与有效态含量,设施土壤 Pb、Cr、Cd 全量与有效态含量均显著高于常规大田,且土壤 Cd 全量与有效态含量随棚龄增加呈现富集特点;土壤 Pb、Cr、Cd 有效态含量与粘粒含量、阳离子交换量和 pH 显著负相关,与有机质呈显著正相关,土壤有效态 As 含量仅与土壤 pH 显著正相关;目前研究区设施土壤重金属污染处于轻度综合潜在生态风险程度,综合潜在生态风险指数呈现出青椒大棚>西瓜大棚>韭菜大棚的趋势,且综合潜在生态风险指数随棚龄的增加而升高。

关键词:沿海;设施土壤;重金属;有效态;生态风险

中图分类号:X820.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2016)08-1498-09 **doi:**10.11654/jaes.2016-0118

Accumulation and potential ecological risk assessment of heavy metals in greenhouse soils from coastal area of Jiangsu Province

YAO Rong-jiang^{1,2}, YANG Jin-song^{1,2*}, XIE Wen-ping¹, WU Dan-hua², YU Shi-peng^{1,2}, ZHANG Xin^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China; 2.Dongtai Institute of Tidal Flat Research, Nanjing Branch of the Chinese Academy of Sciences, Dongtai 224200, China)

Abstract: Greenhouse soils have different biogeochemical characteristics from natural soils. Therefore, it is important to reveal the accumulation and ecological risks of soil heavy metals for sustainable production of greenhouse soil. This study was carried out to examine the effects of cropping methods and greenhouse ages on the total and bioavailable content of soil heavy metals (Pb, Cr, Cd, As), in a coastal greenhouse area in Jiangsu Province, China, a rapid development area of high-efficiency agriculture. Results indicated that soil environmental quality across the greenhouse area was generally in good condition. Except Pb whose content exceeded the environmental quality standard for farmland of greenhouse vegetables production (HJ/T 333—2006), the content of Cr, Cd and As was lower than the environmental quality standards. Cropping methods and greenhouse ages affected the total and bioavailable content of soil heavy metals to a different extent. Total and bioavailable concentrations of Pb, Cr and Cd in greenhouse soil was significantly higher than those in conventional field. The total and bioavailable content of Cd exhibited the trend of accumulation with increasing greenhouse ages. The bioavailable Pb, Cr, and

收稿日期:2016-01-24

基金项目:江苏省科技支撑计划社会发展项目(BE2014678);江苏省自然科学基金面上项目(BK20141266);国家自然科学基金项目(41571223)

作者简介:姚荣江(1980—),男,博士,副研究员。研究方向为滨海盐碱地治理修复及其生态环境效应。E-mail: rjyao@issas.ac.cn

*通信作者:杨劲松 E-mail: jsyang@issas.ac.cn

Cd in soil showed significant negative correlations with soil clay particle content, cation exchange capacity, and pH, but positive correlations with soil organic matter. The bioavailable As was merely positively correlated with soil pH. The comprehensive potential ecological risks of heavy metals were currently at a low level across the whole greenhouse area. The indexes of the comprehensive potential ecological risks in different crop greenhouses were in order of green pepper>watermelon>Chinese chives, increased with increasing greenhouse ages. The research findings could provide scientific reference for pollution source reduction, ecological activity control and risk prevention of soil heavy metals in the coastal greenhouse area.

Keywords: coastal area; greenhouse soil; heavy metal; bioavailability; ecological risk

随着工农业的迅速发展和居民生活水平的提高,人们对蔬菜、水果的跨季节需求越来越强烈,设施栽培特别是大棚蔬菜栽培的面积不断扩大,在设施农业中占有很大比重^[1]。据统计,江苏省以设施蔬菜为主的设施农业面积已超过 66.67 万 hm^2 ,占耕地比重达 14.6%,其中位于江苏东台市的设施蔬菜栽培面积占全省的 10.4%,成为沿海地区现代农业发展的亮点^[2-3]。在带来巨大经济效益的同时,近年来长期设施栽培引发的一系列土壤退化问题亦越来越受重视^[4],如设施土壤长期处于高温、高湿、高复种指数、高施肥量、无降水淋洗等特殊环境条件^[5],随着栽培年限的不断增长易出现酸化、板结、次生盐渍化、养分失衡、重金属累积、微生物区系改变等障碍问题^[6]。重金属由于具有潜伏性、难降解性、富集性等特点,且易进入食物链对食品安全和人体健康带来极大威胁,成为当前备受关注的环境问题^[7]。

近年来,国内外围绕着设施栽培土壤重金属累积特点^[8-9]、来源识别^[10-11]、影响因素^[12-13]、生态风险评估^[14-15]、生态修复^[16]等方面开展了大量的研究工作,针对设施栽培土壤重金属环境地球化学过程及其对农产品质量安全与人类健康风险评价,已成为环境土壤研究的热点。目前的研究主要集中在土壤重金属的总量方面,对设施农地重金属有效态含量的研究较少;事实上,重金属在土壤中的赋存形态受土壤本身特性和人为活动等因素的影响,且不同形态的重金属表现出不同生物毒性与迁移特征,判断土壤重金属的毒性响应以及生态风险更大程度上取决于其赋存形态^[17]。江苏沿海地区作为我国东部最具发展潜力的区域之一,随着近年来现代高效农业的规模化、工厂化发展,土壤潜在重金属污染风险亦日趋加剧,但目前关于设施土壤重金属全量、有效态含量的累积特点及其潜在生态风险评价的研究鲜有报道。为此,本文以江苏沿海地区近年来高效农业发展迅猛的东台市弢港镇某设施农地为例,研究种植方式和棚龄对设施土壤主要重金属 Pb、Cr、Cd、As 全量与有效态含量的影

响,分析重金属有效态含量与理化性质的关联性,探讨设施农地土壤重金属污染综合潜在生态风险评价,旨在为沿海设施农区土壤重金属污染的合理预防和风险消减提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江苏省东台市沿海经济区的堤利村和洋边村,地处弢港镇镇区西部,地理位置为 $120^{\circ}49'23.7''\sim 120^{\circ}50'20.6''\text{E}$, $32^{\circ}42'55.0''\sim 32^{\circ}44'55.1''\text{N}$,介于 1955 年与 1975 年围垦的海堤之间,东距黄海海岸带 10.1 km(图 1)。研究区属亚热带和暖温带的过渡区,季风显著,常年平均气温 15°C ,无霜期 220 d,日照 2 130.5 h,多年平均降水量 1 061.2 mm,蒸发量 882.8 mm,雨热同季,降水季节性分布不均,其中 6—9 月雨季降水量平均占全年近 65%。该区土壤发育于江淮冲积—海相沉积物母质,土壤含盐量较高,质地以砂壤和粉砂壤为主,其土壤性质为淤长型平原海岸的典型代表。研究区东临弢港镇镇区,近 5 年来大面积发展韭菜、青椒、西瓜等设施大棚种植,设施农业面积占耕地面积比例达 40%以上。

1.2 样品采集与处理

根据实地调查和农户走访结果依据研究区设施农业布局特点,考虑不同设施种植制度、棚龄等因素,于 2014 年 12 月上旬对 24 栋设施大棚进行表层土样采集,其中韭菜大棚 9 个(3 年棚龄),前茬西瓜大棚 6 个(2 年棚龄,目前种植西兰花和萝卜),青椒大棚 9 个(3 年棚龄),同时采集 5 个未有设施种植历史的对照样点。本研究共计采集 29 个表层土样,覆盖了目前研究区的主要设施种植类型并能反映研究区土壤环境污染状况。各采样点均用 GPS 进行定位,其空间位置如图 1 所示,设施大棚采样及相关调查情况列于表 1。每栋设施大棚内样点均按照“S”形多点采样法,采集 6 个 0~20 cm 深度的表层土壤,现场均匀混合后用四分法从中选取 1 kg 土样装入自封袋中作为代表该

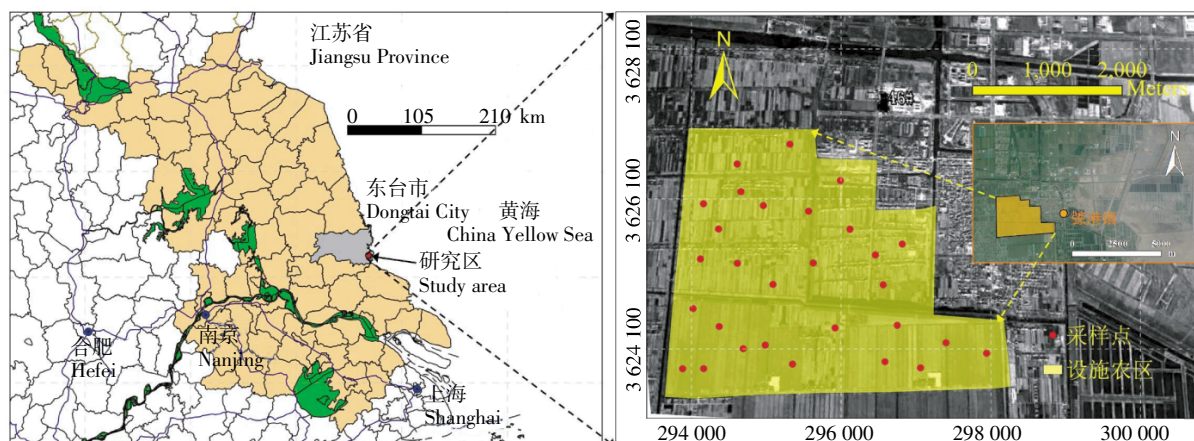


图 1 研究区地理位置及采样点分布图

Figure 1 Geographical location of study area and sampling sites

表 1 研究区土壤采样及相关调查情况

Table 1 Soil sampling and related survey information in studied area

种植方式	棚龄	样点(大棚)数	采样调查记录
设施韭菜	1	3	1 年棚龄, 目前种植第二茬韭菜, 大棚于 1 个月前搭建, 韭菜长势好
	2	3	2 年棚龄, 周年连茬种植韭菜, 韭菜长势良好, 产量高
	3	3	3 年棚龄, 周年连茬种植韭菜, 韭菜长势差, 叶片黄, 产量低
设施西瓜	1	3	前茬西瓜大棚, 棚龄 1 年, 目前为西兰花, 长势良好, 产量高
	2	3	前茬西瓜大棚, 棚龄 2 年(第二年西瓜为嫁接苗), 目前为萝卜, 长势良好
设施青椒	1	3	1 年棚龄, 大棚内青椒直播种植, 正处于苗期, 长势良好
	2	3	2 年棚龄, 周年连作, 夏季露地, 冬季大棚种植, 直播苗, 长势好
	>4	3	>4 年棚龄, 持续多年大棚种植, 目前青椒刚穴盘移栽, 幼苗长势良好
常规大田		5	小麦地, 近年来持续常规大田种植, 小麦-玉米轮作, 目前小麦长势良好

点的混合样品。采集的土壤样品带回实验室自然风干后去除碎片、砾石和植物等杂物, 用研钵磨碎, 分别过 10 目、20 目和 100 目的尼龙网筛, 并将其干燥保存。

1.3 样品处理与分析

采集的土壤样品测定的指标包括 Pb、Cr、Cd、As 四种金属元素全量与有效态含量、土壤有机质、阳离子交换量、粘粒含量(<0.002 mm)和 pH 值。在土壤样品中加入王水-H₂O₂ 消煮以及磷酸作抑制剂后提取全量 Pb、Cd, 加入 HF-HClO₄-HNO₃ 消煮后提取全量 Cr, 采用 HNO₃-H₂SO₄ 消解后加入 NaBH₄ 反应方法提取全量 As, 采用 DTPA-TEA 提取有效态 Pb、Cd 和 Cr, 用稀盐酸提取有效态 As^[18]。用原子吸收光谱石墨炉法测定 Pb、Cd 元素含量, 用原子吸收火焰法测定 Cr 元素含量, 用原子荧光光度法测定 As 元素含量。土壤重金属分析的质量控制采用国家标准物质进行加标回收, 各重金属含量的回收率分别为 Pb(97.6%~105.3%)、Cr(98.4%~110.7%)、Cd(96.9%~112.1%)、As(98.2%~113.5%), 符合美国 EPA 标准要求的 80%~

120% 的范围。土壤有机质、阳离子交换量、粘粒含量和 pH 值的测定分别采用重铬酸钾稀释热法、EDTA-乙酸铵交换法、吸管法和电位法^[19]。

1.4 生态风险评价方法

本文采用国内外具有较大影响和广泛使用的 Hakanson 潜在生态危害指数法(Potential ecological risk index)对研究区土壤重金属的生态危害进行评价。该方法是国际上土壤/沉积物重金属研究方法之一, 不仅将土壤重金属的含量考虑在内, 而且将重金属的生态效应、环境效应与毒理学联系在一起, 定量地划分出重金属的潜在风险程度。潜在生态风险指数法计算过程与步骤、重金属毒性响应系数的确定参考文献[20]。本文参考《温室蔬菜产地环境质量评价标准(HJ/T 333—2006)》作为研究区土壤重金属元素的评价标准值, 采用的土壤重金属潜在生态风险程度分级标准如表 2 所示。

1.5 统计分析

本文采用的数据分析方法包括描述性统计分析、

表 2 土壤污染程度及潜在生态风险程度
Table 2 Soil pollution degree and potential ecological risk

C_i 范围	C_i 污染程度	E_i 范围	E_i 污染程度	RI 范围	RI 风险程度
$C_i < 1$	轻度	$E_i < 40$	轻度	$RI < 150$	轻度
$1 \leq C_i < 3$	中等	$40 \leq E_i < 80$	中等	$150 \leq RI < 300$	中等
$3 \leq C_i < 6$	较强	$80 \leq E_i < 160$	较强	$300 \leq RI < 600$	较强
$C_i \geq 6$	很强	$160 \leq E_i < 320$	很强	$RI \geq 600$	很强
		$E_i \geq 320$	极强		

注: C_i ,单一重金属污染系数; E_i ,单一重金属潜在生态风险系数; RI ,潜在生态风险指数。

单样本 t 检验、单因素方差分析和 Pearson 相关分析。利用描述性统计分析和单样本 t 检验方法明确研究区土壤重金属含量状况,结合单因素方差分析揭示不同设施作物类型、棚龄等因素对重金属全量、有效态含量和潜在生态风险指数的影响,采用 Pearson 相关分析研究重金属有效态含量与土壤基本理化性质的相关性。数据分析均采用 SPSS15.0 软件完成。

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量状况分析

研究区常规大田和设施大棚土壤重金属全量与有效态含量的描述性统计特征值列于表 3。无论是全量还是有效态含量,不同土地利用方式下土壤重金属

含量的变异较大。从重金属全量来看,常规大田土壤 Pb 含量介于 38.3~47.8 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Cr 含量介于 45.7~63.6 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而设施大棚土壤 Pb 含量介于 42.9~59.9 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Cr 含量介于 53.2~75.9 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;从变异系数来看,研究区常规大田土壤重金属全量的变异系数为 4.59%~25.25%,设施大棚土壤重金属全量的变异系数为 2.82%~21.31%,除 As、Pb 为弱变异强度外,其余均属中等变异强度。以《温室蔬菜产地环境质量评价标准(HJ/T 333—2006)》的指标限值作为该区土壤重金属元素的参考值,除设施大棚土壤 Pb 超标率达 75%以外,未见其他土壤重金属含量超标现象;单样本 t 检验(双尾)显示,研究区常规大田土壤 Pb、Cr、Cd、As 全量均显著低于参考值($P < 0.01$),设施大棚土壤除 Pb 全量显著高于参考值($P < 0.05$)外,Cr、Cd 和 As 全量均显著低于参考值($P < 0.01$),表明近年来研究区土壤重金属 Pb 累积量明显高于其他元素。从有效态含量来看,常规大田土壤 Pb、Cr、Cd、As 有效态含量的均值分别为 1.80、0.373、0.019、0.061 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,设施大棚土壤对应的均值分别为 2.07、0.455、0.020、0.064 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,总体来看现阶段该区重金属的环境风险和生态毒性尚不显著。与已有研究结果^[21]的比较显示目前研究区土壤环境质量状况整体良好,仅 Pb 含量超过温室蔬菜产地环境质量标准限值。

表 3 研究区常规大田和设施大棚土壤重金属全量与有效态含量的统计特征值
Table 3 Descriptive statistics of total and bioavailable concentrations of heavy metals in conventional field soils and plastic greenhouse soils in studied area

利用类型	重金属含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	最小值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	最大值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	平均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	变异系数/ %	温室蔬菜产地环境质量 评价标准值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	超标率/ %
常规大田($n=5$)	Pb _t	38.3	47.8	43.5	9.19	50	0
	Pb _a	1.41	2.09	1.80	14.89		
	Cr _t	45.7	63.6	56.8	14.09	250	0
	Cr _a	0.225	0.431	0.373	22.46		
	Cd _t	0.028	0.051	0.041	25.25	0.4	0
	Cd _a	0.017	0.020	0.019	5.88		
	As _t	6.89	7.77	7.42	4.59	20	0
	As _a	0.045	0.070	0.061	16.10		
设施大棚($n=24$)	Pb _t	42.9	59.9	52.3	7.98	50	75.0
	Pb _a	1.84	2.30	2.07	6.95		
	Cr _t	53.2	75.9	63.0	10.12	250	0
	Cr _a	0.308	0.578	0.455	12.82		
	Cd _t	0.038	0.077	0.054	21.31	0.4	0
	Cd _a	0.018	0.023	0.020	7.53		
	As _t	7.12	8.11	7.59	2.82	20	0
	As _a	0.046	0.084	0.064	10.78		

注:表中土壤重金属的均值为算术平均值;元素下标 t 表示该元素全量含量,下标 a 表示有效态含量;下同。

表4列出了常规大田与设施大棚种植条件下土壤重金属Pb、Cr、Cd、As全量与有效态含量的统计对比结果。单因素方差分析($P<0.05$)显示,设施大棚土壤Pb、Cr、Cd全量与有效态含量均显著高于常规大田,而土壤As全量和有效态含量无显著差异。这表明研究区设施大棚的种植与管理方式已引起土壤Pb、Cr、Cd元素的显著富集,如设施大棚土壤Pb全量比常规大田高20.2%,Cd全量高出31.7%,Cr有效态含量高出22.0%。事实上,大量报道显示设施栽培的高水、肥投入条件往往导致重金属元素随着生物有机肥、农药化肥、农膜、污灌等进入土壤^[2]。在本研究区,设施大棚施用畜禽粪便有机肥 $45\sim 60\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,氮磷复合肥 $900\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,可能是导致Pb、Cr、Cd发生富集的主要因素;土壤As含量差异较小可能与设施

栽培下As污染源较少有关。综上,由设施栽培种植管理方式导致的重金属带入、人为干扰已对研究区土壤重金属含量状况产生较显著影响。

2.2 棚龄对土壤重金属含量的影响

不同种植方式与棚龄条件下土壤各重金属全量与有效态含量的统计比较($P<0.05$)如图2所示(图中重金属全量、有效态含量的显著性检验分别用小写和大写字母标识)。从土壤Pb全量与有效态含量对比来看,西瓜和青椒大棚土壤Pb全量与有效态含量均显著高于常规大田,而3年棚龄的韭菜大棚土壤Pb全量显著高于常规大田;棚龄超过4年的青椒大棚土壤Cr全量最高,且青椒大棚土壤Cr有效态含量整体最高,显著高于常规大田和1年棚龄韭菜大棚;棚龄超过2年的青椒大棚土壤Cd全量、有效态含量明显高

表4 常规大田与设施大棚土壤重金属含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)统计比较

Table 4 Statistical comparison of heavy metal content($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) between conventional field and plastic greenhouse soils

种植方式	Pb _t	Cr _t	Cd _t	As _t	Pb _a	Cr _a	Cd _a	As _a
常规大田	43.5±3.99b	56.8±8.01b	0.041±0.010b	7.42±0.341a	1.80±0.268b	0.373±0.084b	0.019±0.001b	0.061±0.010a
设施大棚	52.3±4.17a	63.0±6.38a	0.054±0.012a	7.59±0.214a	2.07±0.144a	0.455±0.058a	0.020±0.002a	0.064±0.0074a

注:每列中数字后不同小写字母表示单因素方差分析差异显著($P<0.05$)。

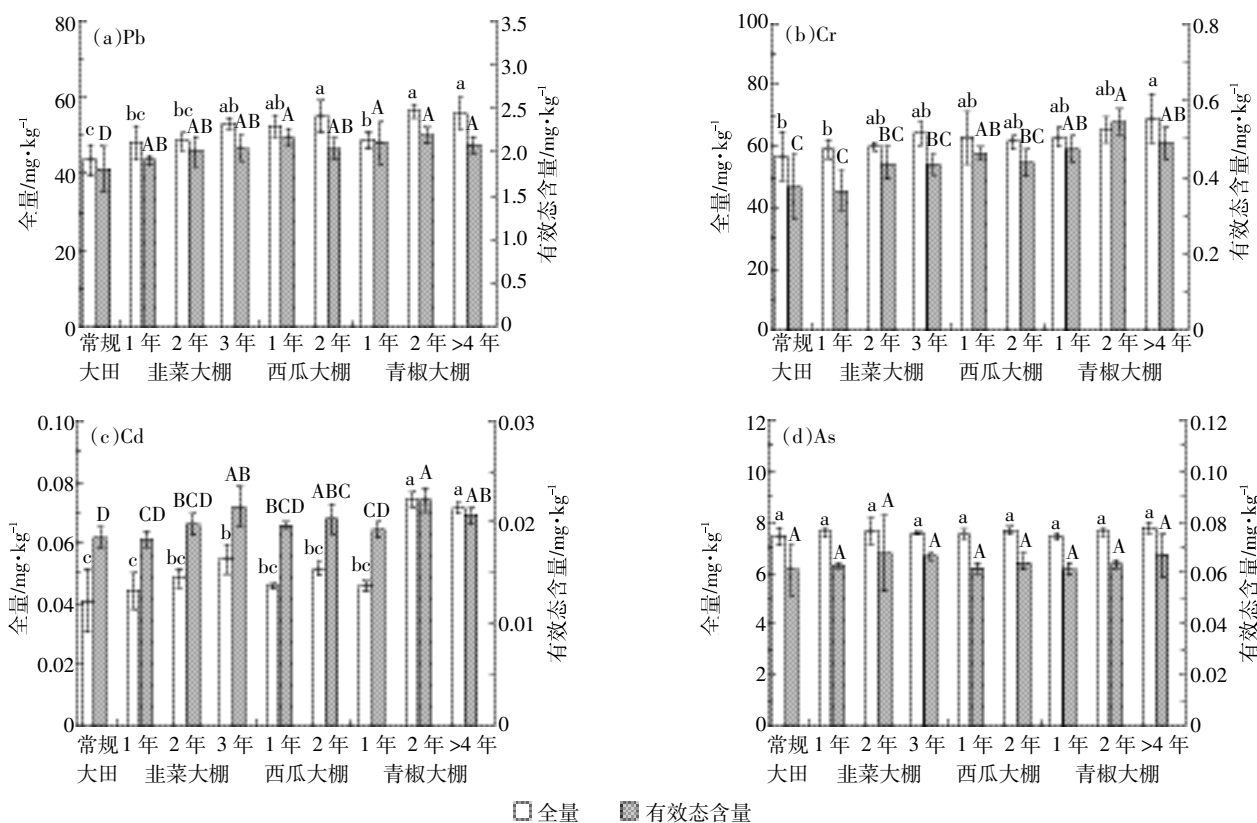


图2 不同种植作物类型与棚龄条件下土壤重金属全量、有效态含量的比较

Figure 2 Comparison of total and bioavailable heavy metal content under different crop types and greenhouse ages

于常规大田和其他类型设施土壤;土壤 As 全量与有效态含量受种植方式与棚龄的影响较小。统计分析表明:各设施种植条件下土壤 Pb、Cr 全量与 Cd 有效态含量无显著差异,但青椒大棚土壤 Cd 全量、Cr 有效态含量显著高于韭菜和西瓜大棚。由此可知,设施种植作物种类对重金属含量存在不同程度的影响,目前青椒大棚土壤的重金属含量整体最高,其次是西瓜大棚,韭菜大棚土壤重金属含量最低。导致该现象的因素除了种植方式与田间管理外,可能还与设施作物的吸收富集作用密切相关^[23]。已有研究表明重金属在作物内的累积量表现为叶菜类>根菜类>果菜类,叶菜类、茄果类对 Cd 富集作用较强,对 Pb、As 的积累较低^[24],瓜类对重金属 Pb、Cd 的富集作用较弱^[25]。

韭菜大棚土壤 Pb、Cr、As 全量与有效态含量随着棚龄的增加差异较小,但 3 年棚龄韭菜大棚 Cd 全量与有效态含量显著高于 1 年棚龄。两个棚龄的西瓜大棚土壤 Pb、Cr、Cd、As 全量与有效态含量没有显著差异,这可能与种植方式和棚龄差异较小有关,由于研究区西瓜地连作障碍严重制约品质与产量,1~2 年棚龄的设施西瓜地较常见,基本不存在棚龄超过 3 年的设施西瓜地。随着棚龄的增加,设施青椒土壤 Pb、Cr、As 全量与有效态含量差异较小,但 Cd 全量与有效态含量显著增加。总体来看,本研究仅土壤 Cd 含量随棚龄增加表现出富集特点,而 Pb、Cr、As 的时间累积效应尚不明显。事实上,众多研究表明设施栽培土壤重金属含量一般与种植年限呈显著正相关,但其还受重金属类型、蔬菜种类、施肥管理等因素影响,如黄霞等^[26]研究发现山东寿光地区设施栽培 2~4 年棚龄的土壤中重金属含量最高,陈碧华等^[27]研究表明大棚菜田土壤 Cr 含量和种植年限不相关;白玲玉等^[28]研究发现,与土地利用年限相比,农用化学品的质量和数量是导致不同利用方式下土壤重金属含量差异的重要原因。

2.3 土壤重金属有效态含量与土壤基本理化性质相关性分析

研究区土壤重金属有效态含量与重金属全量、粘

粒含量(Clay)、有机质(SOM)、阳离子交换量(CEC)、土壤 pH 的相关性如表 5 所示。土壤 Pb、Cr、Cd、As 有效态含量与全量呈极显著正相关,且土壤 Pb、Cr 和 Cd 有效态含量与粘粒含量、阳离子交换量和 pH 显著负相关,即重金属 Pb、Cr、Cd 的生物有效性随粘粒含量的增多而降低;pH 越高的土壤,其重金属的生物有效性越低,主要原因是 pH 下降时土壤粘粒矿物和有机质表面的负电荷减少导致对重金属的吸附能力下降;土壤重金属有效态随阳离子交换量的升高而降低,主要是由于阳离子交换量的上升导致土壤对重金属离子吸附固持作用增大,降低了有效性。土壤 Pb、Cr、Cd 有效态含量与有机质呈显著正相关,原因在于土壤有机质主要由生物分子和腐殖质(以胡敏酸和富里酸为主)组成,大量研究表明^[29]富里酸呈强酸性,能显著促进污染土壤重金属的解吸,提高其有效性,而胡敏酸吸收容量较高,能显著降低污染土壤重金属的溶出。本文重金属 Pb、Cr、Cd 有效态与土壤有机质呈极显著正相关可能与该区域土壤有机质中含有较高的富里酸有关。土壤 As 有效态含量与土壤 pH 显著正相关,但与其他理化性质相关性不显著。这是由于土壤 As 的危害程度受酸碱性和氧化还原电位影响较大,土壤 pH 值高导致 As 吸附量减少(研究区土壤 pH 介于 7.6~8.3),使得 As 离子向溶液中解吸,水溶性 As 含量增加;在低 pH 土壤中,As 离子能被土壤中带正电荷的氢氧化铁等吸附剂迅速吸附,降低其有效性,因而 As 的生物有效态随 pH 值的升高而增加^[30]。

2.4 设施土壤重金属的单项潜在生态风险

图 3 列出了研究区设施大棚土壤单一重金属污染系数 C_i 和潜在生态风险系数 E_i^p 的统计特征值。重金属 Pb、Cr、Cd、As 污染系数的平均值分别为 1.05、0.25、0.14 和 0.38,平均污染程度 Pb 最高,其次是 As, Cr 和 Cd 平均污染程度最低(图 3a)。从污染系数的频数分布来看:设施大棚土壤 Cr、Cd 和 As 全部处于轻度污染程度,Pb 整体处于中等污染程度;其中 Pb 有 6 个样点处于轻度污染程度,其余 18 个样点处于中等

表 5 土壤重金属有效态含量与重金属全量和土壤理化性质的相关性

Table 5 Correlation coefficients of total and bioavailable heavy metal content with basic soil properties

	Pb _t	Cr _t	Cd _t	As _t	Clay	SOM	CEC	pH
Pb _a	0.495**	0.457**	0.377*	0.070	-0.480**	0.668**	-0.553**	-0.490**
Cr _a	0.595**	0.465**	0.591**	0.206	-0.368*	0.493**	-0.426*	-0.661**
Cd _a	0.530**	0.546**	0.697**	0.262	-0.425*	0.528**	-0.618**	-0.623**
As _a	0.162	0.285	0.282	0.836**	-0.158	0.019	-0.304	0.369*

注:* 显著性水平 $P<0.05$; ** 显著性水平 $P<0.01$ 。

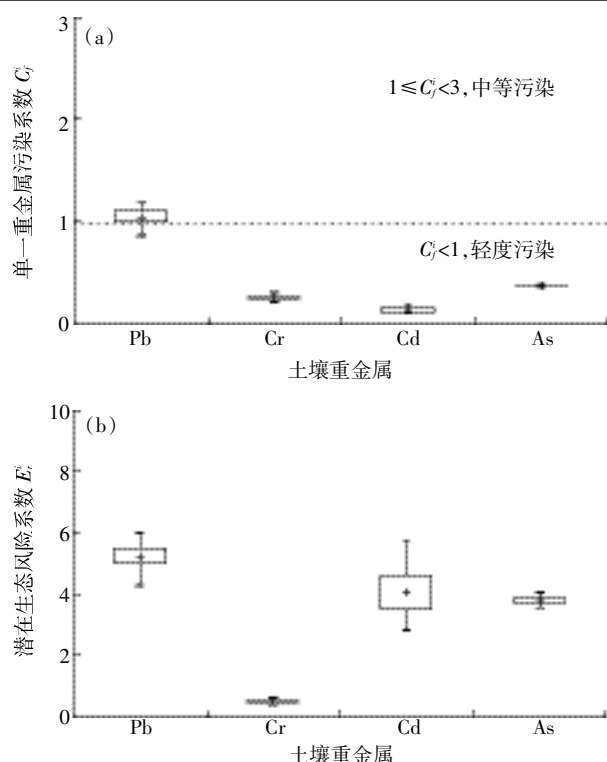


图3 设施大棚土壤单一重金属污染系数 C_p 和潜在生态风险系数 E_i 的统计值及其分布

Figure 3 Descriptive statistics and their distribution of contamination coefficient (C_p) and potential ecological hazard coefficient (E_i) of heavy metals in plastic greenhouse soil

污染程度;不存在处于较强和很强重金属污染程度的样点。

从图 3b 显示的研究区设施大棚土壤重金属 Pb、Cr、Cd、As 潜在生态风险系数 E_i 的统计特征值来看,其平均值分别为 5.23、0.504、4.08 和 3.80,整体均处于轻度潜在生态风险,4 种重金属的潜在生态危害趋势为 $Pb > Cd > As > Cr$ 。与已有研究^[21]相比,近年来研究区土壤 Pb 生态风险系数大幅提高,这与设施栽培条件下投入大量肥料、农药导致 Pb 富集密切相关。比较图 3a 和图 3b 可知,设施大棚土壤 Pb 的污染系数和潜在生态风险系数均最高,尽管 Cd 污染系数均值最低,但其潜在生态风险系数高于 Cr 和 As,这主要与 Cd 的毒性响应系数显著高于 Pb、Cr、As 有关。

表6 土壤重金属潜在生态风险指数 RI 的统计特征值

Table 6 Descriptive statistics of potential ecological risk index (RI) of heavy metals in soil

种植方式	样本数	最小值	最大值	极差	平均值	中位数	标准差	变异系数(C. V.)/%	差异显著性 $P < 0.05$
韭菜大棚	9	12.09	13.91	1.82	12.95	12.88	0.70	5.38	b
西瓜大棚	6	12.81	14.15	1.34	13.31	13.19	0.49	3.69	b
青椒大棚	9	12.05	15.92	3.87	14.46	15.21	1.49	10.29	a
常规大田	5	9.97	12.75	2.78	11.59	12.33	1.27	10.96	c

2.5 土壤重金属的综合潜在生态风险

从表 6 列出的研究区土壤重金属潜在生态风险指数 RI 的统计特征值来看:所有设施大棚样点土壤重金属 RI 值在 12.05~15.92 之间,均属轻度综合潜在生态风险程度;韭菜大棚土壤 RI 值的平均值为 12.95,西瓜大棚为 13.31,青椒大棚为 14.46,表现为青椒大棚 $>$ 西瓜大棚 $>$ 韭菜大棚。单因素方差分析显示,青椒大棚土壤重金属潜在生态风险显著高于西瓜大棚和韭菜大棚 ($P < 0.05$),但西瓜大棚与韭菜大棚间土壤重金属潜在生态风险差异不显著。此外,常规大田土壤 RI 值的平均值为 11.59,且青椒、西瓜和韭菜大棚土壤重金属潜在生态风险均显著高于常规大田 ($P < 0.05$)。

不同种植方式与棚龄下土壤重金属综合潜在生态风险指数 RI 如图 4 所示。可以看出,种植方式和棚龄对土壤重金属综合潜在生态风险指数具有重要影响;常规大田土壤重金属潜在生态风险指数最低,超过 2 年棚龄的青椒大棚土壤重金属潜在生态风险指数最高,且显著高于其他种植方式。同一设施栽培条件下,3 年棚龄的韭菜大棚土壤重金属潜在生态风险指数显著高于 1 年棚龄,2 年棚龄的青椒大棚土壤重金属潜在生态风险指数均显著高于 1 年棚龄。事实上,诸多研究表明,设施大棚土壤重金属的含量一般

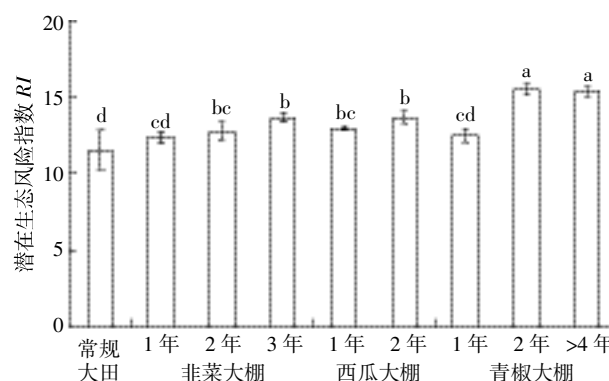


图4 不同种植作物类型与棚龄下土壤重金属潜在生态风险指数 RI

Figure 4 Potential ecological risk index (RI) of soil heavy metals under different crop types and greenhouse ages

与种植年限呈显著正相关,且重金属综合潜在生态风险指数 RI 亦随着种植年限的增加而升高^[31]。这与本文的研究结果也是一致的。

总体来看,目前研究区设施大棚土壤环境质量较安全,重金属潜在生态风险程度尚处于轻度,但是随着今后该区高效农业的发展与农业集约化程度的提高,有机肥、化肥、农药等大量投入将不可避免引起该区土壤环境质量的变化。因此,在当前设施种植和人为活动尚未引起土壤重金属潜在生态风险超标的情况下,该地区土壤重金属污染的综合防治尤为重要。首先加强监测监控,在主要农产品产区建立土壤污染(重金属)长期定位监测点,进行基本农田、蔬菜地等土壤重金属污染状况及其成因、归趋的调查和监测;其次强化源头减量,推动农业废弃物资源化利用和无害化处理,设施大棚中避免重金属含量较高有机肥、化肥和农药的施用是防止土壤重金属累积的重要保障;最后推进生态阻隔,合理部署农田水分管理、原位钝化、耕地轮休,以及耕作制度改革等农艺削减措施,种植超积累植物以生态修复或者在土壤中施加石灰以降低重金属的生物有效性^[32]。

3 结论

(1)目前设施农区土壤环境质量状况整体良好,仅 Pb 全量超过温室蔬菜产地环境质量评价标准限值,各土壤重金属有效态含量整体较低,其环境风险和生态毒性尚不显著。

(2)设施大棚土壤 Pb、Cr、Cd 全量与有效态含量显著高于常规大田,且设施大棚土壤重金属含量青椒大棚>西瓜大棚>韭菜大棚,土壤 Cd 全量与有效态含量随棚龄增加表现出富集特点。

(3)土壤 Pb、Cr、Cd 有效态含量与粘粒含量、阳离子交换量和 pH 显著负相关,与有机质呈显著正相关,土壤 As 有效态含量仅与土壤 pH 显著正相关。

(4)设施农区土壤重金属污染处于轻度综合潜在生态风险程度,土壤重金属污染的综合潜在生态风险指数依次为青椒大棚>西瓜大棚>韭菜大棚,且综合潜在生态风险指数随棚龄的增加而升高。

参考文献:

- [1] 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 Yan-feng, SHI Zhi-qi. 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.
- [2] 曾晓萍, 周 军, 曹光亮, 等. 江苏省设施蔬菜部分主要栽培品种[J]. 中国蔬菜, 2014(1): 86-89.
ZENG Xiao-ping, ZHOU Jun, CAO Guang-liang, et al. Some main cultivars of greenhouse vegetables in Jiangsu Province[J]. *China Vegetables*, 2014(1): 86-89.
- [3] 郭世荣. 江苏省设施蔬菜发展现状及对策[J]. 中国蔬菜, 2007(5): 6-8.
GUO Shi-rong. Development status and countermeasures of greenhouse vegetables in Jiangsu Province[J]. *China Vegetables*, 2007(5): 6-8.
- [4] 费月跃, 顾闽峰, 王伟义, 等. 江苏沿海地区设施蔬菜栽培逆境因子及其对策[J]. 安徽农学通报, 2014, 20(10): 49-50.
FEI Yue-yue, GU Min-feng, WANG Wei-yi, et al. Stress factors and countermeasures of greenhouse vegetable cultivation in the coastal area of Jiangsu Province[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2014, 20(10): 49-50.
- [5] Martín J A R, Ramos-Miras J J, Boluda R, et al. Spatial relations of heavy metals in arable and greenhouse soils of a Mediterranean environment region (Spain)[J]. *Geoderma*, 2013, 200/201(6): 180-188.
- [6] Mahmoud E K, El-Kader N A. Soil immobilization of heavy metal using soil amendments in a greenhouse study[J]. *Compost Science & Utilization*, 2013, 21(3): 156-163.
- [7] 李廷轩, 张锡洲. 设施栽培条件下土壤质量演变及调控[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
LI Ting-xuan, ZHANG Xi-zhou. Soil quality evolution and regulation under the condition of greenhouse cultivation[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [8] Chen Y, Huang B, Hu W, et al. Accumulation and ecological effects of soil heavy metals in conventional and organic greenhouse vegetable production systems in Nanjing, China[J]. *Environmental Earth Science*, 2014, 71(8): 3605-3616.
- [9] 全 智, 吴金水, 魏文学, 等. 长期种植蔬菜后土壤中氮、磷有效养分和重金属含量变化[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2919-2929.
QUAN Zhi, WU Jin-shui, WEI Wen-xue, et al. Change characteristics of soil available nitrogen and phosphorus and heavy metal contents after long-term cultivation of vegetables[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(11): 2919-2929.
- [10] Bai L Y, Zeng X B, Su S M, et al. Heavy metal accumulation and source analysis in greenhouse soils of Wuwei District, Gansu Province, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, 22(7): 5359-5369.
- [11] 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.
- [12] 段永蕙, 史 静, 张乃明, 等. 设施土壤重金属污染物累积的影响因素分析[J]. 土壤, 2008, 40(3): 469-473.
DUAN Yong-hui, SHI Jing, ZHANG Nai-ming, et al. Accumulation of heavy metals and its influential factors in greenhouse soils[J]. *Soils*, 2008, 40(3): 469-473.
- [13] Yang L, Huang B, Hu W, et al. The impact of greenhouse vegetable

- farming duration and soil types on phytoavailability of heavy metals and their health risk in Eastern China[J]. *Chemosphere*, 2014, 103: 121–130.
- [14] Kong X L, Cao J, Tang R Y, et al. Pollution of intensively managed greenhouse soils by nutrients and heavy metals in the Yellow River irrigation region, Northwest China[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2014, 186(11): 7719–7731.
- [15] 王登启. 设施菜地土壤重金属的分布特征与生态风险评价研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2008.
- WANG Deng-qi. Distribution and risk evaluation of heavy metals in greenhouse vegetable soils[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2008.
- [16] Castaldi P, Santona L, Melis P. Heavy metal immobilization by chemical amendments in a polluted soil and influence on white lupin growth[J]. *Chemosphere*, 2005, 60(3): 365–371.
- [17] Kim R Y, Yoon J K, Kim T S, et al. Bioavailability of heavy metals in soils: definitions and practical implementation: A critical review[J]. *Environmental Geochemistry & Health*, 2015, 37(6): 1–21.
- [18] 陈飞霞, 魏世强. 土壤中有效态重金属的化学试剂提取法研究进展[J]. 干旱环境监测, 2006, 20(3): 153–157.
- CHEN Fei-xia, WEI Shi-qiang. Study of chemical extraction of heavy metals in soil[J]. *Arid Environmental Monitoring*, 2006, 20(3): 153–157.
- [19] 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, 1999.
- LU Ru-kun. Analytical methods of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [20] 海米提·依米提, 祖皮艳木·买买提, 李建涛, 等. 焉耆盆地土壤重金属的污染及潜在生态风险评价[J]. 中国环境科学, 2014, 34(6): 1523–1530.
- HAMID Yimit, ZULPIYA Mamat, LI Jian-tao, et al. Sources explanation, pollution and assessment of potential ecological hazards of heavy metals in the soils of Yanqi basin, China[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(6): 1523–1530.
- [21] 孟庆峰, 杨劲松, 姚荣江, 等. 滩涂围垦区土壤重金属调查及生态风险评价: 以盐城市弶港镇为例[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2249–2257.
- MENG Qing-feng, YANG Jin-song, YAO Rong-jiang, et al. Investigation and ecological risk assessment of heavy metals pollution in reclaimed tidal flat soil: A case study of Jianggang County, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2249–2257.
- [22] 李树辉. 北方设施菜地重金属的累积特征及防控对策研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- LI Shu-hui. Characteristics of heavy metal accumulation and regulation strategies in soils of protected vegetables cultivation in the North China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011.
- [23] 薛艳, 沈振国, 周东美. 蔬菜对土壤重金属吸收的差异与机理[J]. 土壤, 2005, 37(1): 32–36.
- XUE Yan, SHEN Zhen-guo, ZHOU Dong-mei. Difference in heavy metal uptake between various vegetables and its mechanism[J]. *Soils*, 2005, 37(1): 32–36.
- [24] 黄永东, 黄永川, 于官平, 等. 蔬菜对重金属元素的吸收和积累研究进展[J]. 长江蔬菜, 2011(10): 1–6.
- HUANG Yong-dong, HUANG Yong-chuan, YU Guan-ping, et al. Progress of adsorption and accumulation of heavy metals in vegetables[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2011(10): 1–6.
- [25] 徐明飞, 郑纪慈, 阮美颖, 等. 不同类型蔬菜重金属(Pb, As, Cd, Hg)积累量的比较[J]. 浙江农业科学, 2008, 20(1): 29–34.
- XU Ming-fei, ZHENG Ji-ci, RUAN Mei-ying, et al. Comparison of the amounts of heavy metals accumulated by different groups of vegetables[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2008, 20(1): 29–34.
- [26] 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.
- [27] 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 Bi-hua, YANG He-lian, ZHOU Jun-guo, et al. Effect of multi-year of vegetable field on soil heavy metal and enzyme activity in plastic shed[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(1): 213–218.
- [28] 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 Ling-yu, ZENG Xi-bai, LI Lian-fang, et al. Effects of land use on heavy metal accumulation in soils and source analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(1): 96–104.
- [29] 赵明, 蔡葵, 王文娇, 等. 施肥对大棚土壤有效态重金属含量及生物效应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(增刊): 26–31.
- ZHAO Ming, CAI Kui, WANG Wen-jiao, et al. Effects of fertilization on soil available heavy metal content and biological effects in greenhouse[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(Suppl): 26–31.
- [30] 孙歆, 韦朝阳, 王五一. 土壤中砷的形态分析和生物有效性研究进展[J]. 地球科学进展, 2006, 21(6): 625–632.
- SUN Xin, WEI Chao-yang, WANG Wu-yi. Progress in the study of arsenic species and bioavailability in soils: A review[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(6): 625–632.
- [31] 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.
- [32] 赵智, 唐泽军, 杨凯, 等. PAM与粉煤灰改良沙土中重金属的迁移和富集规律[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 83–89.
- ZHAO Zhi, TANG Ze-jun, YANG Kai, et al. Metal transportation and accumulation in sandy soil amended by fly ash and PAM[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(7): 83–89.