

我国设施菜田土壤重金属含量特征与影响因素

贾丽, 乔玉辉, 陈清, 李花粉, 邵小明, 马和平

引用本文:

贾丽, 乔玉辉, 陈清, 等. 我国设施菜田土壤重金属含量特征与影响因素[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(2): 263-274.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1027>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

沈阳市新民设施菜地土壤重金属污染特征分析

郭畔, 宋雪英, 刘伟健, 李玉双, 魏建兵, 李秀颖, 夏思雨

农业环境科学学报. 2019, 38(4): 835-844 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0883>

西安市郊不同年限设施菜地土壤Cd和Pb形态分析与污染评价

郭军康, 赵瑾, 魏婷, 李艳萍, 吕欣, 任倩, 王小红

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2570-2577 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0892>

黄淮海地区商品鸡饲料中重金属含量特征研究

迪娜·吐尔生江, 贾宏涛, 王农, 闫翠侠, 罗文文, 纪艺凝, 孙约兵

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2603-2612 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0885>

长期定位施肥下设施土壤重金属积累及生态风险的研究

沃惜慧, 杨丽娟, 曹庭悦, 李军

农业环境科学学报. 2019, 38(10): 2319-2327 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0293>

再生铝企业周边农田土壤与农作物重金属含量特征分析

冯依涛, 阎秀兰, 佟雪娇, 李鸣凤, 梁天昊

农业环境科学学报. 2020, 39(1): 87-96 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0897>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

贾丽, 乔玉辉, 陈清, 等. 我国设施菜田土壤重金属含量特征与影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(2): 263–274.

JIA Li, QIAO Yu-hui, CHEN Qing, et al. Characteristics and affecting factors of heavy metals content in greenhouse vegetable soils in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(2): 263–274.

我国设施菜田土壤重金属含量特征与影响因素

贾丽^{1,2,3,4}, 乔玉辉², 陈清², 李花粉², 邵小明^{1,2}, 马和平^{1,3,4*}

(1. 西藏农牧学院高原生态研究所, 西藏 林芝 860000; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 生物多样性与有机农业北京市重点实验室, 北京 100193; 3. 西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究站, 西藏 林芝 860000; 4. 西藏高原森林生态教育部重点实验室, 西藏 林芝 860000)

摘要:为调查我国设施菜田土壤重金属污染状况,探讨种植年限、土壤有机碳及全氮等因素对设施菜田土壤重金属含量的影响,以我国设施菜田土壤为研究对象,通过文献查阅和土壤样品采集两种方式,在全国和黄淮海与环渤海设施蔬菜主产区,分别获取土壤401组/233组和548个/310个样本点数据,利用数理统计、相关性及多元统计分析等方法定量描述了我国设施菜田土壤重金属积累及污染特征,并进行了土壤重金属污染影响因素分析。结果分析表明:在全国范围内,文献资料中的设施菜田土壤Cd、Pb、As、Cr、Hg、Cu、Zn、Ni平均含量分别为0.32、24.9、8.45、83.6、0.05、29.9、70.7、27.4 mg·kg⁻¹,超标率排序为Cd(30.5%)>Cu(9.8%)>Cr(7.2%)>Zn(4.8%)>Pb(4.7%)>As(3.7%),在采集的设施菜田土壤样品中,八种重金属平均含量分别为0.13、21.9、6.48、41.9、0.09、23.6、72.1、21.4 mg·kg⁻¹,超标率排序为Cd(5.3%)>Cu(1.8%)>As(1.6%)>Zn(0.9%)>Pb(0.6%)>Cr(0.6%)。在黄淮海与环渤海设施蔬菜主产区,文献资料中的设施菜田土壤Cd、Pb、As、Cr、Hg、Cu、Zn、Ni平均含量分别为0.30、25.9、8.56、67.1、0.08、33.3、79.1、32.5 mg·kg⁻¹,超标率排序为Cd(25%)>Cu(10.4%)>Cr(9.9%)>Pb(6.3%)>Zn(2.2%)>As(2.1%),在采集的设施菜田土壤样品中,八种重金属平均含量分别为0.13、22.8、5.93、43.5、0.08、23.1、69.3、19.4 mg·kg⁻¹,超标率排序为Cd(3.1%)>Cu(2.1%)>Cr(2.0%)>As(1.2%)>Pb(0.6%)>Zn(0.5%)。而Hg、Ni基本都不超标。随种植时间的延长,设施菜田土壤中Cd、As、Cu、Zn含量呈逐步累积状态,文献来源的土壤Cd在种植21~25年(3.60 mg·kg⁻¹),土壤Cu、Zn含量在26~30年(80.3 mg·kg⁻¹和180 mg·kg⁻¹)达到最高值;在采集的土壤样品中,Cd含量分别在种植16~20年(0.19 mg·kg⁻¹),As、Cu、Zn在21~25年(16.0、53.6 mg·kg⁻¹和131 mg·kg⁻¹)达到最高值。相关性分析表明,设施菜田土壤Cd含量与有机碳呈显著正相关,Cu、Zn含量与有机碳、全氮、速效磷、速效钾呈显著正相关,结合肥料中重金属含量进一步验证了磷肥和粪肥投入是设施菜田土壤重金属的重要来源。因此,为保证土壤环境及蔬菜质量安全,应注重肥料等污染源的控制。

关键词:设施菜田;土壤;重金属;种植年限;肥料投入

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)02-0263-12 doi:10.11654/jaes.2019-1027

Characteristics and affecting factors of heavy metals content in greenhouse vegetable soils in China

JIA Li^{1,2,3,4}, QIAO Yu-hui², CHEN Qing², LI Hua-fen², SHAO Xiao-ming^{1,2}, MA He-ping^{1,3,4*}

(1. Research Institute of Tibet Plateau Ecology, Tibet Agriculture & Animal Husbandry University, Nyingchi 860000, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Key Laboratory of Biodiversity and Organic Farming of Beijing City, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3. National Key Station of Field Scientific Observation & Experiment of Alpine Forest Ecology System in Nyingchi Tibet, Nyingchi 860000, China; 4. Tibet Key Laboratory of Forest Ecology, Ministry of Education, Nyingchi 860000, China)

Abstract: To quantitatively explore the effects of heavy metal accumulation and the potential corresponding factors (e.g., planting years, DOC, and TN etc.), the nationwide 401 sets of data from literatures and 548 soil samples, the Huang-Huai-Hai and Bohai Rim region 233 sets of data from literatures and 310 soil samples were collected and analyzed. Results showed that in the nationwide, the content of soil Cd,

收稿日期:2019-09-17 录用日期:2019-12-11

作者简介:贾丽(1994—),女,河南新乡人,硕士研究生,从事土壤重金属污染与修复研究。E-mail: jialila@163.com

*通信作者:马和平 E-mail: 285477889@qq.com

基金项目:现代农业产业技术体系专项资金项目(CARS-23-B16)

Project supported: China Agriculture Research System(CARS-23-B16)

Pb, As, Cr, Hg, Cu, Zn, and Ni from literatures was 0.32, 24.9, 8.45, 83.6, 0.05, 29.9, 70.7, and 27.4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. Furthermore, compared with Chinese Soil Quality Criterion (GB 15618—2018), about 30.5%, 9.8%, 7.2%, 4.8%, 4.7%, and 3.7% of total soil samples exceeded the threshold of Cd, Cu, Cr, Zn, Pb, As. The content of soil Cd, Pb, As, Cr, Hg, Cu, Zn, and Ni from collected soil samples was 0.13, 21.9, 6.48, 41.9, 0.09, 23.6, 72.1, 21.4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, and the ratios of exceeding threshold were 5.3%, 1.8%, 1.6%, 0.9%, 0.6%, and 0.6% for Cd, Cu, As, Zn, Pb, Cr respectively. In the Huang-Huai-Hai and Bohai Rim region, the content of soil Cd, Pb, As, Cr, Hg, Cu, Zn, and Ni from literatures was 0.30, 25.9, 8.56, 67.1, 0.08, 33.3, 79.1, and 32.5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. Furthermore, compared with Chinese Soil Quality Criterion (GB 15618—2018), about 25%, 10.4%, 9.9%, 6.3%, 2.2%, and 2.1% of total soil samples exceeded the threshold of Cd, Cu, Cr, Pb, Zn, As. The content of soil Cd, Pb, As, Cr, Hg, Cu, Zn, and Ni from collected soil samples was 0.13, 22.8, 5.93, 43.5, 0.08, 23.1, 69.3, 19.4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, and the ratios of exceeding threshold were 3.1%, 2.1%, 2.0%, 1.2%, 0.6%, and 0.5% for Cd, Cu, Cr, As, Pb, Zn respectively. However, both Hg and Ni from literature data and soil samples did not exceed the standard. The contents of Cd, As, Cu and Zn in soil gradually accumulate with the vegetable planting years. The data from literature showed that the soil with 21~25 planting years has the highest Cd accumulation (3.60 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), and the soil with 26~30 years has the highest Cu (80.3 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) and Zn (180 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), respectively. The data from collected soil samples showed that the highest Cd content appeared in the soil with planting years of 16~20 years (0.19 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) and the highest As (16.0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), Cu (53.6 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), and Zn (131 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) content appeared in the soil with 21~25 planting years. Correlation analysis showed that the content of Cd and organic carbon was significant positive correlated, the content of Cu and Zn was significant positive correlated with organic carbon, total nitrogen, available phosphorus, and available potassium. The heavy metals content of the fertilizer verified that phosphate fertilizer and manure were important sources of heavy metals in greenhouse vegetable soils. Measures should be taken to control the pollution sources to ensure the soil environment and vegetable quality and safety.

Keywords: greenhouse vegetable; soil; heavy metal; planting years; fertilizer inputs

最近十年来,我国设施蔬菜种植规模一直维持在 $4 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 已经开始由数量型转为质量型发展^[1], 虽然高投入及高复种指数的特点使得设施种植利用较少的土地面积生产出全国近 1/3 的蔬菜产品^[2], 但长期连作和高投入导致设施菜田土壤环境质量及蔬菜产品安全问题也引起了广泛关注^[3]。设施菜田作为高复种指数、高肥料投入、频繁耕作和灌溉等人为干扰强度大的耕地土壤, 加之肥料、有机物料及农药等农用物资投入品的质量安全存在一系列问题, 导致土壤重金属一直呈不断累积的态势^[4]。

设施菜田土壤与农田土壤重金属累积原因不完全相同, 农田土壤重金属累积主要受大气沉降、畜禽粪便及化肥携带等因素的影响^[5], 而设施菜田土壤重金属累积的主要污染源为无机肥料和有机废弃物(如:粪肥、污泥等)的还田等^[6]。不同来源粪便重金属含量有一定差异, 如:猪粪中 Cd、As、Hg、Cu、Zn 和 Ni 六种元素平均含量比牛、羊和家禽粪便高数倍; 家禽粪便中 Pb 和 Cr 的平均含量最高^[7]。另外, 在设施菜田中使用含重金属的无机物料(如:含 Cd 的磷肥)也是重金属在设施菜田中发生富集的重要来源^[8]。因此, 无机和有机物料来源的重金属在设施菜田中发生富集, 最终会影响菜田土壤环境及农产品质量^[9]。基于现状, 许多学者对设施菜田土壤重金属污染状况、生态风险评价及来源分析等方面展开了多个位点

或区域上的研究工作^[10-14], 但研究区域相对较小, 结果也存在一定差异, 从全国尺度范围内的设施菜田土壤污染现状、累积特征及污染来源等研究较为缺乏, 导致目前对我国设施菜田土壤重金属污染现状总体认识不足, 对蔬菜产品质量影响不清楚, 设施菜田土壤污染防控重点及政策缺乏科学指导。

因此, 本研究以我国设施菜田土壤为研究对象, 通过文献查阅和样品采集两种方式收集了大量的数据, 利用数理统计相关知识分析设施菜田土壤重金属污染现状及特征, 采用相关性及多元统计中的聚类分析等方法进行了设施菜田土壤重金属污染源解析, 并结合肥料重金属污染状况, 提出设施菜田土壤重金属累积的主要影响因素, 从而为全面了解我国设施蔬菜种植土壤重金属元素累积现状、特点和污染来源, 以及为设施土壤环境及重金属污染防控提供依据。

1 材料与amp;方法

1.1 数据来源

1.1.1 文献查阅

本研究以重金属[重金属(heavy metal)、镉(Cd)、铅(Pb)、砷(As)、铬(Cr)、汞(Hg)、铜(Cu)、锌(Zn)、镍(Ni)]、蔬菜土壤等为主题词, 在中国知网、万方、维普及 Web of Science 数据库中进行检索, 从中筛选出涉及我国设施种植、采样点远离矿区及公路、非污水灌

溉等蔬菜种植生产的文献,获取菜田0~20 cm土壤重金属含量的样本组401组(一个样本组代表了通过单个或多个样本计算得到的一组平均数,如文献中实际采集十个土壤样本并测得多种重金属含量,通过计算其平均值最终得到一组数据,该组数据就代表了十个样本重金属含量水平)(表1)。其中,黄淮海与环渤海设施蔬菜主产区,获取土壤重金属含量的样本组233组(表2)。文献样本数据库要素包括文献要素和样本要素(表层土壤重金属范围及含量、采样时间、样本来源地、pH)。数据来源于发表时间在2006—2018年期间的文献共101篇,由于篇幅限制,未能在本文

中一一列出。在这些文献中,86%的数据组来自2011—2018年的文献,14%的数据组来自2006—2010年的文献。

1.1.2 样品采集

参照农业部制定的《全国设施蔬菜重点区域发展规划(2015—2020年)》所涉及的设施栽培区域,按照随机取样法布点并采集设施菜田土壤样本。采样时期为上茬作物收获或拉秧后(翻耕前),且避开刚施肥的土壤。在蔬菜大棚或温室内按“Z”型进行五点采样,避开设施两侧各5 m地方,采样深度为0~20 cm,得到一份2 kg左右的混合土样,共采集样品548份(表

表1 我国设施菜田土壤样品区域分布

Table 1 The distribution of greenhouse soil samples in China

数据来源 Data sources	元素 Elements	样本组数 Sample groups	代表样点数 Samples	省份分布 Provinces distribution
文献查阅 Literature review	Cd	321	6443	1 ^a (46) ^b ,2(54),3(39),4(37),5(34),6(31),7(2),8(21),9(23),10(2),11(8),12(9),13(6),14(3),15(2),16(2),17(1),19(1)
	Pb	338	6448	1(47),2(54),3(50),4(37),5(31),6(19),7(30),8(22),9(7),10(3),11(13),12(10),13(6),14(3),15(2),16(2),17(1),19(1)
	As	242	4697	1(48),2(46),3(13),4(37),5(23),6(18),7(1),8(20),9(7),10(3),11(8),12(8),13(5),15(2),17(1),18(1),19(1)
	Cr	276	4450	1(37),2(46),3(45),4(37),5(14),6(31),7(2),8(20),9(7),10(2),11(13),12(10),13(6),15(2),16(2),17(1),19(1)
	Hg	183	3992	1(36),2(22),3(4),4(37),5(22),6(15),7(1),8(20),9(7),10(1),11(3),12(7),13(6),17(1),19(1)
	Cu	325	5377	1(49),2(35),3(49),4(37),5(31),6(21),7(21),8(22),9(23),10(12),11(13),12(4),13(3),15(2),16(2),17(1)
	Zn	268	5040	1(49),2(35),3(31),4(37),5(24),6(2),7(14),8(22),9(23),10(12),11(10),12(1),13(3),15(2),16(2),17(1)
	Ni	137	2098	1(25),2(3),3(30),4(37),5(3),6(1),8(15),9(7),10(1),11(5),12(1),13(2),14(3),15(2),16(2)
	样品采集 Sample collection	Cd	487	487
Pb		543	543	1(12),2(79),5(28),8(6),9(27),10(13),12(8),13(253),17(4),19(20),20(22),21(19),22(14),23(12),24(11),25(9),26(6)
As		485	485	1(12),2(24),5(29),8(6),9(25),10(13),12(7),13(253),17(4),19(21),20(22),21(19),22(12),23(12),24(11),25(9),26(6)
Cr		491	491	1(12),2(24),5(29),8(6),9(27),10(13),12(8),13(253),17(4),19(21),20(22),21(19),22(15),23(12),24(11),25(9),26(6)
Hg		153	153	13(153)
Cu		489	489	1(12),2(24),5(29),8(6),9(27),10(13),12(8),13(252),17(4),19(20),20(22),21(19),22(15),23(12),24(11),25(9),26(6)
Zn		435	435	1(12),2(24),5(27),8(6),9(27),10(13),12(8),13(202),17(4),19(20),20(22),21(18),22(15),23(12),24(11),25(9),26(5)
Ni		284	284	1(12),2(24),5(17),10(12),13(174),20(22),21(11),23(12)

注:样本组数列表中,文献查阅中一个样本组代表单个或多个样本点,样品采集中一个样本组仅代表单个监测样点;^a省份序号,分别为1山东、2河北、3甘肃、4内蒙古、5江苏、6山西、7辽宁、8云南、9黑龙江、10河南、11浙江、12陕西、13北京、14新疆、15吉林、16安徽、17天津、18福建、19湖北、20上海、21四川、22广西、23重庆、24湖南、25江西、26广东;^b为样本组数。下同。

Note: Sample groups: a sample group from the literature represents a single or multiple samples, A sample group from sample collection represents a single sample; ^a indicates province, 1 Shandong, 2 Hebei, 3 Gansu, 4 Inner Mongolia Autonomous Region, 5 Jiangsu, 6 Shanxi, 7 Liaoning, 8 Yunnan, 9 Heilongjiang, 10 Henan, 11 Zhejiang, 12 Shaanxi, 13 Beijing, 14 Xinjiang, 15 Jilin, 16 Anhui, 17 Tianjin, 18 Fujian, 19 Hubei, 20 Shanghai, 21 Sichuan, 22 Guangxi, 23 Chongqing, 24 Hunan, 25 Jiangxi, 26 Guangdong; ^b indicates sample groups. The same below.

1)。黄淮海与环渤海设施蔬菜主产区,获取土壤重金属含量的样本组310组(表2)。样品采集时间在2017—2018年。

1.2 土壤样品分析

文献查阅收集的土壤样品和采集的土壤样品在土壤理化性质(pH、有机碳、全氮、速效磷、速效钾)及重金属含量(Cd、Pb、As、Cr、Hg、Cu、Zn、Ni)的测定方法上基本相同。理化性质测定方法参照鲍士旦《土壤农化分析》(第三版)^[15]。采用土水比1:5,pH计测定土壤pH,凯氏法测定土壤全氮含量,碳酸氢钠浸提硫酸钼锑抗分光光度法测定土壤速效磷含量,醋酸铵浸提火焰光度法测定土壤速效钾含量,铬酸还原滴定法测定土壤有机碳含量。重金属元素含量采用王水微波消解,ICP-MS(Agilent ICP-MS 7700ce, Agilent Technologies, USA)及原子荧光法测定^[16],在整个分析测定过程中通过加入空白、重复测定以及国家标准土壤参比物质GBW07455(GSS-26)进行全程质量控制,各重金属的回收率介于85%~105%。

1.3 数据统计分析

文中重金属的统计分析以总有效数据组数计算。由于部分文献中未给出土壤pH值,文中在涉及重金属超标率时剔除了未标明土壤pH值的数据。同时,在种植年限变化分析时,剔除了种植年限不明确的数据。利用SPSS 18.0及Origin 8.0对数据进行

分析和作图。

1.4 土壤种植年限分布

为分析种植年限对土壤重金属含量的影响,从设施土壤重金属总数据库中筛选出具有种植年限信息的数据,共获取363组数据,Cd、Pb、As、Cr、Cu、Zn的样本组数分别为328、310、285、297、266、304组,其中,通过文献查阅获取的数据组数依次为120、102、77、89、58组和96组,代表样点数分别为1348、1454、841、556、1423个和1354个,年限分布范围为1~30年;从本研究实地调研采集的土壤样本获取数据组数208组,分别代表208个样点数,年限分布范围为1~25年。

1.5 相关性分析及聚类分析

为进一步更好地分析土壤重金属含量的影响因素,针对所有文献查阅和实地调研采样样点,将其中具有理化性质及与之相对应的重金属含量等数据信息的591组数据单独建立一个数据库,基本统计信息如表3所示。同时,采用相关分析和多元统计分析中的聚类分析进行了土壤重金属源解析。聚类分析主要是利用数据统计分析软件,对土壤重金属数据进行Z-score标准化处理后,采用平方欧式距离测定数据之间的距离,基于组间联接法进行R型聚类,绘制聚类分析树状图^[17]。

1.6 设施菜田投入的肥料样品分布

为进一步确认土壤重金属来源,通过文献及实地

表2 黄淮海与环渤海设施蔬菜主产区土壤样品区域分布

Table 2 The distribution of greenhouse soil samples in Huang-Huai-Hai and Bohai Rim region

数据来源 Data sources	元素 Element	样本组数 Sample groups	代表样点数 Samples	省份分布 Provinces distribution
文献查阅 Literature review	Cd	176	4735	1(46),2(49),4(6),5(30),6(31),7(2),10(1),11(4),13(6),17(1)
	Pb	191	4553	1(47),2(49),4(6),5(27),6(19),7(30),10(2),11(4),13(6),17(1)
	As	146	3381	1(48),2(41),4(6),5(20),6(18),7(1),10(2),11(4),13(5),17(1)
	Cr	142	3158	1(37),2(41),4(6),5(12),6(31),7(2),10(2),11(4),13(6),17(1)
	Hg	105	3102	1(36),2(17),4(6),5(20),6(15),7(1),10(1),11(2),13(6),17(1)
	Cu	173	3546	1(49),2(30),4(6),5(27),6(21),7(21),10(11),11(4),13(3),17(1)
	Zn	138	3446	1(49),2(30),4(6),5(20),6(2),7(14),10(11),11(2),13(3),17(1)
	Ni	42	1190	1(25),2(3),4(6),5(2),6(1),10(1),11(2),13(2)
样品采集 Sample collection	Cd	255	255	1(6),2(14),5(16),10(5),12(2),13(209),17(3)
	Pb	309	309	1(6),2(69),5(15),10(5),12(2),13(209),17(3)
	As	255	255	1(6),2(14),5(16),10(5),12(2),13(209),17(3)
	Cr	255	255	1(6),2(14),5(16),10(5),12(2),13(209),17(3)
	Hg	153	153	1(6),2(14),5(14),10(5),12(2),13(109),17(3)
	Cu	253	253	1(6),2(14),5(16),10(5),12(1),13(208),17(3)
	Zn	202	202	1(6),2(14),5(14),10(5),12(2),13(158),17(3)
	Ni	159	159	1(6),2(14),5(4),10(4),13(128),17(3)

表3 文献及采集的591组设施土壤的理化性质与对应的重金属含量

Table 3 Properties and heavy metal content of the 591 sets of greenhouse soil data from literatures and collected soils

统计项目 Parameters	pH	有机碳 Organic carbon/ g·kg ⁻¹	全氮 Total N/ g·kg ⁻¹	速效磷 Available P/ mg·kg ⁻¹	速效钾 Available K/ mg·kg ⁻¹	Cd/ mg·kg ⁻¹	Pb/ mg·kg ⁻¹	As/ mg·kg ⁻¹	Cr/ mg·kg ⁻¹	Cu/ mg·kg ⁻¹	Zn/ mg·kg ⁻¹
样本组数 Sample groups	572	456	404	421	412	561	560	517	536	535	451
平均值 Mean	7.05	17.1	1.64	181	385	0.27	27.3	9.91	54.5	30.2	87.3
标准差 SD	0.93	13.3	0.93	248	358	0.50	19.7	15.1	56.8	21.2	47.1
最小值 Minimum	3.21	0.13	0.03	0.51	0.79	0.00	0.14	0.64	0.46	2.97	2.81
最大值 Maximum	8.65	95.7	7.53	2018	2609	5.45	150	179	354	186	366
变异系数 CV	0.13	0.78	0.57	1.37	0.93	1.85	0.72	1.52	1.04	0.70	0.54

调研两种方式获取相应设施菜田投入的肥料中重金属含量数据,共获取130组数据,代表样本数551个,其中有机肥97组,代表样本数343个。

2 结果与分析

2.1 设施菜田土壤重金属含量及超标率

通过文献查阅及样品采集所得土壤重金属含量见表4及表5,根据数据的分布类型,确定各重金属元素含量均值的大小。对于分布类型为正态分布,均值采用算数平均值描述;分布类型为对数正态分布,均值采用几何平均值描述;分布类型为偏态分布,均值采用中位数来描述。

全国范围内,文献查阅来源中Cd、Pb、As、Cr、Hg、Cu、Zn、Ni平均含量分别为0.32、24.9、8.45、83.6、0.05、29.9、70.7 mg·kg⁻¹和27.4 mg·kg⁻¹(表4),其中Cd、Cr、Cu分别超出全国土壤环境背景值220%、37%、32%。样品采集来源的八种元素平均含量分别为0.13、21.9、6.48、41.9、0.09、23.6、72.1 mg·kg⁻¹和21.4 mg·kg⁻¹,其中Cd超出全国土壤环境背景值30%,其他元素接近或低于背景值。从两种数据来源的最大值来看,文献查阅来源的数据值均大于实地采集样品数据1~5倍,其中,Cd、Pb、As、Cr、Hg、Cu、Zn、Ni元素最大值分别为样品采集来源的4.8、1.5、2.5、1.4、1.8、1.2、2.1倍和1.5倍。

黄淮海与环渤海设施蔬菜主产区,文献查阅来源中Cd、Pb、As、Cr、Hg、Cu、Zn、Ni平均含量分别为0.30、25.9、8.56、67.1、0.08、33.3、79.1 mg·kg⁻¹和32.5 mg·kg⁻¹(表5),其中Cd、Cu分别超全国土壤环境背景值200%和47%。样品采集来源的土壤八种元素平均含量依次为0.13、22.8、5.93、43.5、0.08、23.1、69.3 mg·kg⁻¹和19.4 mg·kg⁻¹,其中Cd超全国土壤环境背景值30%,其他元素接近或低于背景值。文献来源的八种

元素最大值依次为样品采集来源最大值的11.4、3.5、5.9、1.4、1.2、1.3、3.0倍和2.4倍。

不同数据来源的超标状况存在较大差异,但从超标元素表现来看,Cd为主导污染因子,As元素及Cu、Zn元素易超标,而Hg、Ni基本不出现超标。就Cd、Pb、As、Cr、Cu、Zn六种元素来看,与《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中农用地土壤风险筛选值相比,在全国范围内,数据来源为文献查阅的样本组数依次为309、289、226、267、286组和236组,超标率为:Cd(30.5%)>Cu(9.8%)>Cr(7.2%)>Zn(4.8%)>Pb(4.7%)>As(3.7%)。样品采集中六种元素的样本组数依次为487、543、485、482、489、435组,超标率为:Cd(5.3%)>Cu(1.8%)>As(1.6%)>Zn(0.9%)>Pb(0.6%)>Cr(0.6%)(表4)。在黄淮海与环渤海设施蔬菜主产区,文献来源的六种元素样本组数依次为组160、147、134、129、141组和112组,超标率为:Cd(25%)>Cu(10.4%)>Cr(9.9%)>Pb(6.3%)>Zn(2.2%)>As(2.1%)。样品采集中六种元素的样本组数依次为255、309、255、255、253组和202组,超标率为:Cd(3.1%)>Cu(2.1%)>Cr(2.0%)>As(1.2%)>Pb(0.6%)>Zn(0.5%)(表5)。

2.2 种植年限对设施菜田土壤重金属累积的影响

通过上述分析发现,Cd、Pb、As、Cr、Cu、Zn是设施土壤的污染元素,因此在本节针对这六种元素进行分析。文献查阅的土壤重金属含量数据显示(图1),随种植时间延长,Cd、Cu、Zn含量呈逐步累积状态,且达到显著水平。种植年限为1~5年的设施土壤中三种元素含量分别仅为0.41、31.7 mg·kg⁻¹和83.3 mg·kg⁻¹,在21~25年Cd含量(3.60 mg·kg⁻¹)达到最高水平,在种植年限为26~30年的设施土壤中出现下降,而Cu(80.3 mg·kg⁻¹)和Zn(180 mg·kg⁻¹)在26~30年间达到最高水平,这最高含量水平与种植年限1~5年土壤重

表4 我国设施菜田土壤重金属含量(mg·kg⁻¹)Table 4 The statistical analysis of heavy metal contents in China greenhouse soils(mg·kg⁻¹)

元素 Elements	数据来源 Data sources	样本组数 Sample groups	代表样本数 Samples numbers	分布类型 Distributing type	顺序统计量 Order statistics					算术均值 Arithmetic mean	几何均值 Geometric mean	变异系数 CV	超标率 ^a Ratio of exceeding threshold ^a /%
					最小值 Minimum	25%	50%	75%	最大值 Maximum				
Cd	文献查阅	321	6443	对数	0.01	0.17	0.28	0.60	11.9	0.65±1.21	0.32±2.96	1.86	30.5
	样品采集	487	487	对数	0	0.03	0.12	0.18	2.46	0.17±0.17	0.13±2.11	1.00	5.3
Pb	文献查阅	338	6448	对数	0.63	18.1	23.1	37.1	216	32.5±29.3	24.9±2.10	0.90	4.7
	样品采集	543	543	对数	0.14	16.9	22.6	30.4	143	24.7±13.3	21.9±1.71	0.54	0.6
As	文献查阅	242	4697	对数	0.06	6.53	8.44	11.4	179	12.7±21.3	8.45±2.31	1.68	3.7
	样品采集	485	485	对数	0.09	4.33	6.94	8.96	72.8	8.07±7.34	6.48±1.91	0.91	1.6
Cr	文献查阅	276	4450	正态	1.00	48.5	70.3	88.4	354	83.6±69.2	63.8±2.21	0.83	7.2
	样品采集	491	491	正态	0.46	27.7	38.5	49.5	252	41.9±23.1	37.6±1.61	0.55	0.6
Hg	文献查阅	183	3992	偏态	0.01	0.03	0.05	0.09	1.44	0.11±0.20	0.06±3.00	1.82	0
	样品采集	153	153	对数	0	0.06	0.09	0.15	0.78	0.13±0.12	0.09±2.27	0.92	0
Cu	文献查阅	325	5377	对数	0.84	23.2	31.2	41.7	186	36.1±24.5	29.9±1.91	0.68	9.8
	样品采集	489	489	对数	2.97	18.2	22.7	30.2	159	26.9±16.6	23.6±1.64	0.62	1.8
Zn	文献查阅	268	5040	对数	0.20	56.6	90.8	115	587	97.5±67.4	70.7±3.13	0.69	4.8
	样品采集	435	435	对数	2.81	58.7	72.7	89.8	279	79.0±36.1	72.1±1.56	0.46	0.9
Ni	文献查阅	137	2098	正态	6.00	19.9	27.9	34.1	60.0	27.4±10.8	25.0±1.57	0.39	0
	样品采集	284	284	正态	7.07	16.2	20.0	26.2	39.1	21.4±6.69	20.3±1.38	0.31	0

注:^a参考标准《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)。下同。

Note:^a Threshold based on *Soil environmental quality Risk control standard for soils contamination of agricultural land* (GB 15618—2018). The same below.

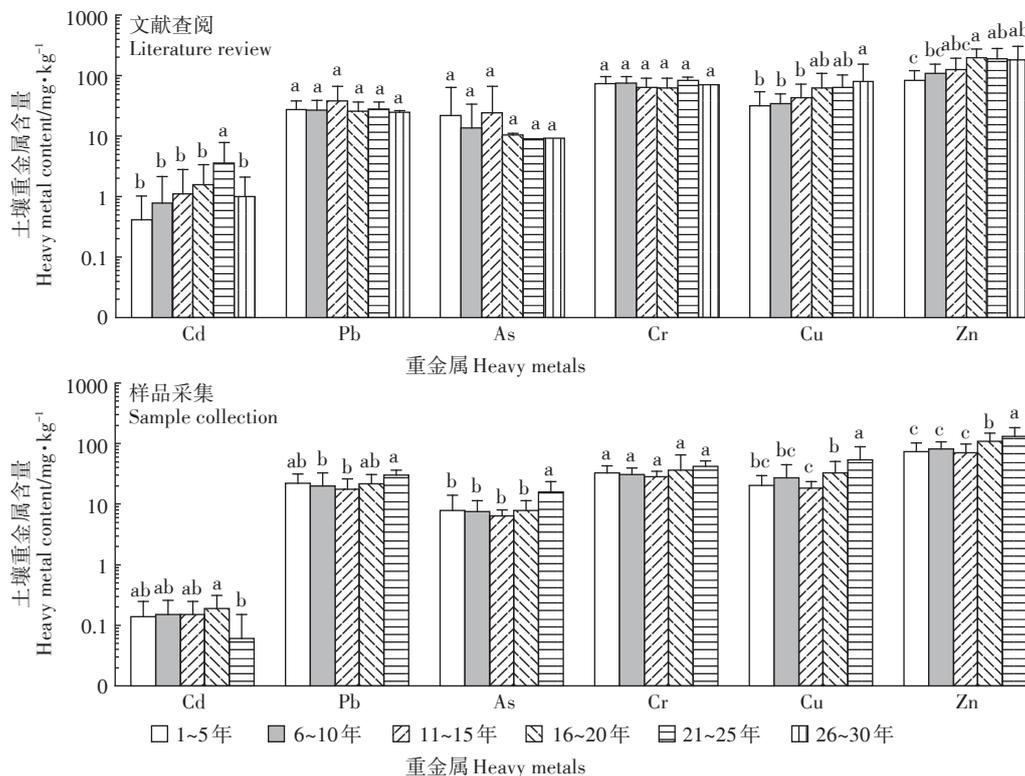
表5 黄淮海与环渤海设施蔬菜主产区土壤重金属含量(mg·kg⁻¹)Table 5 The statistical analysis of heavy metal contents in greenhouse soils in Huang-Huai-Hai and Bohai Rim region(mg·kg⁻¹)

元素 Elements	数据来源 Data sources	样本组数 Sample groups	代表样本数 Samples numbers	分布类型 Distributing type	顺序统计量 Order statistics					算术均值 Arithmetic mean	几何均值 Geometric mean	变异系数 CV	超标率 ^a Ratio of exceeding threshold ^a /%
					最小值 Minimum	25%	50%	75%	最大值 Maximum				
Cd	文献查阅	176	4735	对数	0.02	0.18	0.25	0.51	5.45	0.46±0.59	0.30±2.47	1.28	25
	样品采集	255	255	对数	0	0.08	0.12	0.16	0.48	0.12±0.08	0.13±1.71	0.67	3.1
Pb	文献查阅	191	4553	对数	0.63	18.7	23.5	38.2	216	33.8±31.0	25.9±2.08	0.92	6.3
	样品采集	309	309	正态	2.48	16.9	21.7	28.9	62.3	22.8±8.45	21.9±1.48	0.37	0.6
As	文献查阅	146	3381	对数	0.64	6.84	8.44	11.4	179	11.5±19.0	8.56±1.97	1.65	2.1
	样品采集	255	255	对数	0.82	4.05	6.95	8.87	30.3	6.73±3.29	5.93±1.71	0.49	1.2
Cr	文献查阅	142	3158	对数	0.90	48.3	70.2	88.3	343	88.8±7.10	67.1±2.20	0.08	9.9
	样品采集	255	255	对数	13.9	32.4	45.8	60.1	252	48.4±25.8	43.5±1.58	0.53	2.0
Hg	文献查阅	105	3102	正态	0.01	0.03	0.05	0.09	0.78	0.08±0.11	0.05±2.64	1.37	0
	样品采集	153	153	对数	0	0.06	0.09	0.15	0.63	0.12±0.12	0.08±2.27	1.00	0
Cu	文献查阅	173	3546	正态	0.84	23.4	29.6	41.1	111	33.3±15.9	28.9±1.85	0.48	10.4
	样品采集	253	253	对数	9.79	18.4	21.4	28.4	82.9	25.5±14.2	23.1±1.50	0.56	2.1
Zn	文献查阅	138	3446	对数	0.97	75.6	91.6	115	587	96.5±55.9	79.1±2.41	0.58	2.2
	样品采集	202	202	对数	17.1	58.2	69.9	82.4	193	73.3±25.3	69.3±1.54	0.35	0.5
Ni	文献查阅	42	1190	对数	17.6	25.8	31.0	39.5	60.1	34.0±10.8	32.5±1.36	0.32	0
	样品采集	159	159	对数	7.07	15.8	19.3	26.2	25.0	20.5±6.49	19.4±1.39	0.32	0

金属含量相比分别增加了 778%、153% 和 117%，但 Pb、As、Cr 含量变化不明显。

从本研究实地采集的土壤重金属数据来看，Cd、

As、Cu、Zn 含量随种植年限增加呈逐步累积状态，且达到显著水平。种植 1~5 年间，四种元素含量分别仅为 0.14、7.91、20.3 mg·kg⁻¹ 和 73.1 mg·kg⁻¹；重金属 Cd 在



不同小写字母表示不同种植年限之间重金属含量差异显著($P<0.05$)
Different lowercase letters indicate the significant difference among different planting years($P<0.05$)

图1 不同种植年限土壤重金属含量

Figure 1 The contents of soil heavy metal in different planting years

16~20年($0.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)累积到最高水平,在21~25年出现下降,而As($16.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、Cu($53.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、Zn($131 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)在21~25年间达到最高水平,这最高含量水平比种植年限1~5年的含量增加了36%、103%、164%和79%。两种数据来源下,Cd、Cu、Zn的累积状况表现出一致性。随种植时间的延长,土壤Cd、Cu、Zn呈逐步累积状态,也可能会造成As的累积。

2.3 设施菜田土壤重金属与理化性质的相关性

2.3.1 土壤重金属与理化性质的相关性分析

通过上述分析可知,Cd、As、Cu、Zn是设施土壤中主要的污染和累积元素,因此本节分析中主要以这四种元素为研究对象,分析其与土壤理化性质(有机碳、全氮、速效磷、速效钾)的关系。从变异系数来看,有机碳、速效磷、速效钾、Cd、As表现为强分异,全氮、Cu、Zn为中等分异,可以看出这四种元素及土壤养分受人为影响较大。

对土壤理化性质与重金属含量进行回归分析,结果表明(图2),Cd与有机碳、全氮、速效磷、速效钾呈线性正相关关系,且与有机碳呈显著正相关关系($y=0.00509x-0.87433, r=0.171^{**}; **P<0.01$)。Cu与有机碳、全氮、速

效磷、速效钾呈显著线性正相关关系($y=0.00363x+1.345, r=0.183^{**}; y=0.04695x+1.30306, r=0.122^{*}; y=0.00026x+1.34669, r=0.272^{**}; y=0.00013x+1.3328, r=0.147^{**}; *P<0.05, **P<0.01$)。Zn与有机碳、全氮、速效磷、速效钾呈显著线性正相关关系($y=0.0031x+1.83251, r=0.137^{**}; y=0.05006x+1.7796, r=0.241^{**}; y=0.00024x+1.82921, r=0.247^{**}; y=0.00008x+1.83158, r=0.145^{**}; **P<0.01$)。而As元素表现出累积趋势,但与理化性质无显著线性相关关系。从上述土壤理化性质与重金属含量相关性分析可以推测,土壤中重金属Cd、Cu、Zn含量可能受养分投入携带的影响。

2.3.2 土壤重金属与理化性质的聚类分析

聚类分析是数理统计中研究“物以类聚”的一种方法,所要解决的问题是在事前没有分类的情况下用某种相似系数来描述变量之间的亲疏程度进行数据结构的分类,常用于土壤污染源解析。为进一步确定土壤重金属的来源,利用多元统计分析中的聚类分析研究土壤重金属源解析,并绘制聚类分析树状图(图3)。聚类距离代表重金属元素间的密切程度,值越小,表明元素间关系越密切,结果共分为两类。I类:

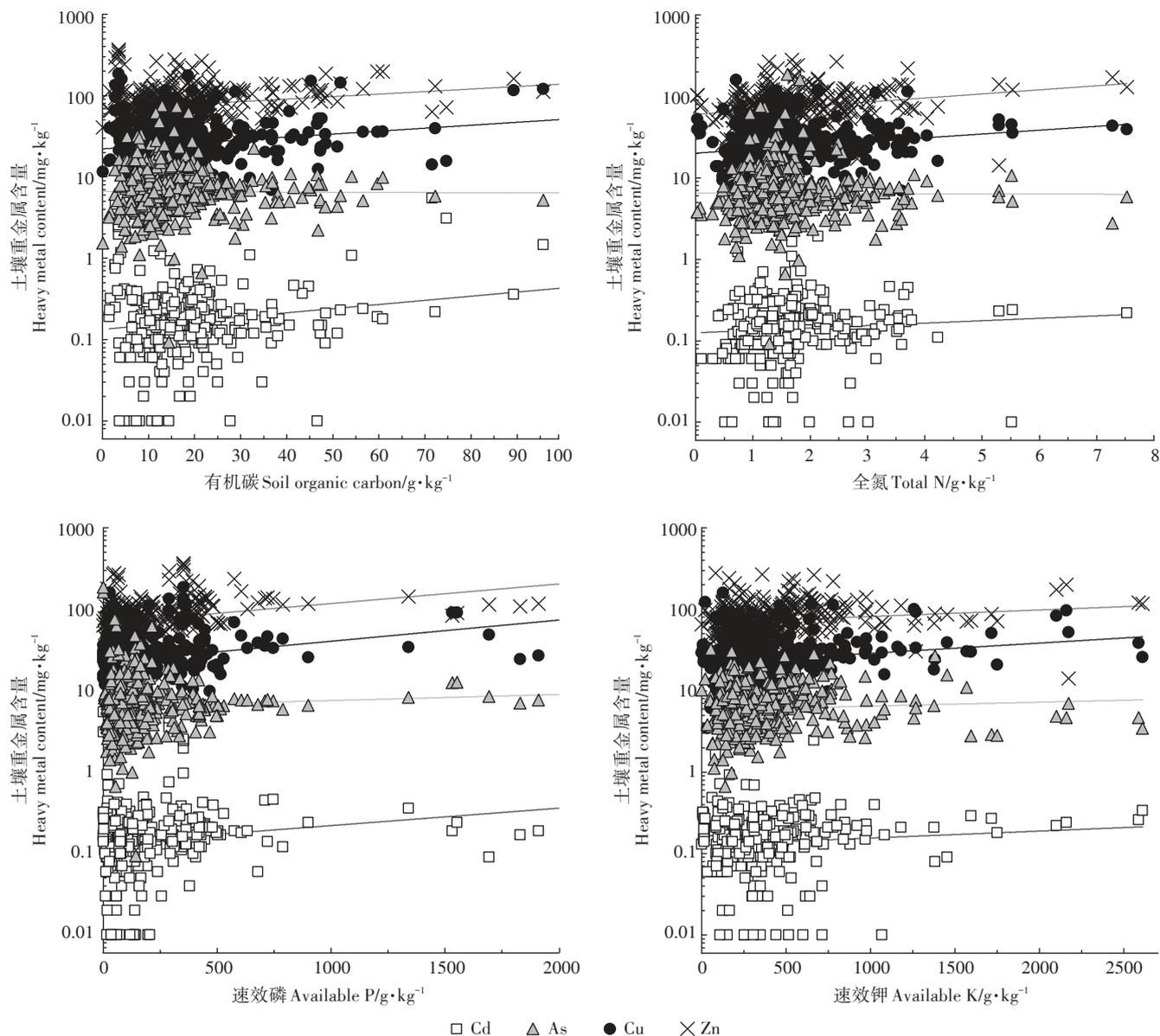


图2 土壤理化性质与重金属含量间的相关性

Figure 2 Correlation between soil properties and heavy metal contents

有机碳、全氮、速效钾、Cu、Zn、速效磷、Cd；II类：Pb、Cr、As。对土壤重金属及理化性质进行聚类分析发现，Cd、Cu、Zn与土壤理化性质被聚为一类。说明Cd、Cu、Zn与土壤有机碳及养分可能具有同源性。

2.4 设施菜田肥料重金属含量

为进一步验证土壤Cd、As、Cu、Zn四种元素与养分是否具有同源性，本节主要分析设施菜田投入的肥料中重金属含量状况。设施菜田投入的肥料对土壤重金属影响较大的主要分为有机肥和磷肥两大类，两类肥料中重金属含量状况如表6所示。有机肥和磷肥中重金属含量差异较大，有机肥中Cu、Zn平均含量分别高达 $118 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $326 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，最高含量达到

$488 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1683 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，与德国腐熟堆肥标准相比，超标率达到37%和49%。磷肥中Cd平均含量为 $2.64 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，最高含量达到 $20.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，与《肥料中砷、镉、铅、铬、汞生态指标》(GB/T 23349—2009)标准相比，超标率达到28.3%，远高于有机肥中Cd的超标率(参照我国有机肥行业标准NY 525—2012)。两类肥料中As含量相对较低。

3 讨论

3.1 我国设施菜田土壤重金属污染特征

研究采用了文献查阅和土壤样品采集两种方式分析了土壤重金属污染特征。文献查阅汇总后的土

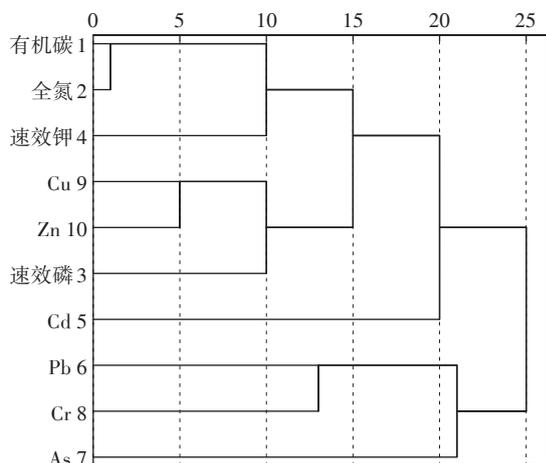


图3 土壤性质和重金属的聚类分析

Figure 3 Cluster analysis of soil properties and heavy metal

壤重金属平均含量及最大值普遍高于土壤样品采集结果。Chen等^[18]基于非针对性、合理且具代表性的全国土壤规则网格的采样方法,系统采集测定了约38 000个表层土壤样本,土壤重金属含量统计结果与本研究全国范围内样品采集方式所得结果基本相当;而文献查阅的土壤重金属超标率也高于样品采集,且相差较大。如文献查阅中Cd的超标率高达30.5%,而样品采集Cd的超标率仅为5.3%,其他元素通过两种方式获得的超标率差异也较大。两种数据来源下,黄淮海与环渤海设施蔬菜主产区的土壤重金属污染特征与全国范围内设施菜田土壤的污染特征相似,实地采样样点污染程度较小,且超标率较低。

结合土壤含量状况,推测可能是因为文献研究普遍集中于有污染的设施菜田,而对清洁或轻度污染土

壤的研究较少。相比之下,本研究中样品采集更能反映当前设施菜田土壤重金属污染并非普遍现象的现状,在正常种植生产条件下,土壤重金属污染并未像文献查阅的结果那样严重,仅个别样点存在污染。综上所述,本研究实地调研的土壤重金属含量数据更能反映当前设施菜田土壤重金属污染状况。

总体来看,我国设施土壤各类重金属含量处于较低水平,平均含量低于孟敏等^[19]2018年关于我国设施农田土壤重金属含量的文献研究结果,这可能与农用投入品差异有关。在本研究实地调研采集的样品中,约80%的土壤存在重金属累积现象,部分样点土壤重金属含量较高,表明我国设施菜田土壤重金属累积具有普遍性。土壤重金属含量相差悬殊可能是由作物种植方式、农用品受污染程度及投入量、种植年限等的差异所致。在实地采样调查数据来源下,除Pb、Cr外,黄淮海与环渤海设施蔬菜主产区重金属平均含量均低于全国平均含量水平,且所有元素含量最大值均低于全国水平,土壤重金属超标率较低,说明我国设施蔬菜主产区的土壤环境质量良好,部分超标及高重金属含量土壤需要加强污染防控与治理。从超标元素看,土壤主要受Cd、Cu、As、Zn污染,其中污染最为普遍的是Cd、Cu,而基本不受Hg、Ni元素污染,这与前人的研究结果一致^[6,14,19-21]。这可能主要还是受菜田投入品质量的影响,如含Hg等制剂农药的限制和禁止使用对减少重金属污染起到了积极作用,而因畜禽饲料添加剂导致产品质量不一的有机肥的使用对土壤中Cd、Cu、Zn、As累积起到助推作用^[22-23]。

3.2 设施菜田土壤重金属污染影响因素分析

人为种植因素及特殊的小气候条件导致设施菜

表6 设施菜田投入中肥料重金属含量

Table 6 Heavy metal content in fertilizers

样品种类 Sample types		统计项目 Parameters	Cd/mg·kg ⁻¹	As/mg·kg ⁻¹	Cu/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹
肥料 Fertilizers	有机肥 Organic fertilizer	样本组数 Sample groups	63	52	67	67
		平均值 Mean	0.62	7.79	118	326
		范围 Range	ND~4.12	1.10~63.2	2.75~488	47.6~1683
		超标率 Ratio of exceeding threshold ^a /%	2.2	12.4	37.2	49.1
		磷肥 Phosphate fertilizer	样本组数 Sample groups	19	18	11
		平均值 Mean	2.64	5.46	30.5	135
		范围 Range	0.06~20.8	0.14~27.3	2.04~109	18.0~255
		超标率 Ratio of exceeding threshold ^b /%	28.3	11.1	—	—

注:^a Cd、As参照我国有机肥料标准(NY 525—2012);Cu、Zn参照德国腐熟堆肥标准。^b Cd、As参照《肥料中砷、镉、铅、铬、汞生态指标》标准(GB/T 23349—2009)。“—”表示无标准限值。

Note:^a Cd, As threshold based on *Organic Fertilizer* (NY 525—2012); Cu, Zn threshold based on *Composting Regulation of Germany*. ^b Cd, As threshold based on *Ecological Index of Arsenic, Cadmium, Lead, Chromium and Mercury for Fertilizers* (GB/T 23349—2009). “—” No standard limits.

田土壤成为一类非常特殊的积累高有机物质的土壤^[24-25]。受种植年限的影响,土壤重金属Cd、As、Cu、Zn呈逐步累积状态,且Cd、Cu、Zn累积趋势明显,与前人的研究结果一致^[20,26]。在种植中后期,Cu、Zn变化幅度逐步增大,这与梁蕾等^[27]及王丙丽等^[26]的研究结果一致。黄标^[28]研究也发现中长期及长期(6年及15年)蔬菜种植Cd、Cu、Zn显著累积,且Cu、Zn含量增长幅度逐步增大。引起变化的原因可能是种植过程中为提高土壤速效养分及地力水平,前期大量使用含重金属的化肥,增加畜禽粪便投入,中后期主要施用畜禽粪便、秸秆等有机肥或堆肥来培肥土壤^[29-30]。可能受样本量的影响,文献及采样数据中Cd元素分别在26~30年和21~25年出现下降,但Cd含量整体是呈增加的趋势。而Pb、Cr元素受种植年限影响较小,说明这两种元素的重金属接近于平衡状态,这可能是由于设施蔬菜种植常年相对封闭的空间环境避免了含Pb汽车尾气的排放、工矿企业的化石燃烧等大气沉降所带来的大量输入而造成的土壤重金属污染^[5,31]。

本文及前人相关研究表明,设施土壤中的重金属与土壤理化性质存在显著相关性,Cd、Cu和Zn与有机质、速效氮和速效磷可能具有相似的来源^[20]。同时聚类分析发现Cd、Cu、Zn与土壤理化性质被聚为一类。说明Cd、Cu、Zn与土壤有机碳及养分可能具有同源性,与上述研究结论相吻合。这可能是肥料投入对重金属的携带作用,且长期土壤重金属输入量大于输出量而导致的土壤重金属累积^[21,32]。

设施菜田投入的有机肥和磷肥中重金属含量表明,所投入的粪肥等有机肥及化肥中的磷肥受重金属污染严重,如有机肥受Cd、Cu、Zn元素污染,其中Cu、Zn元素含量较高,磷肥中Cd含量较高。刘荣乐等^[33]研究表明我国商品有机肥Cd、Cu、Zn超标率较高(参照德国腐熟堆肥限量标准)。畜禽粪便类的有机肥大多来源于集约化养殖场,其中Cu、Zn含量常表现为猪粪>鸡粪>牛粪>羊粪^[34]。穆虹宇等^[7]对我国畜禽粪便重金属含量研究表明,Cd、Cu、Zn元素为主要污染元素。这主要是与天然伴生及饲料添加剂有关,尤其是集约化养殖场,为提高饲料转化率、提高畜禽抗病能力及改善毛色等而添加过量Cu、Zn、As等微量元素,同时,有机肥中较高的Cd元素可能是在饲料及肥料加工生产过程中带入所致^[23]。磷肥中过高的Cd元素可能是原材料磷矿中含有及开采过程中带入所致^[35],但具体原因还需进一步研究。

大量研究也表明,肥料投入对土壤重金属累积具有重要作用。如任顺荣等^[36]的长期定位试验发现长期施用磷肥能够显著增加土壤Cd含量,可能是土壤Cd的主要来源。王美等^[37]证明长期大量施用有机肥会导致土壤Cu、Zn和Cd含量增加。这也验证了土壤重金属Cd、Cu、Zn元素累积受肥料投入影响的推论。

4 结论

(1)我国设施菜田土壤生态环境较为安全。主导的重金属污染因子为Cd元素,土壤易受Cd、As、Cu、Zn元素污染,而基本不受Hg和Ni元素污染。

(2)随种植年限的延长,土壤重金属Cd、As、Cu、Zn元素含量呈累积状态,且Cd、Cu、Zn受种植年限的影响较大。而Pb、Cr受种植年限影响程度较小或基本不受种植年限的影响。

(3)土壤Cd含量与有机碳呈显著正相关,Cu、Zn含量与有机碳、全氮、速效磷及速效钾有显著的相关关系,存在着同源性。菜田投入的肥料中重金属含量表明,土壤重金属累积受磷肥及高重金属污染粪肥投入的影响。

参考文献:

- [1]董静,赵志伟,梁斌,等.我国设施蔬菜产业发展现状[J].中国园艺文摘,2017,33(1):75-77.
DONG Jing, ZHAO Zhi-wei, LIANG Bin, et al. Development status of facility vegetable industry in China[J]. *Chinese Horticultural Digest*, 2017, 33(1):75-77.
- [2]左绪金.我国设施蔬菜产业发展现状及其未来发展路径探析[J].现代农业研究,2019(5):47-48.
ZUO Xu-jin. Analysis on the present situation and future development of vegetable industry in facilities in China[J]. *Modern Agricultural Research*, 2019(5):47-48.
- [3]Liu X, Song Q, Tang Y, et al. Human health risk assessment of heavy metals in soil-vegetable system: A multi-medium analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 463-464:530-540.
- [4]Gao X, Peng Y, Zhou Y, et al. Effects of magnesium ferrite biochar on the cadmium passivation in acidic soil and bioavailability for packoi (*Brassica chinensis* L.) [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 251:109610.
- [5]Ni R, Ma Y. Current inventory and changes of the input/output balance of trace elements in farmland across China[J]. *PLoS One*, 2018, 13(6): e0199460.
- [6]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.

- [7] 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 等. 我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析[J]. 环境科学, 2020, 4(2): 986-996.
MU Hong-yu, ZHUANG Zhong, LI Yan-ming, et al. Content of heavy metals in animal manure and their accumulation risks in farmland[J]. *Environmental Science*, 2020, 4(2): 986-996.
- [8] 马榕. 重视磷肥中重金属镉的危害[J]. 磷肥与复肥, 2002(6): 5-6.
MA Rong. Pay attention to the hazardous cadmium in phosphate fertilizer[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2002(6): 5-6.
- [9] 张明超. 德州市出口蔬菜农药、重金属污染状况及风险评估的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016: 26-30.
ZHANG Ming-chao. Pollution status and risk assessment of pesticides and heavy metals in Dezhou's exported vegetables[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2016: 26-30.
- [10] 章圣强. 沿黄灌区设施蔬菜土壤养分状况及重金属含量与评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2010: 13-14.
ZHANG Sheng-qiang. Nutrient status, heavy metal concentrations and its assessment in greenhouse soils in yellow river irrigation area [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2010: 13-14.
- [11] 李莲芳, 曾希柏, 白玲玉, 等. 山东寿光不同农业利用方式下土壤铅的累积特征[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10): 1960-1965.
LI Lian-fang, ZENG Xi-bai, BAI Ling-yu, et al. Characteristics of lead accumulation in soils under different agricultural utilization pattern in Shouguang of Shandong Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(10): 1960-1965.
- [12] 赵会薇, 杨凤霞, 霍立勇, 等. 河北省4个设施蔬菜生产县域重金属含量特征及质量评价[J]. 山西农业科学, 2018, 46(2): 240-245.
ZHAO Hui-wei, YANG Feng-xia, HUO Li-yong, et al. Heavy metals content characteristics analysis and quality evaluation of 4 facilities vegetables producing counties in Hebei Province[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2018, 46(2): 240-245.
- [13] Yang L, Huang B, Hu W, et al. Assessment and source identification of trace metals in the soils of greenhouse vegetable production in eastern China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, 97(Complete): 204-209.
- [14] Zhang H, Huang B, Dong L, et al. Accumulation, sources and health risks of trace metals in elevated geochemical background soils used for greenhouse vegetable production in southwestern China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 137: 233-239.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-114.
BAO Shi-dan. Analysis of soil agrochemicals[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 25-114.
- [16] 余垚, 朱丽娜, 郭天亮, 等. 我国含磷肥料中镉和砷土壤累积风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(7): 1326-1331.
YU Yao, ZHU Li-na, GUO Tian-liang, et al. Risk assessment of cadmium and arsenic in phosphate fertilizer[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(7): 1326-1331.
- [17] 张冲. 东莞蔬菜产区重金属污染调查评价及与土壤环境因子相关性分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008: 20-21.
ZHANG Chong. Survey and assessment on heavy metal pollution situation of Dongguan's vegetable field & correlation study between the content of heavy metal in vegetables and the soil environmental parameters[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008: 20-21.
- [18] Chen H, Teng Y, Lu S, et al. Contamination features and health risk of soil heavy metals in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 512-513: 143-153.
- [19] 孟敏, 杨林生, 韦炳干, 等. 我国设施农田土壤重金属污染评价与空间分布特征[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(11): 1019-1026.
MENG Min, YANG Lin-sheng, WEI Bing-gan, et al. Contamination assessment and spatial distribution of heavy metals in greenhouse soils in China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(11): 1019-1026.
- [20] 井永苹, 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 Yong-ping, LI Yan, BO Lu-ji, 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.
- [21] 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.
- [22] 石宁宁. 不同类型农药园区周边农田土壤—作物重金属分布特征及评价研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2010: 45-46.
SHI Ning-ning. The heavy metals distribution characteristics and risky evaluation of farmland soil-crops around different types of chemical industrial park[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010: 45-46.
- [23] Papaioannou D, Katsoulos P D, Panousis N, et al. The role of natural and synthetic zeolites as feed additives on the prevention and/or the treatment of certain farm animal diseases: A review[J]. *Microporous & Mesoporous Materials*, 2005, 84(1): 161-170.
- [24] 龚子同, 张甘霖. 人为土壤形成过程及其在现代土壤学上的意义[J]. 生态环境, 2003(2): 184-191.
GONG Zi-tong, ZHANG Gan-lin. Artificial soil formation process and its significance in modern soil science[J]. *Ecology and Environment*, 2003(2): 184-191.
- [25] 查理思, 吴克宁, 冯力威, 等. 古人类活动对土壤发育的影响——以河南仰韶村文化遗址为例[J]. 土壤学报, 2016, 53(4): 850-859.
CHA Li-si, WU Ke-ning, FENG Li-wei, et al. The impact of ancient human activities on soil development: A case study of the cultural relics in Yangshao Village, Henan Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(4): 850-859.
- [26] 王丙丽, 王洪亮, 李鹏鹏. 新乡市蔬菜大棚土壤重金属含量测定及评价[J]. 资源开发与市场, 2014, 30(10): 1153-1155.
WANG Bing-li, WANG Hong-liang, LI Peng-peng. Determination and evaluation of heavy metals of vegetable greenhouses in Xinxiang [J]. *Resource Development & Market*, 2014, 30(10): 1153-1155.
- [27] 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 He-fa, et al. Soil heavy metal accumulation and risk assessment in a long-term vegetable-growing greenhouse[J]. *Environmental Chemistry*, 2018, 37(7):1515-1524.
- [28] 黄 标. 设施农业土壤环境质量演变规律、环境风险与管理对策[M]. 北京: 科学出版社, 2018:61-62.
- HUANG Biao. Variability of soil environmental quality, environmental risk and management strategies in greenhouse production system [M]. Beijing: Science Press, 2018:61-62.
- [29] 高新昊, 刘 苹, 刘兆辉, 等. 寿光设施菜地土壤养分累积与农产品硝酸盐污染研究[J]. 江西农业学报, 2013, 25(6): 125-128, 136.
- GAO Xin-hao, LIU Ping, LIU Zhao-hui, et al. Studies on soil nutrient accumulation in protected vegetable land and nitrate pollution of agricultural products in Shouguang City[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2013, 25(6):125-128, 136.
- [30] 李 瞳, 吴 荣, 李 杰, 等. 不同使用年限大棚土壤重金属污染评价[J]. 河南农业科学, 2016, 45(12):62-66.
- LI Tong, WU Rong, LI Jie, et al. Evaluation of soil heavy metal pollution in greenhouses with different planting years[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2016, 45(12):62-66.
- [31] Luo L, Ma Y, Zhang S, et al. An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(8):2524-2530.
- [32] 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, 2011:38-39.
- 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: 38-39.
- [33] 刘荣乐, 李书田, 王秀斌, 等. 我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 392-397.
- LIU Rong-le, LI Shu-tian, WANG Xiu-bin, et al. Contents of heavy metal in commercial organic fertilizers and organic wastes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2):392-397.
- [34] 张晓旦. 我国畜禽粪便中重金属含量特征及生物有效性与控制阈值的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2011:28-30.
- ZHANG Xiao-dan. Research on the content, bioavailability and control limits of heavy metals in livestock manure in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2011:28-30.
- [35] Roberts T L. Cadmium and phosphorous fertilizers: The issues and the science[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 83:52-59.
- [36] 任顺荣, 邵玉翠, 高宝岩. 长期定位施肥对土壤重金属含量的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 9(4):96-99.
- REN Shun-rong, SHAO Yu-cui, GAO Bao-yan. Effects of long-term located fertilization on heavy-metal content of soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 9(4):96-99.
- [37] 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 Mei, LI Shu-tian. Heavy metals in fertilizers and effect of the fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(2):466-480.