

太湖地区温室土壤重金属污染状况调查及评价^①

高砚芳^{1,2}, 段增强^{1*}, 郇恒福^{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 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 本文调查了太湖地区温室蔬菜土壤中重金属 Cr、Cd、Cu、Zn、Pb 的全量和有效态含量, 并参照相关标准对其进行污染程度评价。结果表明: 不论是 0~20 cm 还是 20~30 cm 土层, 各种重金属 (Cr 除外) 全量含量均高于背景值。不论是全量还是有效态, 在 0~20 cm 土层中含量基本上高于 20~30 cm 土层中含量。采用单因子指数法和内梅罗综合污染指数法对测定结果进行评价。以江苏省土壤背景值为评价标准, 该地区土壤属轻污染; 以国家二级标准为评价标准, 该地区土壤未被污染。

关键词: 温室土壤; 全量; 有效态含量; 评价

中图分类号: X144

20 世纪 80 年代以来, 随着太湖地区工农业经济的迅速发展, 工业“三废”的排放及城市生活垃圾, 污泥和含重金属的农药、化肥的施用量都逐渐增加。因而导致该地区土壤中重金属含量不断增加。但是重金属不能被土壤微生物降解, 在土壤和植物体内不断积累, 并通过食物链最终在人体内积累, 危害人体健康。如人们所熟知的痛痛病就是由土壤 Cd 污染引起。因此, 土壤重金属元素含量水平在一定程度上可反映农产品生产的安全性。分析、评价菜地土壤重金属污染程度, 掌握蔬菜生产的土壤环境状况, 对于降低蔬菜重金属含量、提高蔬菜的质量、确保无公害蔬菜的生产、保障人们的饮食安全, 促进蔬菜生产可持续发展等都具有重要的意义^[1-3]。

目前对重金属的研究报道多偏向于露天菜地, 对温室蔬菜土壤的研究也大多集中在土壤酸化、养分积累、次生盐渍化、微生物种群以及酶活性等方面, 而重金属状况的研究却相对较少。据杜慧玲等^[4]报道, 山西省大棚土壤有效态 Cu、Zn、Fe 等含量均高于临界值; Cr、Cd、Pb 虽然未超标, 但随着大棚利用年限的增加呈递增趋势, 需引起人们的关注。李德成等^[5]初步揭示了江苏盐城地区蔬菜大棚土壤中重金属元素 As、Cd、Co、Cr、Cu、Hg、Fe、Mn、Mo、Ni、Pb 和 Zn 的含量及其随大棚利用年限的变化趋势。同时指出虽然在目前生产条件下该研究地区的蔬菜大棚土壤中重金属含量尚处在一种安全水平, 但外界投入条件的改变可能会破坏这一动态安全水平, 在今后蔬菜大

棚的生产和发展中必须加以重视。沈阳市郊区^[6]和山东寿光^[7]温室土壤重金属 Cu、Zn、Pb 含量随种植年限增加而有所增加, 其含量与种植年限呈极显著正相关; 与土壤背景值相比, 温室土壤 Cu、Zn、Cd、Pb 含量均有不同程度增加, 其中 Cu、Zn 增幅较大, 但未超出国家土壤环境质量标准, 尚未形成污染。

近 10 多年来, 太湖地区的设施栽培也得到了快速发展。据 2000 年 5 月的调查, 苏州、无锡、常州等地的设施栽培面积已超过 10000 hm², 成为当地蔬菜的重要供应源。为提高蔬菜品质, 保障城镇居民身体健康, 很有必要了解该地区温室蔬菜土壤重金属含量特点。为此, 我们于 2005 年 6 月对该地区温室土壤进行了采样调查。

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集与处理

采样地点位于江苏省西太湖宜兴观光农业科技示范园, 土壤为潮土, 质地以砂壤为主^[7]。该地区温室大棚已有 5 年棚龄, 主要种植作物为番茄和黄瓜。每个大棚长约 36 m, 宽为 6 m。传统施肥量为有机肥料 (N + P₂O₅ + K₂O ≥ 50 g/kg, 有机质 ≥ 300 g/kg) 约 4630 kg/hm², 硫酸钾型复合肥 1160 kg/hm², 过磷酸钙 1160 kg/hm², 尿素 230 kg/hm²。

选取有代表性的 8 个温室大棚, 每个温室均采用大 S 法选点取土样。取样深度分别为 0~20 cm, 20~30 cm; 混匀, 风干, 过 100 目筛, 置于聚乙烯封口袋

①基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX3-SW-439) 资助。

* 通讯作者 (zqduan@issas.ac.cn)

作者简介: 高砚芳 (1981—), 女, 山东淄博人, 硕士研究生, 主要从事温室土壤次生盐渍化发生与发展规律研究。E-mail: yfgao@issas.ac.cn

中密封保存，备用。

1.2 测定方法

土壤重金属全量前处理^[8-9]采用 HF-HClO₄-HNO₃ 联合消解法。准确称取 0.5000 g 试样于 30 ml 聚四氟乙烯坩埚中，加数滴去离子水湿润，加入 10 ml HF，2.5 ml HClO₄ 和 2.5 ml HNO₃，加盖低温消化 1~1.5 h，然后开盖并升至高温 (<250℃) 消化至高氯酸冒浓厚白烟，且内容物呈粘稠状，再加 5 ml HF，2.5 ml HClO₄ 和 2.5 ml HNO₃，消化至干 (此时应基本不冒白烟)，趁热加入 5 ml 2 mol/L HCl 加盖加热溶解残渣(宜低温)，全量转入 100 ml 容量瓶中，冷却后，定容至标线，摇匀，并过滤于塑料瓶中备测。

土壤重金属有效态前处理^[10]：称取 2.00 g 风干过 100 目筛的土样放入 50 ml 离心管中，加入 20.0 ml

EDTA 浸提剂，25℃ 振荡提取 1 h，离心 30 min (5000 r/min)，过滤于塑料瓶中备测。

样品中重金属含量采用等离子体原子发射光谱 (ICP-AES) 检测系统进行分析。

1.3 统计方法

数据处理统计均在 Excel 软件和 SPSS 数据统计软件上进行。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属全量分析

2.1.1 0~20 cm 土层土壤重金属全量分析 从表 1 可以看出，该地区温室土壤 0~20 cm 土层重金属 (除 Cr 外) 全量都超过江苏省土壤背景值，说明该地区土壤近年均受到不同程度的污染，其中以 Cu 元素污染指数最大。

表 1 0~20 cm 土层土壤重金属全量 (mg/kg)
Table 1 Total contents of heavy metals in 0~20 cm horizon soil

项目	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
含量范围	0.09~0.31	57.74~84.03	30.81~46.31	20.41~41.90	57.37~87.23
平均值	0.18	71.04	39.69	29.39	71.31
标准差	0.03	7.45	6.05	7.52	9.95
背景值	0.126	77.8	22.3	26.2	62.6
污染指数	1.43	0.91	1.78	1.12	1.14

注：背景值为江苏省元素背景值；污染指数 = 平均值/背景值，下同。

2.1.2 20~30 cm 土层土壤重金属全量分析 由表 2 可以看出，20~30 cm 土层中，除 Cr、Pb 元素外，其余元素的全量都分别超过了江苏省土壤背景值，也是以 Cu 元素的污染指数最大，其次为 Cd 和 Zn。

表 2 20~30 cm 土层土壤重金属全量 (mg/kg)
Table 2 Total contents of heavy metals in 20~30 cm horizon soil

项目	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
含量范围	0.08~0.33	66.13~81.12	29.69~48.52	11.03~51.30	56.81~86.71
平均值	0.15	71.84	37.85	22.17	67.16
标准差	0.02	4.48	5.96	3.80	7.23
背景值	0.126	77.8	22.3	26.2	62.6
污染指数	1.19	0.92	1.70	0.85	1.07

2.2 土壤重金属有效态分析

土壤中重金属元素的有效态易于转化和迁移，最易被农作物吸收利用而进入食物链，从而对环境和人畜造成危害。因此，了解重金属有效态的含量及其与全量之间的关系，对于更深入客观地了解土壤重金属污染有着重要的意义。

2.2.1 0~20 cm 土层土壤重金属有效态分析 在这 5 种重金属元素中，以 Cd 元素的有效态所占全量

的比率最高，具有最强的活性，最易于被蔬菜吸收；而 Cr 元素的活性最弱 (表 3)。

2.2.2 20~30 cm 层土壤重金属有效态分析 表 4 表明，底层土壤重金属有效态含量的情况和表层土壤有相似之处，有效态和全量的比率有效性系数也是 Cd 元素最高，具有最强的活性，最易于被蔬菜吸收；而 Cr 元素的活性最弱。

土壤中重金属浓度增加，将导致土壤污染并在农

表 3 0~20 cm 土层土壤重金属有效态含量 (mg/kg)
Table 3 Available contents of heavy metals in 0~20 cm horizon soil

项目	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
含量范围	0.02~0.18	0.15~1.14	3.05~7.31	2.49~6.78	5.94~20.14
平均值	0.07	0.73	5.38	4.01	11.50
标准差	0.02	0.34	1.41	1.06	4.10
有效性系数	38.89	1.03	13.56	13.64	16.13

注: 有效性系数 = 有效态含量平均值/全量含量平均值 × 100%, 下同。

表 4 20~30 cm 土层土壤重金属有效态含量 (mg/kg)
Table 4 Available contents of heavy metals in 20~30 cm horizon soil

项目	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
含量范围	0.01~0.19	0.23~1.27	4.24~6.09	4.24~7.00	3.87~10.99
平均值	0.05	0.60	5.34	5.72	6.75
标准差	0.01	0.21	0.44	0.68	2.24
有效性系数	33.33	0.84	14.11	25.80	10.05

产品中累积。Cd 是人体非必需营养元素, 食用 Cd 含量高的农产品必然会危害人体健康, 应引起足够的重视。

2.3 不同土层中重金属全量、有效态含量关系

从表 5 可以看出, 重金属全量含量基本上表层 0~20 cm 略高于 20~30 cm (Cr 例外)。这可能是由于这些

重金属都难溶于水, 很难随灌溉向下迁移, 从而在表层累积, 致使表层含量高于底层。对于有效态含量, 同样是表层含量大于底层 (Pb 除外), 这可能是因为表层耕层土壤酸化, 有机质含量较高, 蔬菜根系作用发达所致^[11]。

表 5 0~20 cm 和 20~30 cm 土层中重金属全量、有效态含量关系
Table 5 Relationship of the total and the available contents of heavy metals between 0~20 cm and 20~30 cm horizon soil

项目		Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
全量含量	0~20 cm	0.18	71.04	39.69	29.39	71.31
	20~30 cm	0.15	71.84	37.85	22.17	67.16
	0~20 cm/20~30 cm	1.20	0.99	1.05	1.33	1.06
有效态含量	0~20 cm	0.07	0.73	5.38	4.01	12.12
	20~30 cm	0.05	0.60	5.34	5.72	6.75
	0~20 cm/20~30 cm	1.37	1.22	1.01	0.70	1.80

注: 各元素含量均采用平均值。

2.4 重金属污染程度评价

2.4.1 评价方法 本文采用中国绿色食品发展中心推荐的单项因子污染指数法和综合污染指数法进行现状评价。

(1) 单因子指数法^[12]。单因子指数法是目前国内普遍采用的方法之一。计算公式: $P_i = C_i/S_i$, 其中, P_i 为土壤中污染物 i 的环境质量指数; C_i 为污染物 i 的实测值 (mg/kg); S_i 为污染物 i 的评价标准 (mg/kg); $P_i > 1$, 表示污染; $P_i \leq 1$, 表示未污染; 且 P_i 值越大, 则污染越严重。

(2) 综合污染指数法。为了全面反映各污染物对土壤的作用, 突出高浓度污染物对土壤环境质量的影响,

国内一般采用内梅罗综合污染指数法。

内梅罗综合污染指数法^[12]计算公式: $P_{\text{综}} = \{[(C_i/S_i)_{\text{max}}]^2 + (C_i/S_i)_{\text{ave}}^2\}^{1/2}$, 其中 $P_{\text{综}}$ 为土壤中污染物的内梅罗综合污染指数; C_i 为污染物 i 的实测值 (mg/kg); S_i 为污染物 i 的评价标准 (mg/kg); $(C_i/S_i)_{\text{max}}$ 为土壤污染物中污染指数最大值; $(C_i/S_i)_{\text{ave}}$ 为土壤污染物中污染指数的平均值。

本文中污染物的实测值 C_i 采用 0~20 cm 和 20~30 cm 重金属全量的加权值。

2.4.2 评价标准^[13] 选用江苏省土壤自然背景值和结合评价点的土壤 pH 值的国家土壤环境质量二级标准 (GB15618-1995) 作为评价标准, 对比说明太湖

地区温室土壤重金属的环境质量状况, 见表 6。

土壤分级标准采用《国家土壤环境质量标准》(GB 15618-1995) 的土壤分级标准, 见表 7。

2.4.3 评价结果分析 从表 8 数据中可以看出, 以江苏省土壤背景值为评价标准, 土壤中各污染物(除 Cr、Pb 外)的单一污染指数均>1, 说明土壤被污染, 从污染指数看: $Cu>Cd>Zn>Pb>Cr$; 而各污染物的内梅罗综合污染指数 $1.0<P_{\text{内}}\leq 2.0$, 该地区温室土壤污染等级为轻污染, 作物开始受到污染。以国家二级标准为评价标准, 土壤中各污染物的单一污染指数均<1, 说明该地区土壤未被污染, 从污染指数看 $Cu>Cd>Zn=Cr>Pb$; 内梅罗综合污染指数 $P_{\text{内}}<0.7$, 该地

区温室土壤尚处于安全等级, 清洁, 未受污染。

表 6 土壤重金属污染评价标准 (国家二级标准值 mg/kg)

Table 6 Heavy metal concentrations in the Soil Environmental Quality Standard

重金属	pH值		
	<6.5	6.5~7.5	>7.5
Cd	0.3	0.6	1.0
Cr	250	300	350
Cu	50	100	100
Pb	250	300	350
Zn	200	250	300

表 7 土壤分级标准 (mg/kg)

Table 7 Soil quality grading based on pollution indices

等级划分	$P_{\text{内}}$	污染等级	污染水平
1	$P_{\text{内}}\leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7<P_{\text{内}}\leq 1.0$	警戒级	尚清洁
3	$1.0<P_{\text{内}}\leq 2.0$	轻污染土壤	作物开始受到污染
4	$2.0<P_{\text{内}}\leq 3.0$	中污染土壤	作物均受到中度污染
5	$P_{\text{内}}> 3.0$	重污染土壤	作物均受污染已相当严重

表 8 土壤重金属污染物评价指数

Table 8 The single and synthetic pollution indexes of various pollutants

项目	单一评价指数					$P_{\text{内}}$
	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	
以江苏省土壤背景值为评价标准	1.35	0.9	1.8	1.0	1.1	1.51
以国家二级标准为评价标准	0.57	0.3	0.8	0.1	0.3	0.63

3 结论与讨论

该地区温室土壤 Cr、Cd、Cu、Zn、Pb 5 种重金属元素中, 除 Cr 外, 全量均高于江苏省元素背景值, 其中以 Cu、Cd 污染指数最高。有效态含量与全量的比率, 即有效性系数 Cd 最高, 这可能与长期大量施用 P 肥有关。由于在磷矿中含有痕量的 Cd, 从而导致成品肥料的 Cd 污染。这些肥料在施入土壤中后, 与土壤中自然存在的 Cd 相比具有较大的可溶性^[2], 因此使得有效态 Cd 含量大大增加。不使用污水灌溉和不施用重金属含量高的肥料, 是控制当地温室土壤重金属含量的重要措施之一。

以江苏省土壤背景值为评价标准, 该地区温室土壤污染等级为轻污染, 轻污染作物开始受到污染。以国家二级标准为评价标准, 该地区温室土壤尚处于安全等级, 清洁, 未受污染。

目前, 太湖地区温室土壤尚未受到外来重金属的过度污染, 土壤背景值符合农产品安全质量和无公害蔬菜生产的环境要求, 但外界投入条件的改变可能会破坏这一动态安全水平。再加上温室蔬菜地的特殊性, 如复种指数高, 化肥、农药施用量大, 环境封闭等, 更容易引起重金属的累积, 所以应当引起高度重视。

参考文献:

[1] 王晓蓉. 环境化学. 南京: 南京大学出版社, 1993: 222-228

[2] 陈怀满等著. 土壤中化学物质的行为与环境质量. 北京: 科学出版社, 2002: 24-54

[3] 田应兵, 程水源, 周建利, 秦巧燕, 陈锋. 城郊菜地土壤重金属含量及其影响因素. 湖北农业科学, 2005 (2): 66-70

[4] 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. 山西农业学报, 2006, 34 (3): 56-59

[5] 李德成, 李忠佩, 周祥, 张桃林. 不同使用年限蔬菜大棚土壤

- 重金属含量变化. 农村生态环境, 2003, 19(3): 38-41
- [6] 李见云, 侯彦林, 王新民, 董县中. 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
- [7] 李见云, 侯彦林, 化全县, 董县中. 大棚设施土壤养分和重金属状况研究. 土壤, 2005, 37(6): 626-629
- [8] 吴君兰, 张国平, 朱恩, 吴敬忠, 张霆. 土壤中重金属含量检测技术的研究. 上海农业学报, 2005, 21(4): 82-85
- [9] 李海峰, 王庆仁, 朱永官. 土壤重金属测定两种前处理方法的比较. 环境化学, 2006, 25(1): 108-109
- [10] 陈晓婷, 王欣, 陈新. 几种螯合剂对污染土壤的重金属提取效率的研究. 江苏环境科技, 2005, 18(2): 9-13
- [11] 柴世伟, 温琰茂, 韦献革, 张云霓, 董汉英, 陈玉娟. 珠江三角洲主要城市郊区农业土壤的重金属含量特征. 中山大学学报(自然科学版), 2004, 43(4): 90-94
- [12] 黄国锋, 吴启堂. 绿色食品产地土壤环境质量现状评价标准的修正. 农业环境保护, 2000, 19(2): 123-125
- [13] 国家环境保护总局. 中华人民共和国环境保护行业标准. 北京: 中国环境科学出版社, 2004

Investigation and Evaluation of Heavy Metal Contamination of Greenhouse Soils in Tai Lake Region

GAO Yan-fang^{1,2}, DUAN Zeng-qiang¹, HUAN Heng-fu^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The contents of heavy metals (Cr, Cd, Cu, Zn, Pb) of the greenhouse soils in Tai Lake region were analyzed and the polluted extents were evaluated according to the corresponding national standards. The results showed that the total contents of heavy metals (except Cr) were higher than the background values of Jiangsu Province. The total contents and available contents of heavy metals in 0 ~ 20 cm horizon soils were higher than in 20 ~ 30 cm horizon soils. The single factor pollution index and Nemorow multi-factor pollution index method were used to evaluate the soil pollution. According to the background values of Jiangsu Province and the Soil Environmental Quality Standard, the studied soils were evaluated at lightly-polluted and unpolluted degrees, respectively.

Key words: Greenhouse soil, Total content, Available content, Evaluation