

山东海阳地区番茄大棚土壤重金属元素分布特征^①

万欣^{1,2}, 董元华^{1,2*}, 王辉^{1,2}, 李建刚^{1,2}, 宋丽芬³

(1 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049;

3 中国农业大学(烟台)理工学院, 山东烟台 264670)

摘要: 对山东省海阳地区 150 个不同种植年限的番茄大棚土壤重金属元素的分布特征进行了调查研究。结果表明, 该地区番茄大棚土壤 Fe、Zn、Cu、Mn 含量平均值为 18 874、80.1、27.7、467.5 mg/kg, 变异系数 26.7%~39.2%, 具有一定的空间变异性。该地区番茄大棚土壤 Cu 和 Zn 元素含量在种植年限为 1~10 年间逐年增加, 而在种植年限 11~17 年间呈降低的趋势, 番茄大棚土壤 Cu 和 Zn 元素含量随种植年限变化的规律与大棚土壤施肥量以及土壤 pH 的变化有关; 随着蔬菜温室使用年限的增加, 土壤 Mn 含量有逐年降低的趋势, Fe 元素含量变化趋势不明显。

关键词: 大棚土壤; 重金属元素; 特征

中图分类号: S152

在农业生产中, 土壤养分状况是农田施肥的重要依据。养分输入不足可导致作物减产, 输入过量可能造成一些生态环境问题。通常情况下, 施用的化肥主要是氮、磷、钾肥。而以大量施用氮、磷、钾肥来增加产量的同时, 农田生态系统中重金属元素的输入量也会发生变化。一般认为, 土壤重金属元素输入的主要途径有大气干湿沉降、灌溉和施肥。其中, 施用有机肥能够提高土壤中 Fe、Mn、Cu、Zn 的含量^[1]。据调查, 中国北方蔬菜大棚中有机肥的施用量相对较高^[2], 由于大量施用有机肥和化肥, 导致城市郊区蔬菜大棚土壤重金属元素含量远高于相邻的露地土壤, 同时还可能造成土壤盐渍化和重金属积累等系列问题^[3]。有研究表明, 土壤中适宜的重金属元素含量可促进作物增产, 但如果 Cu 和 Zn 含量过高, 不仅会对作物正常的生长发育产生负面影响, 而且可能会导致农产品品质下降^[4]。此外, 土壤酸碱度和有机碳的含量也会对土壤重金属元素含量造成影响^[5]。因此, 对蔬菜大棚土壤重金属元素分布特征的研究, 将有助于加强对设施栽培条件下土壤肥力的管理, 促进农业生产与环境之间的相互协调。

目前, 有关蔬菜大棚土壤重金属元素分布特征的研究较多^[6-10]。其中李德成等^[6]和杜慧玲等^[7]曾分别对不同使用年限蔬菜大棚土壤重金属元素含量变化

进行研究, 发现随大棚种植年限的增加, 土壤重金属元素含量呈递增趋势。但在这些研究中大棚栽培年限的时间跨度多在 10 年左右, 而且样品数有限。山东省海阳地区是我国农业生产中使用蔬菜大棚最早的地区, 但目前为止, 对该地区大棚土壤重金属元素的分布特征尚无报道。因此, 本文通过测定该地区 150 个栽植年限在 1~17 年的番茄大棚土壤重金属元素的含量, 分析该地区大棚使用年限与土壤重金属元素 Fe、Mn、Cu、Zn 含量之间的关系, 以及大棚土壤 pH 和有机碳含量对重金属元素 Fe、Mn、Cu、Zn 的影响, 为大棚土壤重金属元素管理以及城郊环保型农业的发展提供依据。

1 材料与方法

1.1 土样调查与采集

本研究的土壤调查与土样采集时间为 2009 年 8 月。以山东省海阳地区大棚比较集中的 17 个村为采样点, 选择 150 个不同种植年限的番茄大棚为研究对象, 分别采集连作年限为 1~17 年的土壤样品。具体的种植年限和每个种植年限的样品数如表 1 所示。每个大棚按蛇行法确定 5 个采样点, 采集番茄根系 0~20 cm 耕层土壤, 各采样点土壤混合均匀后用四分法留取约 1 kg 土样, 在室内风干并过 100 目筛保存。此外, 为

① 基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-JC405, KSCX2-EW-B-6)和国家公益性行业(农业)科研专项(200903011)资助。

* 通讯作者(yhdong@issas.ac.cn)

作者简介: 万欣(1983—), 女, 山东兖州人, 博士研究生, 主要研究方向为生态调控。E-mail: wanxin1983@126.com

表 1 土样的种植年限及样品数
Table 1 Utilization ages and numbers of soil samples

种植年限(年)	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
样品数(个)	4	15	12	3	5	7	4	19	34	8	13	11	3	4	4	4

了更深入了解该地区大棚土壤重金属的来源，本研究对该地区的施肥情况进行了调查，结果如表 2 所示。

1.2 试验方法

土壤 pH 采用 pH 计(水土 2 : 1)测定。Fe、Cu、Mn、Zn 的含量采用硝酸高氯酸(5 : 1)消解-原子吸收分光光度计(PE5000)法测定。具体方法见《土壤农业化学分析方法》^[11]。

1.3 数据分析

采用 Excel 2003 软件对试验数据进行处理并绘图。采用 SPSS 16.0 软件进行样本平均值的 *t* 检验和单因素方差分析。

2 结果与讨论

2.1 大棚土壤 Fe、Cu、Mn、Zn 含量的分布特征

150 个番茄大棚土壤重金属元素 Fe、Mn、Cu、Zn 含量的数据统计结果如表 3 所示。

从各元素含量的平均值和变化幅度来看，Zn 的变化幅度为 35.2 ~ 183.8 mg/kg，其最大值是世界土壤背景值的 2 倍，最小值是世界背景值的 1/3。Cu 的变化幅度为 8.6 ~ 77.2 mg/kg，其最大值是世界背景值的 2 倍多，最小值是世界背景值的 3/10。而且，

大棚土壤 Zn 和 Cu 含量平均值均比中国土壤背景值高，说明该地区大棚土壤 Zn 和 Cu 含量过量。与 Zn 和 Cu 相比，Mn 和 Fe 含量的平均值低于中国土壤背景值，变化幅度在世界背景值以下，说明这些大棚土壤 Mn 和 Fe 含量偏低。

但是，与 1979—1985 年全国第二次土壤普查资料显示的山东海阳地区农用土地元素含量的本底值相比较(表 3)，温室大棚土壤的 Fe、Cu、Mn、Zn 含量均比当时当地本底值高，其中 Zn 含量的变化较大。Zn 的含量是当时当地本底值的 4 倍；Mn 含量是当时当地本底值的 2.2 倍；Cu 含量是当时当地本底值的 2.3 倍；Fe 的含量变化不大，约为当时当地本底值的 1.3 倍。一般认为，重金属元素输入的主要途径是施化学微肥、有机肥料或生物肥。因此，这也说明了该地区大棚施肥量比上世纪 80 年代的施肥量有显著增加。

变异系数是反映总体各单位标志值的差异程度或离散程度的指标，是反映数据分布状况的指标之一，因此，可以用变异系数表征该地区土壤中重金属含量的离散程度。从表 3 数据可知，各元素变异系数在 26.7% ~ 39.2% 之间，说明该地区大棚土壤重

表 2 17 个采样村大棚土壤的施肥情况
Table 2 Information of fertilization at 17 sampled villages

采样村	样品数(个)	施肥情况
靠山村	19	猪粪 45 000 kg/hm ² ，复合肥 1 200 kg/hm ² ，有机肥 3 000 kg/hm ² ，K ₂ SO ₄ 750 kg/hm ²
梁家后村	7	牛粪 30 000 kg/hm ² ，有机肥 3 000 kg/hm ² ，复合肥 375 kg/hm ²
休家夯村	9	鸡粪 22 500 kg/hm ² ，生物肥 1 500 kg/hm ² ，复合肥 750 kg/hm ²
刘家村	12	猪粪 15 000 kg/hm ² ，复合肥 750 kg/hm ²
纪疃村	5	鸡粪 67 500 kg/hm ² ，有机肥 2 400 kg/hm ² ，微生物有机肥 1 125 kg/hm ²
草泊村	6	鸡粪 37 500 kg/hm ² ，复合肥 1 125 kg/hm ²
南茂子村	8	鸡粪 22 500 kg/hm ² ，复合肥 600 kg/hm ² ，有机肥 1 800 kg/hm ²
北茂子村	7	鸡粪 75 000 kg/hm ² ，复合肥 1 500 kg/hm ² ，有机肥 1 500 kg/hm ²
阜峰村	6	鸡粪 15 000 kg/hm ² ，复合肥 1 500 kg/hm ² ，有机肥 2 250 kg/hm ²
岚前坡村	6	鸡粪 37 500 kg/hm ² ，复合肥 900 kg/hm ² ，K ₂ SO ₄ 750 kg/hm ²
后店村	7	鸡粪 15 000 kg/hm ² ，复合肥 750 kg/hm ²
吴家阜村	10	鸡粪 30 000 kg/hm ² ，复合肥 1 500 kg/hm ² ，有机肥 1 500 kg/hm ²
河南庄村	5	牛粪 22 500 kg/hm ² ，有机肥 3 000 kg/hm ² ，复合肥 600 kg/hm ²
孙家庄村	7	猪粪 37 500 kg/hm ² ，复合肥 1 500 kg/hm ² ，有机肥 1 500 kg/hm ² ，K ₂ SO ₄ 750 kg/hm ²
朱坞村	15	鸡粪 30 000 kg/hm ² ，复合肥 1 500 kg/hm ²
小荆村	13	鸡粪 22 500 kg/hm ² ，复合肥 1 500 kg/hm ² ，有机肥 3 750 kg/hm ²
茂子集村	8	鸡粪 45 000 kg/hm ² ，复合肥 1 500 kg/hm ²

表 3 山东海阳大棚土壤 Fe、Cu、Mn、Zn 含量的描述性统计
Table 3 Descriptive statistics of Fe, Mn, Cu and Zn contents of greenhouse soils in Haiyang, China

元素	变幅 (mg/kg)	平均值±标准差 (mg/kg)	变异系数 (%)	当地土壤本底值 ^[12] (mg/kg)	中国土壤背景值 ^[13] (mg/kg)	世界土壤背景值 ^[13] (mg/kg)
Fe	10 162 ~ 33 269	18 874 ± 5 038	26.7	14 900	29 400 ± 9 480	40 000
Zn	35.2 ~ 183.8	80.1 ± 28.9	36.1	19.8	74.2 ± 32.8	90
Cu	8.6 ~ 77.2	27.7 ± 10.8	39.2	11.8	22.6 ± 11.4	30
Mn	197 ~ 911.5	467.5 ± 152.3	32.6	216	583 ± 363	1 000

金属元素 Fe、Mn、Cu、Zn 的含量具有一定的空间变异性。造成这种空间变异性的原因可能是多方面的,除了土壤本身理化性质的差异外,还有环境污染和耕作方式等外源输入的差异,其中外源输入的主要方式是污水灌溉,化肥、农家肥以及农药的使用等。

对各元素的相关性分析表明(表 4),大棚土壤中 Cu、Zn 元素之间的相关性最好。究其原因,由于 Cu、Zn 为亲硫元素,同类元素在表生地球化学上具有一定共性,因而两者具有较显著的相关性^[14]。而 Fe 与 Mn、Zn 之间均没有显著相关性,其原因有待进一步研究。

表 4 山东海阳大棚土壤 Fe、Cu、Mn、Zn 含量的相关系数
Table 4 Correlation coefficients of soil Fe, Cu, Mn and Zn concentrations in greenhouse soils of Haiyang, China

	Fe	Cu	Mn	Zn
Fe	1			
Cu	0.299**	1		
Mn	-0.190**	0.102	1	
Zn	-0.170*	0.505**	0.360**	1

注: *表示在 $P<0.05$ 水平显著相关, **表示在 $P<0.01$ 水平显著相关。

2.2 土壤 Fe、Cu、Mn、Zn 含量随大棚使用年限增长的变化特征

已有较多的研究报道了蔬菜大棚土壤重金属元素含量随使用年限增加而增加^[6-10],但多数研究中大棚的种植年限在 10 年左右。本研究结果(图 1 ~ 4)

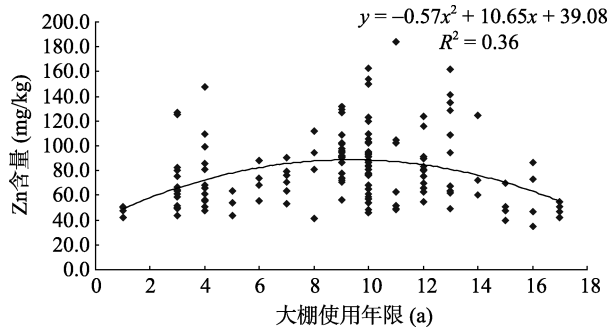


图 1 山东海阳大棚土壤 Zn 含量随时间变化的规律
Fig. 1 Changes of soil Zn content with time greenhouses used in Haiyang, China

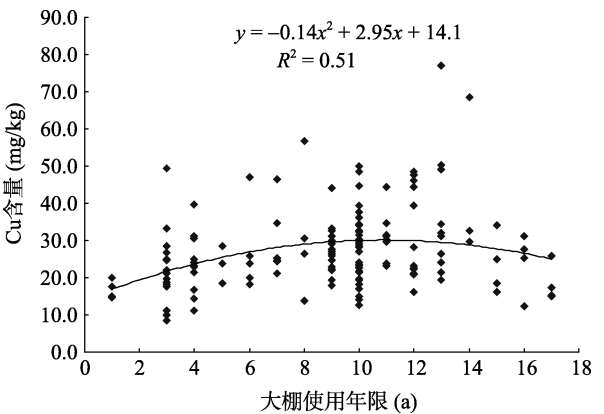


图 2 山东海阳大棚土壤 Cu 含量随时间变化的规律
Fig. 2 Changes of soil Cu content with time greenhouses used in Haiyang, China

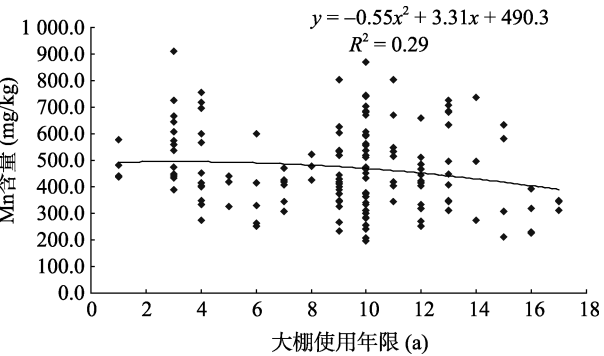


图 3 山东海阳大棚土壤 Mn 含量随时间变化的规律
Fig. 3 Changes of soil Mn content with time greenhouses used in Haiyang, China

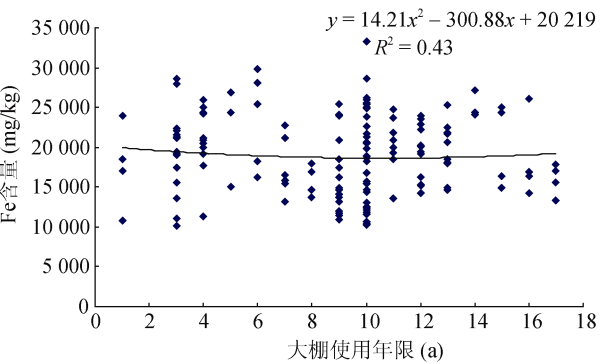


图 4 山东海阳大棚土壤 Fe 含量随时间变化的规律
Fig. 4 Changes of soil Fe content with time greenhouses used in Haiyang, China

表明,由于 Cu 和 Zn 含量具有较好的正相关关系,土壤 Cu 和 Zn 元素含量随大棚使用年限变化的趋势基本一致,即在种植年限为 1~10 年间逐年增加,而在种植年限 11~17 年间呈降低的趋势。随着蔬菜温室使用年限的增加,土壤 Mn 含量有逐年降低的趋势,而 Fe 含量变化趋势不明显。

施肥量是影响土壤重金属元素含量变化的一个主导因素。从施肥情况调查来看(表 2),该研究区蔬菜大棚每年施用大量的家禽粪便以及富含钙镁磷的复合肥料和有机肥,其中粪肥施用量一般在 15 000 kg/hm² 以上,有机肥施用量在 1 500~3 750 kg/hm² 之间,复合肥施用量在 600~1 500 kg/hm²,比较国内其他地区的施肥量^[9-10],该地区肥料的施用量普遍较高。有资料显示,我国蔬菜温室的施肥量一般可达露地的 4~10 倍,但肥料利用率却相对较低,造成大部分肥料残留在土壤中^[15]。大量研究也报道,有机肥本身含有丰富的重金属元素,大量施用有机肥可增加农田生态系统重金属元素总量;而且,施有机肥增加土壤有机质含量,而有机质分解过程中产生的有机酸可增加环境条件(如 pH 下降明显等)促进了作物对重金属元素的吸收^[16],从而造成一定年限后,某些微量含量反而有所下降(如 Cu, Zn),这表明在一定程度上增加了大棚蔬菜的重金属含量,将不利于人体健康。

土壤 pH 的变化也是大棚土壤重金属变化的影响因素之一。大棚在大量施用有机肥的同时,可能会引起土壤 pH 及氧化还原电位的变化,对土壤吸收重金属元素具有一定的推动作用^[17]。本研究对 150 个大棚土壤的 pH 与大棚使用年限进行了回归分析,得出该地区 pH 偏酸性,平均值为 5.44,土壤 pH 与大棚使用年限呈极显著负相关,即随着使用年限的增加,土壤 pH 呈下降趋势(图 5)。

有研究显示,随着土壤 pH 降低,土壤重金属

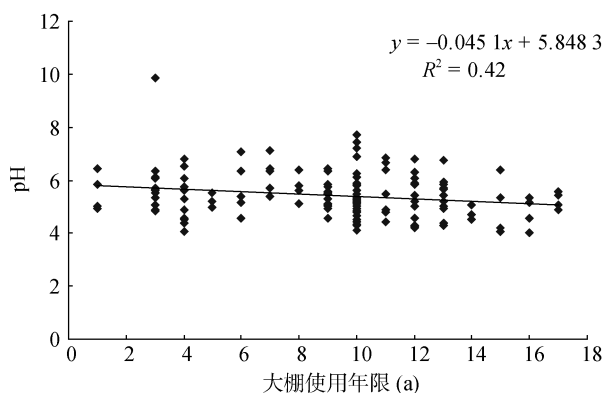


图 5 山东海阳地区大棚土壤 pH 值随时间变化的规律
Fig. 5 Changes of soil pH value with time greenhouses used in Haiyang, China

元素的有效性会增加,因为当土壤 pH 降低,土壤对重金属元素的专性吸附明显减弱,Cu、Zn 等的化合物的溶解度明显增加,从而使其有效态含量增加^[18]。但当大棚使用年限超过 10 年之后,大棚土壤酸性极低,胁迫植物也开始吸收土壤有效态的 Cu 和 Zn,从而导致土壤中 Cu 和 Zn 总量开始降低。至于 Mn 含量随种植年限降低的变化趋势,本研究认为可能是大棚长年栽植的番茄吸收 Mn 的速率高于土壤吸收 Mn 的速率造成的。具体的机理有待进一步研究。而 Fe 含量随种植年限没有太大的变化,可能是因为施用的有机肥含 Fe 量较低,对土壤积累 Fe 的总量没有影响。

3 小结

(1) 研究区番茄大棚土壤 Fe、Zn、Cu、Mn 含量平均值为 18 874、80.1、27.7、467.5 mg/kg,变异系数 26.7%~39.2%,具有一定的空间变异性。有约 1/3 的大棚土壤 Zn 和 Cu 含量超过了世界土壤背景值;6% 的大棚 Mn 含量低于世界背景值的 1/4;Fe 元素含量的属正常水平。

(2) 研究区番茄大棚土壤 Cu 和 Zn 含量在种植年限为 1~10 年间逐年增加,而在种植年限 11~17 年间呈降低的趋势;随着蔬菜温室使用年限的增加,土壤 Mn 含量有逐年降低的趋势,Fe 元素含量变化趋势不明显。

(3) 番茄大棚土壤 Cu 和 Zn 含量随大棚使用年限变化的趋势与施肥量和土壤 pH 的变化有关;而 Mn 含量逐年降低的趋势可能是大棚长年栽植的番茄吸收 Mn 的速率高于土壤吸收 Mn 的速率造成的。

参考文献:

- [1] Wei XR, Hao MD, Shao MG, Gale WJ. Changes in soil properties and the availability of soil micronutrients after 18 years of cropping and fertilization[J]. Soil & Tillage Research, 2006, 91(1/2): 120-130
- [2] Zhu JH, Li XL, Christie P, Li JL. Environmental implications of low nitrogen use efficiency in excessively fertilized hot pepper (*Capsicum frutescens* L.) cropping systems[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2005, 111(1/4): 70-80
- [3] 黄明, 林华, 张学洪, 黄海滔, 梁延鹏, 周晓玲. 施肥对大白菜吸收电镀污染土壤中重金属的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(3): 104-108
- [4] 全智, 吴金水, 魏文学, 秦红灵, 朱亦君, 刘新亮, 舒荣波, 李明德. 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): 2 919-2 929

- [5] 董国涛, 张爱娟, 罗格平, 许文强, 戴丽. 三工河流域绿洲土壤重金属元素有效含量特征分析[J]. 土壤, 2009, 41(5): 726–732
- [6] 李德成, 花建明, 李忠佩, 周祥, 张桃林, Velde B. 不同利用年限蔬菜大棚土壤中重金属元素含量的演变[J]. 土壤, 2003, 35(6): 495–499
- [7] 杜慧玲, 冯两蕊, 郭平毅, 王曰鑫. 土壤重金属元素含量与大棚使用年限的相关性研究[J]. 山西农业科学, 2006, 34(3): 56–59
- [8] 席晋峰, 俞杏珍, 周立祥, 李德成, 张甘霖. 不同地区城郊用地土壤重金属含量特征的比较[J]. 土壤, 2011, 43(5): 769–775
- [9] 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
- [10] 李瑞琴, 于安芬, 车宗贤, 邱慧珍, 赵有彪, 苏永生, 刘柱. 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
- [11] 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
- [12] 刘铮. 中国土壤微量元素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1996: 134–330
- [13] 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: 87–496
- [14] 刘增文, 段而军, 刘卓玛姐, 冯顺煜. 黄土高原半干旱丘陵区不同树种纯林土壤性质极化研究[J]. 土壤学报, 2009, 46(6): 1110–1120
- [15] 韩春丽, 刘娟, 肖春华, 张旺锋, 刘梅, 黄建军. 新疆绿洲连作棉田土壤重金属元素含量的时空变化研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(6): 1194–1201
- [16] 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
- [17] 刘兆辉, 江丽华, 张文君, 郑福丽, 王梅, 林海涛. 山东省设施蔬菜施肥量演变及土壤养分变化规律[J]. 土壤学报, 2008, 45(2): 296–303
- [18] 张春华, 张正杨, 刘国顺, 王新中, 郝伟宏, 李延涛, 贾保顺. 植烟土壤有效态重金属元素空间变异特征[J]. 土壤, 2010, 42(1): 20–25

Distribution Characteristics of Soil Heavy Metal Elements Under Tomato Greenhouses in Haiyang of China

WAN Xin^{1,2}, DONG Yuan-hua^{1,2*}, WANG Hui^{1,2}, LI Jian-gang^{1,2}, SONG Li-fen³

(1 Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 College of Science and Technology, China Agricultural University (Yantai Campus), Yantai, Shandong 264670, China)

Abstract: The distribution of soil heavy metal elements in 150 vegetable greenhouses under different utilization ages were investigated in Haiyang of Shandong Province, China. The results showed that the average contents of soil Fe, Zn, Cu and Mn were 18 874, 80.1, 27.7 and 467.5 mg/kg, respectively. The coefficients of variation was about 26.7% – 39.2%, which have some spatial variability. The contents of Cu and Zn in greenhouse soils increased at the first 10 years and then declined at the last 7 years. These variations were related with fertilization and soil pH. The content of Mn in greenhouse soils was decreased with the utilization years continued. The change of Fe content was not obvious.

Key words: Greenhouse soil, Heavy metal elements, Characteristics