

山东寿光不同农业利用方式下土壤铅的累积特征

李莲芳, 曾希柏, 白玲玉, 李树辉

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所/农业部农业环境与气候变化重点开放实验室, 北京 100081)

摘要:采用田间实地调查、地统计学和 ICP-MS 等方法,研究了基于 GIS 分析的山东省寿光市农业土壤中铅的含量及其空间分布特征,并比较了农业利用方式的影响。结果表明,研究区域农田中铅的平均含量为 $(17.97 \pm 1.22) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与 1990 年山东省土壤背景值比较,有 8.59% 的样本出现了累积趋势,而以国家土壤质量 II 级标准(GB 15618—1995)为基础进行分析则尚未发现超标样本;研究区域内 4 种主要农业利用方式比较,小麦/玉米/棉花为传统的种植模式下土壤的铅含量最高,达 $(19.83 \pm 5.34) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其后依次为露天菜地、设施菜地和对照土壤;研究区域内土壤铅含量在空间分布上以东北部、西部和西南部较高,且有由东北和西南向中部逐渐降低的趋势。设施种植条件下,土壤铅含量有随设施年限增加而升高的趋势($P < 0.05$),年累积速率为 $0.40 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,导致这种结果的原因可能在一定程度上与含铅量较高的有机肥大量施用有关。总体来说,目前研究区域土壤中铅含量尚处于正常范围,但从长远看仍需要注意其累积问题。

关键词:农业;土壤;铅;设施菜地

中图分类号:X833 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)10-1960-06

Characteristics of Lead Accumulation in Soils Under Different Agricultural Utilization Pattern in Shouguang of Shandong Province, China

LI Lian-fang, ZENG Xi-bai, BAI Ling-yu, LI Shu-hui

(Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agro-Environment & Climate Change, The Ministry of Agriculture of China, Beijing 100081, China)

Abstract: Through field survey, geostatistics and ICP-MS technology, the lead (Pb) content and its spatial distribution characteristics in agricultural soils in Shouguang City of Shandong Province were investigated. The effect of different land-use type on the soil lead content was analyzed as well. The results indicated that the average content of lead in Shouguang City was by $(17.97 \pm 1.22) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Compared to the soil background value of Shandong Province in 1990, the lead content of 8.59% samples of the total samples showed an accumulated trend, while it was not exceeded, compared to the National Soil Quality Level II (GB 15618—1995). Among the four kinds of the land-use patterns, the lead content in the soils was the highest by wheat, maize and cotton fields under traditional farming pattern, which was with $(19.83 \pm 5.34) \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, whereas it was followed by field vegetable, greenhouse vegetable and forest soils, which was as control soils. The spatial distribution of lead contents made by using GIS technology showed that the relative high lead content was found in the Northeast, West and Southwest and a decreasing trend of the lead contents from the Northeast and Southwest to the central part. The lead content in the greenhouse vegetable soils increased significantly at $P < 0.05$ level as the cultivation time prolonged, and yearly accumulation rate of lead was by $0.40 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. The reason for the lead accumulation in greenhouse vegetable field could be related to the application of the high lead content organic fertilizer. Generally, the lead contents in the studied areas were in the common range, but it was necessary to pay attention to the lead accumulation in agricultural soils in the long run.

Keywords: agriculture; soil; lead; greenhouse vegetable field

收稿日期: 2010-05-17

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2007BAD89B03, 2006BAD05B01); 中央级公益性科研院所专项资金支持项目

作者简介: 李莲芳(1975—), 女, 湖南澧县人, 博士, 副研究员, 主要从事农业环境质量演变与调控的研究。E-mail: lilianfang@ieda.org.cn

通讯作者: 曾希柏 E-mail: zengxb@ieda.org.cn

铅是一种对动物和人体具有强烈毒害作用并能在环境中稳定存在的化学元素。土壤是自然界中铅的最大贮存库,地壳中铅的平均含量约为 $13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [1],且随着空间特性的改变存在一定的变异。Elsokkary 和 Låg 对埃及尼罗河三角洲的研究表明 [2],当地未污染土壤中铅平均含量为 $14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。Davies 报道清洁土壤中铅含量为 $10 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而轻微污染土壤中铅含量为 $30 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [3]。随着采矿、冶炼、污泥农用和汽车尾气排放等人类活动的强烈干扰并向环境释放大量的铅,使得铅的生物地球化学循环速度大幅度提高,也导致世界范围内一些农田土壤的铅含量呈上升趋势 [4]。根据 Elsokkary 和 Låg 的研究,受汽车尾气污染的土壤铅浓度高达 $195 \sim 282 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [5],受矿业活动严重影响的土壤铅含量甚至高达 $1\,443.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [6]。以往国际上关于因工矿活动造成的土壤铅污染的报道屡见不鲜,而越来越多的研究表明:一些农田土壤中的铅含量还与交通流量及距离马路的远近等因素直接相关。Hafen 和 Brinkmann 的研究表明土壤中的铅浓度与离公路的距离密切相关,距公路愈近的土壤铅含量愈高 [7]。巫和听等对上海市宝山区不同类型土壤铅含量状况的研究亦表明,路边土壤的铅污染最为严重,菜地土壤次之,且随着化肥及城市固体废弃物的施用,农田土壤中的铅不断积累且明显高于底层土壤 [8]。李其林等对重庆市公路两侧土壤和蔬菜中铅含量分析发现,土壤铅含量增加明显,且公路边蔬菜富集铅的现象普遍 [9]。由于铅不能生物降解,土壤一旦被铅污染,就会在长时间内成为铅暴露的源头,不断升高的土壤铅浓度会对作物安全生产和人体健康构成威胁。由此看来,土壤铅的累积超标问题关系到土地资源可持续利用和人类社会健康发展,已成为土壤学、农学及环境学等学科领域高度关注的热点问题。

山东寿光是中国重要的设施蔬菜生产基地,已成为当今中国农业产业结构调整的典型,对其农田质量的研究具有重要的现实意义。本文以该市农田为对象,通过实地调查采样分析,揭示现有耕作方式条件下,研究区域农田中铅的含量特征及其变化趋势,为农田质量保护及农业产地环境安全提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

于 2006 年 5 月采集山东寿光不同农业利用方式下的土壤样本 128 个,并采用 GPS 定位,所采集的土壤样本包括设施菜地样本 63 个、露天菜地样本 29 个、

普通大田(含棉花地、小麦/玉米地)样本 29 个、对照土壤(受人类活动干扰相对较小的林地)样本 7 个,采样点的空间格局根据不同农业土地的利用方式以及等距离布点的原则进行设置,如图 1 所示。土样采集按照“S”型布点方法取 0~20 cm 表层土,每个样点取 5 个土样,经均匀混合并用四分法处理后,留下约 1.5 kg 土壤带回试验室。所采集的样本经自然风干后,去掉植物根系、落叶、石块,用玛瑙研钵研磨处理,分别过 20、100 目尼龙筛,贮存备用。

1.2 样品的分析

土壤样品采用美国国家环保局(USEPA)推荐的 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 方法消煮,用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, PQ-ExCell, TJA Solutions, USA)测定待测液中的铅含量。测定过程中,每测定 10 个样品后用铅标准溶液进行校正,以保证仪器测定误差控制在 2% 以内。样品分析所用试剂均为优级纯,分析过程中均加入国家标准土样(GSS-1, GSS-4)进行全程质量控制,测定结果均在误差允许范围内。

1.3 数据处理与制图

本研究中,相关数据的统计检验均采用 SPSS11.0 软件完成,采样点分布图和土壤铅含量插值图均采用 ArcGIS8.0 软件完成。

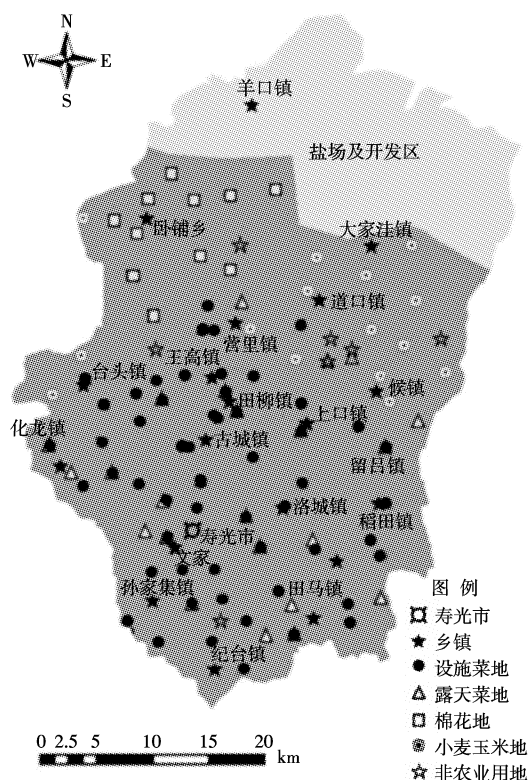


图 1 研究区域采样点的分布

Figure 1 Soil sampling sites in the study area

2 结果与分析

2.1 不同农业利用方式对土壤铅含量的影响

不同农业利用方式对土壤铅含量具有重要影响。通过对山东寿光 128 个土壤样本铅含量的分析,该区域土壤铅平均含量为 $(17.97\pm1.223)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,处于世界土壤的正常值范围 $(10\sim70\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ ^[10],与山东省土壤铅背景值 $(24.5\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$ 比较,约 8.59% 的样本出现了累积趋势。不同农业利用方式下土壤铅含量比较(表 1)表明,普通大田(小麦/玉米/棉花地)的铅含量 $[(19.83\pm5.337)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 最高,变异系数较大,而以对照土壤(自然土壤)的铅含量 $[(16.11\pm3.162)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 最低。从整体看,所有土壤样本中最高含量出现在设施耕作年限为 15 a 的设施菜地,其值高达 $45.20\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,是 1990 年山东省土壤背景值的 1.84 倍,亦超过了我国土壤环境质量 I 级标准(GB 15618—1995),其余样品含量则均在 I 级含量范围内($\leq 35\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),土壤质量状况良好。

2.2 研究区域土壤铅含量的空间分布特征

利用地统计学的 Kriging 插值法进行空间分析,得到研究区域农田土壤铅含量空间分布格局(图 2)。结果表明,位于中心区域的农业土壤铅含量普遍较低,且呈西北-东南走向,其含量范围为 $16\sim18\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而东北部、西部和西南部区域的铅含量则相对较高,达 $22\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,且向中心地带逐渐递减。

从研究区域不同乡镇的具体情况来看,全区以位于西南部区域的孙家集镇土壤铅含量较高,平均含量为 $21.15\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;其次为位于西部的台头镇 $20.94\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;再次是东北部的候镇 $19.84\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;而在中部的田马镇、田柳镇、上口镇和营里镇的含量相对较低,其含量分别为 15.40 、 15.71 、 16.72 、 $16.86\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。相应区域包括孙家集镇、文家街、王高镇、卧铺乡、羊口镇和候镇的个别土壤样本出现超过山东省土壤背景值(铅含量为 $25.8\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的现象,其中尤以孙家

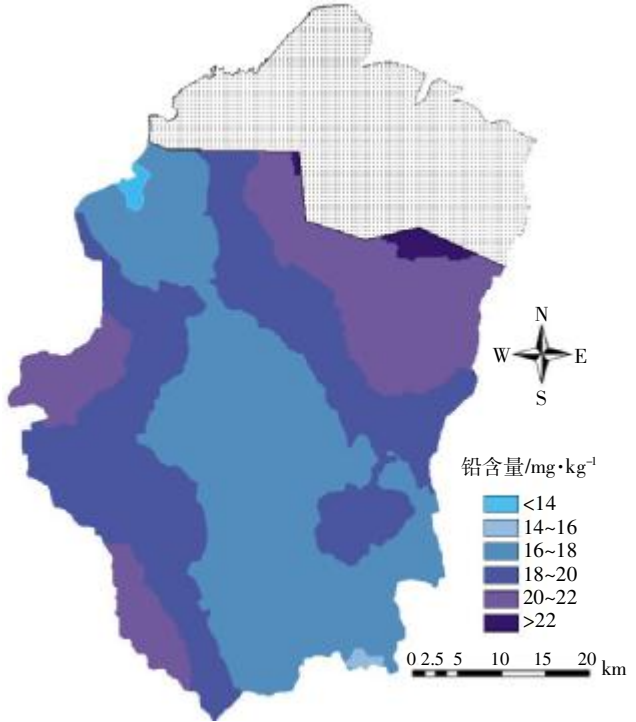


图 2 山东寿光土壤铅含量的空间分布
Figure 2 The spatial distribution of lead content in soils of Shouguang City, Shandong Province

集镇、文家街和卧铺乡更为突出;而包括纪台镇、田马镇等在内的约 63.2% 的乡镇均未出现 Pb 含量超过山东土壤背景值的现象。从本次取样分析的土壤背景值铅含量看,王高镇的背景含量最高 $22.45\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其次为候镇 $21.28\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,再次是稻田镇 $19.73\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,孙家集镇的含量最低,各乡镇按铅的背景含量高低排序依次为王高镇>候镇>稻田镇>羊口镇>上口镇>孙家集镇。如果未受到其他因素的干扰,则各区域的铅含量高低顺序应与土壤背景铅含量规律表现一致。而事实上,本研究空间分布中则以孙家集镇铅含量最高,王高镇的含量相对较低,明显低于候镇,可见这两者的表现规律并不完全吻合,表明山东寿光铅含量除受地质因素影响外,还与其他因素尤其是人类活动的干

表 1 不同农业利用方式下土壤铅含量统计分析结果

Table 1 Statistical analysis of lead content in soils under different utilization type

土壤类型	样本数	算术平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		分布类型	几何平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		最小值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数/%
		均值	标准差		均值	标准差			
设施菜地	63	17.96	4.362	对数正态	17.62	1.207	12.24	45.20	24.3
露天菜地	29	18.02	2.667	正态	17.83	1.155	13.91	25.02	14.8
普通大田	29	19.83	5.337	正态	19.18	1.298	12.61	31.95	26.9
对照土壤	7	16.11	3.162	正态	15.86	1.222	12.45	19.37	19.6
总体	128	18.36	4.296	对数正态	17.97	1.223	12.24	45.20	23.4

扰相关。从研究区域的农业生产格局来看,东北部、西部、西北部区域主要为小麦、玉米和棉花种植区域,属于无任何覆盖的农业生产系统,污染物极易在大气干、湿沉降作用下进入农田系统,尤其是寿光北部区域属于盐场及工业开发区,该区域长期存在大量的工矿业活动,对偏北区域农田构成较大影响,导致铅含量相应较高;与此相反,寿光市中部、南部为设施蔬菜集中生产区,由于设施大棚处于常年覆盖状态,受外界环境的影响较小,虽然大量农业生产资料的投入在一定程度上可能加快了污染物的累积,但设施菜地的生物量较大又使其随作物带走的量相对较多,因此,设施菜地的铅含量相对较低。

2.3 设施菜地土壤铅含量随时间的变化趋势

设施蔬菜种植是山东寿光农村的支柱产业和农民经济收入的主要来源,也是当地最主要的农业土壤利用模式。本研究通过对 62 个设施土壤样本的分析结果,并结合设施菜地相应的种植年限绘制散点图,着重探讨了设施土壤铅含量随利用年限的变化。从图 3 可以看出,设施土壤铅含量有随种植年限的延长而增加的趋势($P<0.01$),且这种趋势可用线性方程 $y=0.3987x+15.053$ 很好地拟合,式中: y 为土壤铅含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), x 为设施年限(a)。

根据该关系式进行计算,随着设施种植年限的增加,设施土壤中铅含量的累积速率约为 $0.40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$,即设施菜地铅含量每 10 a 约增加 $4.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。设施栽培属于农业生产资料高投入、生物量产出相对较高、受人类活动干扰频繁的一类农业利用方式,在国内其他区域的相关研究亦发现设施土壤存在铅累积的风险^[20],这与本研究的所得规律有相似之处。但总体来说,设施菜地的铅污染风险尚小,由于其常年被塑料薄膜覆盖,缺少雨水的淋洗和污染物的大气沉降,加上其复种指数及单位面积产出高,其相对露天菜地和普通农田而言,农田生产环境的安全程度相对较高,环境风险较小,是值得推荐的种植模式。

3 讨论

3.1 不同土地利用方式下铅的含量特征

在本研究所在区域 4 种不同的土地利用方式下,土壤铅含量由高至低的顺序为普通农田>露天菜地>设施菜地>对照土壤,设施菜地土壤 Pb 含量相对较低,与 Jo 和 Koh 的研究结果^[11],韩国设施土壤铅含量($2.59\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)明显低于旱地($3.82\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和水田($4.71\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的规律基本一致。根据郑袁明等的研

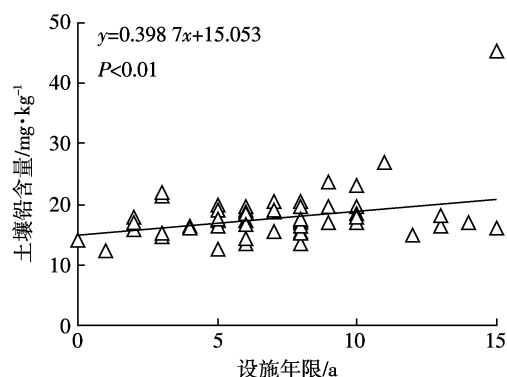


图 3 设施土壤铅含量随着蔬菜种植年限的变化
Figure 3 Change of lead content in greenhouse soils with the cultivation time

究^[12],北京市不同利用方式下的土壤铅含量均出现了明显累积,且不同利用方式对土壤铅积累有明显的影响,其中,绿化地土壤的铅含量显著较高,其后依次为果园、菜地、稻田、自然土壤、小麦地,而且果园土壤铅含量超标的样品率最高,达 21.4%,其后依次为绿化地 18.2%、菜地 11.1%、稻田 8.3%、麦地 5.2%;城区土壤的铅含量要高于近郊区,近郊区又明显高于远郊区。作者认为大气沉降、垃圾填埋及农药施用等是造成土壤 Pb 累积的主要原因,这与本研究中农田土壤铅普遍累积且受土地利用方式影响的结果具有一定的相似性。黄绍文等研究了 4 个典型区域不同农田利用方式下土壤重金属含量特征^[13],发现北京、天津等 4 个试区露天菜田和大棚菜田土壤 Pb 含量均高于大田;另据白玲玉等在吉林四平的研究结果^[14],包括 Pb、Cr、Ni、As、Cu、Zn 在内的各重金属含量均以设施菜地最高,其次为露天菜地和大田土壤,而以林地土壤最低,并认为虽然土地利用方式对 Pb 含量的影响不显著,也未出现 Pb 超标的现象,但设施菜地土壤 Pb 累积问题依然存在。

由此看来,设施菜地重金属 Pb 的累积是我国目前农业生产中较为普遍的现象,但与普通大田等其他利用方式比较,受自然地理条件差异和土地利用等因素的影响,不同地区各种农业利用方式下土壤 Pb 的累积规律也不尽相同。本研究中,山东寿光设施种植模式下土壤 Pb 含量尽管有累积趋势,但其含量明显低于普通农田和露天菜地,属于农业生产相对安全的模式,从长远来看,各种利用方式下的土壤均存在一定程度的 Pb 累积趋势,因此必须引起注意。

3.2 农田土壤中铅的来源

一般说来,土壤重金属的含量在很大程度上依赖

于成土母质,但表层土壤的重金属含量与人类活动密切相关^[10,15]。对铅而言,其主要来源有大气和雨水中铅的沉降,含铅垃圾、污泥及有机肥料的投入,以及含铅化肥和农药的施用等^[16-18]。相关研究结果表明^[19-21],由于自然和人类活动因素导致的释放到大气中的铅总量为 $332 \times 10^9 \text{ g} \cdot \text{a}^{-1}$,其中自然源的排放总量仅 $12 \times 10^9 \text{ g} \cdot \text{a}^{-1}$,其余为来自工业废弃物及含铅汽油燃烧等人类活动排放。据报道,1924年Midgley和Boyd成功将四乙基铅作为抗爆剂加入汽油中以来^[6],全球从汽车尾气排出的铅高达 $1.6 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。空气中的铅以不同粒径的气溶胶和化合物的形态运输,通过植物吸附或降水进入土壤中。据估计,美国北部Vermont森林铅的输入量可达 $700 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以上^[8]。据Smith等测定结果,降水中平均含铅量为 $22 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,而McDonals流域降水中含铅为 $13 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,该地区每年由降水带入的铅约 $140 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[22]。在本研究中,设施菜地的铅含量明显低于其他利用方式的农田土壤,这可能与温室大棚常年处于相对封闭状态,受大气沉降及降雨影响小有关。

从不同农业生产系统铅的输入途径分析,根据笔者对当地的调查研究结果,设施菜地和其他传统种植方式相比,具有较高的农业物资投入。其中设施菜地每年投入有机肥的量平均为 $82.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (以干质量计),最高可达 $197.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,化肥的年投入量为 $10.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,最高达 $38.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;而普通大田的肥料投入较少,其中化肥用量 $1.99 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,基本不施有机肥,远低于设施菜地的肥料投入水平。露天菜地的肥料投入量仅为设施菜地的1/4左右。因此若单从农田投入品来看,普通农田和露天菜地通过生产资料投入输入的污染物质应该远小于设施菜地。但在本研究中,设施菜地的铅含量总体上低于普通农田和露天菜地,这表明传统种植方式下的农田受工矿活动影响、大气沉降对土壤铅输入的贡献相比于肥料可能更为突出,从而导致土壤铅含量高于设施菜地。尽管设施菜地的铅含量水平较低,但由于设施菜地是高度集约化的农业生产方式,其投入产出均明显高于露天菜地和普通农田。根据对研究区域设施蔬菜生产农户调查的肥料施用水平,结合设施菜地利用年限进行趋势分析,发现有机肥施用量与土壤铅含量间存在显著相关关系,可用方程式 $\lg y = \lg(A \cdot x) + 1.0969$ ($P < 0.05$) 来表示[式中: y 为土壤Pb含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), A 为有机肥施用水平($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), x 为设施年限(a)],而化肥与土壤铅含量间则未发现显著相关关系。根据笔者对当地施

用主要有机肥的取样测定结果,发现鸡粪中铅平均含量约为 $8.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,猪粪的铅含量约为 $7.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其值略高于张树清等对山东地区的规模化养殖畜禽粪主要有害成分的分析结果^[24],进一步说明设施菜地有机肥的大量施用可能是导致其土壤铅累积的重要原因。

总体来说,由于寿光市属于纯农业区,土壤较少受到工业活动铅排放影响,且发达的设施园艺生产方式使得大气或运输活动产生的铅沉降量也相对较少,使该地农业土壤中铅含量远低于国家土壤质量Ⅱ级标准,土壤环境质量状况较好。但随着社会经济和农业自身的发展,该区域农田土壤已出现了较明显的铅累积趋势,应引起足够的重视和关注,今后加强对耕地土壤的保护仍然是必要的。

4 结论

本研究以山东寿光为对象,系统调查并分析了该区域不同农业利用方式下土壤Pb含量状况,并运用地统计学方法分析其空间分布规律,探讨设施土壤Pb含量随种植年限的变化趋势,主要结论如下:

(1)研究区域农业土壤的平均铅含量为 $(17.97 \pm 1.22) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与国家土壤环境质量Ⅱ级标准比较,未发现超标现象,土壤质量状况良好。不同农业利用方式下,土壤铅含量由高至低的顺序为普通农田>露天菜地>设施菜地>对照土壤。

(2)空间分析结果表明,研究区域中心地带农业土壤中铅的含量普遍较低,且呈西北-东南走向,其浓度范围为 $16 \sim 18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而东北部、西部和西南部区域的铅含量较高,部分区域达 $22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上。

(3)设施菜地铅含量随着种植年限的增加呈现相应增加的趋势($P < 0.05$),土壤铅含量随种植年限增加的累积速率为 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,但当前设施菜地的总体环境质量较好,且相比于传统种植模式,设施种植能明显减少铅的输入,是值得提倡的理想种植模式。

参考文献:

- [1] Patel K S, Shrivastava K, Hoffmann P, et al. A survey of lead pollution in Chhattisgarh State, central India[J]. *Environ Geochem Health*, 2006,28(1-2):11-17.
- [2] Elsokkary I H, Låg J. Status of some trace elements in Egyptian soils and in wheat grains[J]. *Beitrage Trop Landwirtschaft Veterinarmed*, 1980, 18(1):35-47.
- [3] Davies B E. Heavy metals in soils[M]. New York: John Wiley & Sons, 1990:177-196.

- [4] Reeder P, Shapiro L. Lead contamination of soils in Belize City, Belize, Central America[J]. *Journal of Environmental Science and Health*, 2003, 38(12):2785-2805.
- [5] Elsokkary I H, Låg J. Distribution of different fractions of Cd, Pb, Zn and Cu in industrially polluted and non-polluted soils of Odda Region, Norway[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 1978, 23(3):262-268.
- [6] Liu H Y, Probst A, Liao B H. Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill (Hunan, China)[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 339(1-3):153-166.
- [7] Hafen M R, Brinkmann R. Analysis of lead in soils adjacent to an interstate highway in Tampa, Florida[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 1996, 18(4):171-179.
- [8] 巫和听, 胡雪峰, 张国莹, 等. 上海市宝山区土壤重金属含量及其分异特征[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2004, 10(4):400-405.
Wu H X, Hu X F, Zhang G Y, et al. Contents and differential characteristics of heavy metals in soils found in Baoshan district, Shanghai[J]. *Journal of Shanghai University(Natural Science Edition)*, 2004, 10(4):400-405.
- [9] 李其林, 刘光德, 郭义. 公路两侧土壤和蔬菜中重金属的含量特征[J]. 环境科学与技术, 2004, 11(6):35-37.
Li Q L, Liu G D, Guo Y. Contents characteristic of heavy metals of vegetables and soils besides the roads[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 11(6):35-37.
- [10] Adriano D C. Trace elements in terrestrial environments-biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals[M]. 2nd edn. New York: Springer-Verlag, 2001:867.
- [11] Jo I S, Koh M H. Chemical changes in agricultural soils of Korea; Data review and suggested countermeasures[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26(2):105-117.
- [12] 郑袁明, 陈同斌, 陈煌, 等. 北京市不同土地利用方式下土壤铅的积累[J]. 地理学报, 2005, 60(5):791-797.
Zheng Y M, Chen T B, Chen H, et al. Lead accumulation in soils under different land use types in Beijing City[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(5):791-797.
- [13] 黄绍文, 金继运, 和爱玲, 等. 农田不同利用方式下土壤重金属区域分异与评价[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊):540-548.
Huang S W, Jin J Y, He A L, et al. Regional differentiation and status of heavy metals in rural soils under different patterns of land use[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(Suppl.):540-548.
- [14] 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.
- [15] Zakrzewski S F. Principles of environmental toxicology [M]. 2nd edn. Washington DC: American Chemical Society, 1997:1-48.
- [16] Rhue R D, Mansell R S, Ou L-T, et al. The fate and behavior of lead alkyls in the environment: A review[J]. *Critical Reviews in Environmental Control*, 1992, 22(3-4):169-193.
- [17] Mortvedt J J. Plant uptake of heavy metals in zinc fertilizers made from industrial by-products [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1985, 14(3):424-427.
- [18] Friedland A J, Johnson A H. Lead distribution and fluxes in a high-elevation forest in northern Vermont[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1985, 14(3):332-333.
- [19] Nriagu J O, Pacyna J M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water, and soils by trace metals[J]. *Nature*, 1988, 333(6169):134-139.
- [20] Nriagu J O. A global assessment of natural sources of atmospheric trace metals[J]. *Nature*, 1989, 338(6210):47-49.
- [21] Pacyna J M, Scholtz T M, Li Y F. Global budget of trace metal sources [J]. *Environ Reviews*, 1995, 3(2):145-159.
- [22] Turner R S, Johnson A H, Wang D. Biochemistry of lead in McDonalds Branch watershed, New Jersey pine barrens[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1985, 14(3):305-314.
- [23] 黄治平, 徐斌, 张克强, 等. 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.
Huang Z P, Xu B, Zhang K Q, et al. Accumulation of heavy metals in the four years' continual swine manure-applied greenhouse soils[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(11):239-244.
- [24] 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 S Q, Zhang F D, Liu X M, 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.