

山东寿光不同农业利用方式下土壤铬的累积特征

李树辉¹, 李莲芳¹, 曾希柏^{1*}, 白玲玉¹, 王道龙²

(1.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; 2.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要:为探讨不同农业利用方式下土壤中重金属铬含量状况及其空间分布趋势,按照基本等距离采样的原则,在山东寿光蔬菜种植基地采集土壤样本进行相关分析,并在此基础上探讨了设施菜地中铬含量随着设施种植年限的累积特征。结果表明,山东寿光农业土壤中铬含量均值为 $51.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与山东省土壤铬背景值 $66.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 比较,发现其中 9.7% 的样本含量超过背景值,但均未超过国家土壤环境质量 II 级标准(GB 15618—1995);将 4 种不同农业利用方式比较,发现设施栽培模式下土壤铬含量最高,达 $53.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;其后依次为普通农田、露天菜地和对照。同时,研究区域内土壤铬含量在空间分布上呈现出外周高中间低的趋势。设施栽培模式下,土壤铬含量随设施年限的增加呈现出一定的升高趋势,局部区域设施土壤铬的年累积速率达 $2.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,导致这种结果的原因可能与含铬量较高有机肥的大量施用等有关。总体来说,研究区域内农田铬含量处于土壤标准正常范围,但从长远看,设施菜地中铬累积的现象不容忽视。

关键词:农业;利用方式;土壤;铬;累积;设施菜地

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)08-1539-07

Charateristics of Chromium Accumulation in Soils Under Different Agricultural Utilization Pattern in Shouguang of Shandong Province, China

LI Shu-hui¹, LI Lian-fang¹, ZENG Xi-bai¹, BAI Ling-yu¹, WANG Dao-long²

(1. 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; 2. Institute of Resource and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In Accordance with the basic principle of equidistant sampling, soil samples were collected in the vegetable plantation land of Shouguang City, Shandong Province, and corresponding chemical analysis were conducted to systematically investigate the content of chromium in soils under different utilization type and its spatial distribution trend, and the chromium accumulation characteristics. The results indicated that the average content of chromium in agricultural soils in the study areas was by $51.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Compared to soil background value of chromium in Shandong Province, about 9.7% of the total samples exceeded $66.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, but all the samples did not exceeded that of grade II value recommended in the National Soil Quality Standard(GB 15618—1995). In comparison with four kinds of land utilization types in agriculture, the highest content of chromium in soils was found in protected cultivation planting pattern with the content of $53.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, then by the common farmlands and open land planting with vegetables, while the lowest content of chromium was found in control soil. The result of spatial analyses on chromium content showed that lower chromium content appeared in the middle region than that in the surroundings. Under the protected cultivation pattern, the content of chromium increased with the cultivation time prolonged, the accumulation rate of chromium reached at $2.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$. The underlying reason may be contributed to the application of abundant organic fertilizer with high content of chromium. Totally, the content of chromium in the region was in the permitted range of Soil Quality Standard recommended. In the long run, the problem on chromium accumulation in greenhouse vegetable plantation soils should not be neglected.

Keywords: agriculture; utilization pattern; soil; chromium; accumulation; greenhouse vegetable field

收稿日期:2011-01-15

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划项目(2007BAD89-B03)

作者简介:李树辉(1975—),男,博士研究生,主要从事农业环境演变与调控研究。E-mail:lish@most.cn

* 通讯作者:曾希柏 E-mail:zengxb@ieda.org.cn

铬是国际社会公认的3种致癌金属之一^[1],研究表明,农作物中累计的铬含量与土壤中总铬浓度高低具有一定的正相关性,人体摄入含高量铬的农产品后,可造成体内铬含量的升高而影响健康。铬暴露可导致恶心、腹泻、肝肾损伤、呼吸障碍和系统性中毒损伤等问题^[2-4],因而,美国环保局推荐的饮用水限量值为 $100\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[5]。铬作为自然环境的天然成分,其在地壳中的平均丰度为 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,我国土壤表层铬的含量在 $1.9\sim 519\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,均值约为 $57.56\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[6]。通常而言,铬及其化合物是冶金、金属加工、电镀、制革、油漆、颜料等行业常用的基本原料,在上述行业的生产过程中产生大量含铬废气、废水和废渣,可导致严重的环境污染问题。虽然在自然土壤中含一定量的铬对植物生长是有利的^[7],但土壤中过量的铬会引起土壤贫瘠,导致植物枯萎病,破坏土壤的生产性能,抑制作物生长,降低产量,同时积累在植物体内的铬还会通过食物链而影响人体的健康。目前,国内已有研究报道一些农田土壤存在重金属铬的环境累积风险问题^[8-9],而不同土地利用方式通常可对土壤重金属的积累产生一定影响^[10-11]。郑袁明等^[12]的研究表明,北京市6种土地利用类型中,按从高到低的顺序土壤铬浓度依次为:菜地>稻田>麦地>绿化地>果园>自然土壤。李莲芳等^[13]的研究发现,不同农业利用模式对土壤铅含量存在一定程度的影响。

山东寿光是我国著名的蔬菜之乡,近年来设施蔬菜产业发展迅速,随着长期高投入高产出的集约化经营,已经产生了土壤酸化、盐渍化等环境质量恶化问题^[14],对当地农业生产的可持续发展构成严重影响。重金属作为土壤环境中天然存在的化学物质,其含量的高低也是影响土壤环境质量的至关重要的因素。迄今为止,针对多种土地利用方式下尤其是针对设施菜地为主要土地利用类型的铬含量变化趋势及环境风险问题的研究报道较少。本文以该地区为对象,探讨多种农业利用方式下土壤铬的含量和空间分布规律,比较分析设施栽培与传统种植模式下的土壤铬含量差异及其变化规律,为制定合理的土地利用规划和农产品安全生产提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集

山东寿光是典型的农业大县(市),寿光具备良好的发展农业生产的自然条件和优势,也是我国著名的蔬菜之乡^[15]。该市境内多为滨海平原,河流湖泊较多,

成土母质为河湖冲积物,质地均匀、肥力较高。近年来,随着设施蔬菜的发展,该地区设施菜地所占比例有逐年加大趋势,土地的主要利用方式有设施菜地、露天菜地、棉花地、小麦/玉米地等。在本研究中,按照基本等距离原则采集土壤样本,并将受人类活动干扰相对较小的土壤(林地、荒草地)作为对照,共128个样本,其中包括62个设施菜地样本,具体样点分布见图1。考虑到种植年限等因素可能对设施土壤重金属铬含量的可能影响,在设施菜地相对集中的小区域内(土壤环境条件相似、作物类型和施肥方式及产量差异较小等)采集一系列设施菜地样本,如在营里镇和化龙镇等地按照不同设施年限采取了系列样本。每个土壤样本的采集均按“S”型布点并取0~20 cm表层土壤,土样均匀混合后,用四分法处理,最后剩余约1.5 kg带回实验室风干,去掉植物根系、落叶、石块等后,经玛瑙研钵研磨,分别过20、100目的尼龙筛,贮存备用。

1.2 样品分析

土壤样品铬含量采用USEPA推荐的 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 方法消煮,电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, PQ-ExCell, TJA Solutions, USA)测定。分析过程中,每测定10个样品后用铬标准溶液进行校正,以保证仪器测定误差控制在2%以内。样品分析所用试剂除 H_2O_2 为分析纯外,其余均为优级纯,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。

1.3 数据处理与作图

本研究中,相关数据的统计检验均采用SPSS11.0软件和Excel2003完成,样点分布图和土壤铬含量插值图均采用ArcGIS8.0完成。

2 结果与讨论

2.1 不同农业利用方式下土壤铬含量

根据不同土地利用方式下的铬含量(见表1),寿光农业土壤中铬含量平均为 $(51.2\pm 9.7)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。土壤铬含量以设施菜地最高 $(53.0\pm 9.4)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而对照土壤的铬含量 $(48.8\pm 9.9)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为最低,且设施菜地土壤铬含量显著高于自然对照土壤($P<0.05$),而变异系数以普通农田最大,其次为对照土壤,设施菜地和露天菜地铬含量的变异系数则相对较小。将该区域铬含量与山东省土壤铬背景值 $66.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 比较,发现9.7%的样本含量超过背景值,但均未超过我国土壤环境质量Ⅱ级标准中 $250\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 限量值,土壤质量状况较好。值得注意的是,对照及各种利用方式下

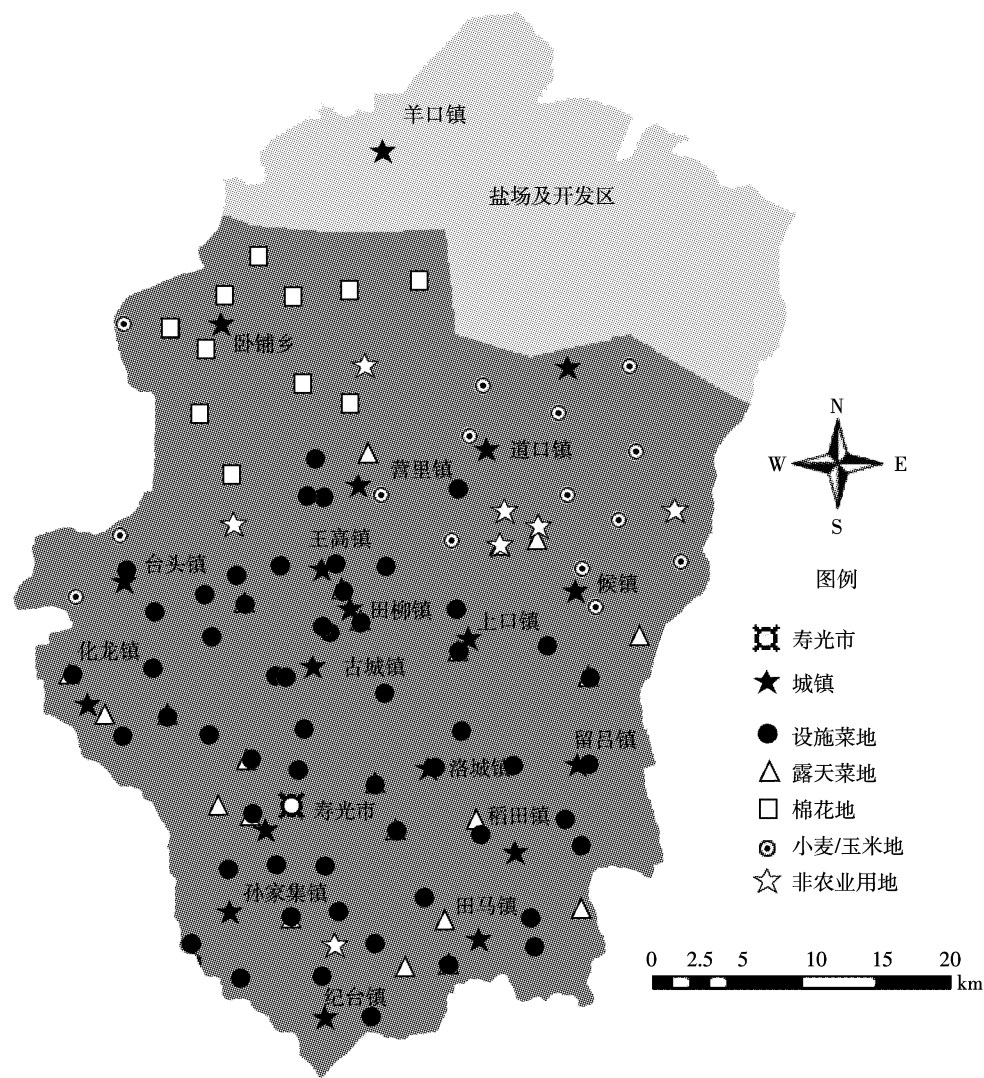


图 1 研究区域采样点的分布
Figure 1 Soil sampling sites in the study area

表 1 不同农业利用方式下的土壤铬含量

Table 1 Chromium content in soils under different utilization type in agriculture

土壤类型	样本数/个	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	53.0a	9.4	正态	52.3	1.2	39.0	82.6	17.7
露天菜地	29	49.0ab	8.5	正态	48.0	1.2	37.6	67.8	17.3
普通农田	29	50.9ab	11.1	正态	49.5	1.2	35.2	76.2	22.0
对照土壤	7	48.8b	9.9	正态	45.1	1.3	30.7	59.8	20.3
总体	128	51.2	9.7	正态	50.3	1.2	30.7	82.6	19.0

注:同列数据不同小写字母代表差异显著($P<0.05$, Duncan 新复极差法)。

土壤铬的平均含量均低于背景值,是否为自然状态下的生物地球化学过程对土壤中铬具有“贫瘠化”作用?而在人类活动影响下又使土壤中铬出现累积?这种现象还有待进一步研究。

2.2 山东寿光农业土壤铬的空间分布

通过 Kriging 插值的球状模型拟合,得到山东寿光各重金属的空间分布规律(图 2)。可以看出,土壤中铬含量的分布表现为东西两侧高中部低的趋势,但

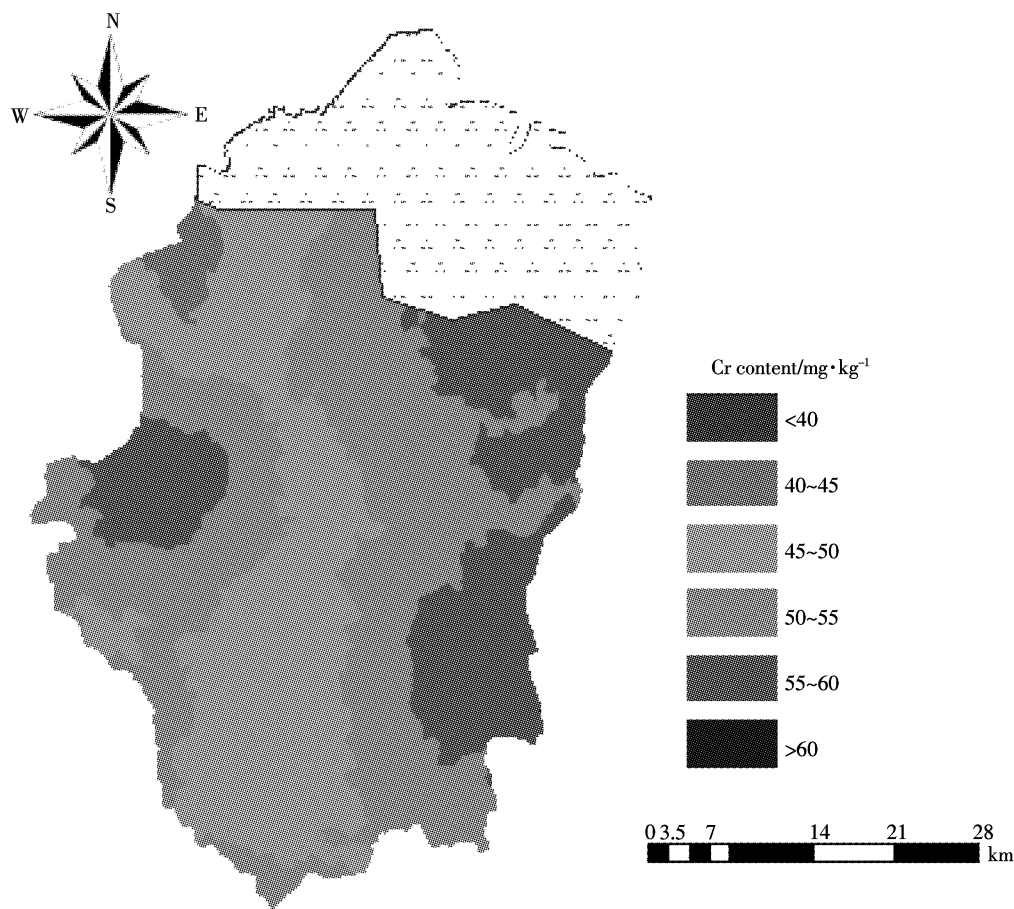


图 2 山东寿光不同农业利用方式下土壤铬的空间分布

Figure 2 The spatial distribution of chromium content in soils under different utilization type in Shouguang City, Shandong Province

从总体看差异较小,这种结果同时也与相应区域对照土壤铬含量有较好的相关性。如在濒临海洋的东北部区域,农田利用以小麦/玉米/棉花为主,该区域中候镇的对照土壤含量值为 $54.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 由东往西至上口镇时,对照土壤中铬含量值降为 $45.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而至羊口镇时对照土壤中铬含量已降至 $44.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 从羊口镇往南至台头镇时,对照土壤中铬的含量又呈增加趋势,其含量由 $44.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加至 $48.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 再往南至孙家集镇时,又降低至 $30.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,但在稻田镇东部对照土壤的含量则达到 $55.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。如此看来,农田中铬含量的空间变异与所在区域对照土壤具有较一致的趋势,说明人类活动对土壤中铬含量尽管可能也具有一定的影响,但受自然条件即土壤本身含量的影响可能要大得多。

2.3 设施菜地铬的累积

由于设施蔬菜生产已成为寿光农业的支柱产业,是农民增收的主要渠道,而设施菜地中重金属的状况等不仅关系到蔬菜的品质,也是关系到该地区蔬菜生

产能否持续发展的十分关键的因素。因此,本研究在已有研究^[10,13,20]以及寿光市设施菜地中铬含量特征的基础上,在同一乡镇中选择成土母质、施肥和管理方式以及种植作物类型等基本相同,但设施种植年限不同的若干样本,比较了设施种植年限对土壤中铬含量

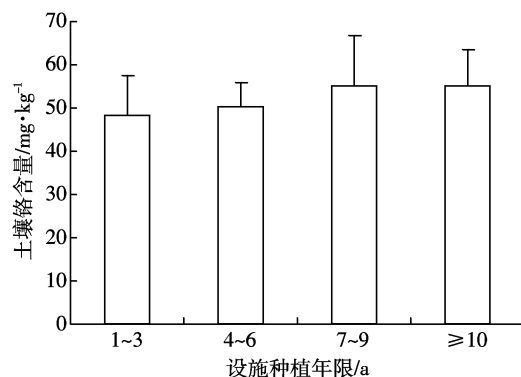


图 3 山东寿光设施菜地铬含量随着种植年限的变化

Figure 3 Change of chromium content in greenhouse soils with the cultivation time

表 2 营里镇和化龙镇农田土壤铬含量状况

Table 2 Chromium content in agricultural soils of Yingli and Hualong Town						
土样编号	样点位置	设施种植年限/a	土地利用类型	地点	铬含量/mg·kg ⁻¹	种植作物
S1	E118°46′18.6″;N37°3′54.8″	1	设施菜地	营里镇东中疃村	39.03	西红柿
S2	E118°46′20.6″;N37°3′58.9″	4	设施菜地	营里镇西中疃村	47.19	西红柿
S3	E118°46′17″;N36°59′10.5″	6	设施菜地	营里镇西洙北村	56.27	西红柿
S4	E118°46′56.6″;N37°5′12.4″	8	设施菜地	营里镇西洙北村	46.08	西红柿
S5	E118°47′9.6″;N37°3′48.8″	10	设施菜地	营里镇东中疃村	60.72	西红柿
S6	E118°36′22″;N36°56′19.3″	3	设施菜地	化龙镇白桥村	44.32	茄子
S7	E118°34′27.7″;N36°58′34.8″	6	设施菜地	化龙镇务本村	46.91	胡萝卜
S8	E118°38′8″;N36°58′34.8″	7	设施菜地	化龙镇辛店村	52.84	茄子
S9	E118°38′34″;N36°56′49.4″	10	设施菜地	化龙镇小王庄	59.06	黄瓜
S10	E118°38′28.9″;N36°56′48.7″	—	露天菜地	化龙镇小王庄	44.30	韭菜
S11	E118°38′5.9″;N36°58′34″	—	露天菜地	化龙镇辛店村	41.85	韭菜
S12	E118°35′40.2″;N36°56′48.7″	—	露天菜地	化龙镇苏社庄	45.91	胡萝卜
S13	E118°46′19.5″;N37°3′57.9″	—	露天菜地	营里镇西中疃村	37.55	白萝卜、大葱
S14	E118°49′44″;N37°3′37.1″	—	大田土壤	营里镇西洙北村	46.67	小麦

的影响,其结果如图 3 和表 2 所示。

从整个设施菜地铬含量随种植年限的变化趋势看,尽管土壤背景条件、作物种植类型、茬口和施肥、耕作管理方式大体上保持一致,但随着设施种植年限的增加,土壤中铬的含量也呈现出较明显的增加趋势。从 4 个不同的种植年限段看,在种植设施蔬菜 1~3、4~6、7~9、≥10 a 后,土壤中铬的平均含量分别为 48.2±9.2、50.4±5.5、55.2±11.6、55.3±8.1 mg·kg⁻¹,其中,≥10 a 的设施菜地铬含量比设施年限为 1~3 a 的土壤铬含量提高了 14.8%,设施菜地中铬含量有随种植年限的延长而升高的趋势。

从表 2 营里镇和化龙镇两个典型乡镇设施菜地铬含量状况的比较可以看出,整体上设施菜地铬含量有随着种植年限延长而升高的趋势,即土壤中出现了

铬的累积。上述设施菜地种植年限与土壤铬含量变化的趋势可用方程来表示(图 4):

$y=2.021\ 1x+37.917(R^2=0.712\ 9;P<0.05)$

式中:y 为土壤铬含量;x 为设施种植年限。

3 讨论

土壤中的铬主要来自两个方面,一是受自然源即土壤本底含量的影响,二是受人类活动如含铬废水、废渣等排放的强烈影响。在本研究中,从寿光农田中铬含量的空间分布格局看,其含量的空间变化与对照土壤基本保持一致,说明该地区土壤中铬的含量主要受自然成土因素的影响。但是,如果从设施菜地中铬含量的情况看,很显然其含量不仅相对露天菜地、普通农田和对照土壤分别高出 8%、5%和 9%,而且不同设施利用年限间的含量亦有一定差异,且有随设施利用年限增加而升高的趋势。

设施蔬菜是寿光农业土壤的重要利用方式,也是当地主要的经济来源之一。设施蔬菜种植以高投入、高产出为主要特征,包括有机肥、化肥的大量投入。伴随着集约化畜禽养殖业饲料添加剂中重金属不适当添加等原因^[6],有机肥、尤其是商品有机肥中也呈现出重金属含量升高、种类增加的趋势,大量施用时很可能导致其在农田中累积^[7],而设施菜地是我国农田中有机肥施用量最高的,因此,土壤中重金属的累积风险也愈来愈大。从本研究中肥料施用的情况看,根据采集土壤样品时现场调查结果,当地设施菜地中有机肥的平均用量为 207 t·hm⁻²·a⁻¹,最高施用量为 494

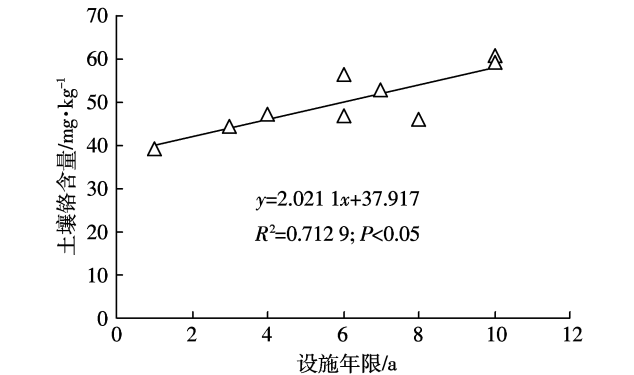


图 4 营里镇和化龙镇设施土壤铬含量随种植年限变化的趋势
Figure 4 Change of chromium content in greenhouse soils in Yingli and Hualong village with cultivation time prolonged

t·hm⁻²·a⁻¹。而对本研究中 62 个设施菜地样本的铬含量与相对应的肥料施用量进行相关性分析,发现设施土壤的铬含量与有机肥的施用量、设施菜地种植年限间呈现显著的对数正相关关系,并且可用方程式来表示:

$$\lg y=0.044 \lg(Ax)+1.573(P<0.05)$$

式中:y 为土壤铬含量 (mg·kg⁻¹);A 为有机肥施用水水平(kg·hm⁻²);x 为设施年限,a。

而设施菜地的铬含量与化肥施用量间却未发现有明显的相关关系。

此外,从不同类型有机肥对土壤铬含量的影响看(表 3),施用猪粪、鸡粪、豆粕 3 种不同类型的有机肥对土壤铬含量的影响是具有一定差异的,3 种类型有机肥对土壤铬含量影响的顺序为猪粪>鸡粪>豆粕,施用豆粕时土壤中铬的累积相对较少,施用猪粪、鸡粪则可能在一定程度上使土壤中铬的累积速度加快。

表 3 不同施肥方式下设施菜地土壤中铬含量(mg·kg⁻¹)
Table 3 Chromium contents in greenhouse vegetable soils under different fertilization(mg·kg⁻¹)

施肥方式		样本个数	平均值	标准差	95% 置信区间	
					下限	上限
猪粪	+	20	53.86	8.962	49.66	58.05
	-	33	52.53	9.771	49.06	55.99
鸡粪	+	43	53.68	8.508	51.07	56.30
	-	10	50.22	12.76	41.09	59.35
豆粕	+	25	53.21	10.03	49.07	57.35
	-	28	52.87	8.998	49.38	56.36

注:“+”:施用;“-”:不施用。

当然,有机肥施用量与土壤重金属累积的关系实际上非常复杂,其原因也不尽一致。在前人的研究中,已有涉及设施菜地中 Cu、Zn、Cd、Pb 等重金属以及 N、P、K 等营养元素累积的报道^[18-20],并认为这种趋势与设施种植年限间存在一定的正相关性。段永惠等^[21]的研究也表明,云南部分地区设施园艺土壤中铬含量呈现明显出的累积趋势,0(露地)、3~5、6~8、>10 a 4 个不同设施种植年限段比较,土壤中铬含量分别为 89.41、98.12、105.66 mg·kg⁻¹ 和 96.08 mg·kg⁻¹,设施土壤的铬含量均明显高于露地,3 个不同设施种植年限下土壤铬含量分别比露地增加了 9.7%、16.6% 和 6.3%,这与本研究所得结果中设施菜地铬含量随着种植年限的延长而升高的趋势是基本一致的。

就整体来说,虽然山东寿光不同农业利用方式下

土壤铬含量均稍高于对照土壤,其中又以设施菜地的含量较高,但从整体看均未超过国家土壤环境质量标准,而且在短期内也不会构成大的环境风险。但从长远来看,对设施菜地中铬含量较高、且有随着种植年限延长而升高趋势,特别是导致上述现象的原因等,必须应引起足够的重视。

4 结论

研究区域不同农业利用方式下铬含量由高至低的顺序为:设施菜地>普通农田>露天菜地>对照土壤。与国家土壤环境质量 II 级标准比较,所有样本均未超标,农田土壤质量状况良好。从铬含量的空间分布特征看,研究区域农业土壤铬含量与当地背景土壤铬含量分布的趋势一致,该地区土壤中铬的含量很大程度上受自然成土因素的影响。

设施菜地作为当地主要的农业土地利用方式,其土壤铬含量呈现明显的累积趋势,与其他土地利用方式比较,设施菜地的土壤铬含量出现了明显累积,且呈现随年限延长而增加的趋势,追溯其原因,设施菜地铬的累积可能与含铬量较高的有机肥的大量施用有关,但其累积机理和过程尚有待于下一步深入研究。

参考文献:

[1] 纪柱. 铬盐生产工艺与致癌物[J]. 化工环保, 1990(3):173-174.
JI Zhu. Production process of chromium salt and the carcinogen[J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 1990(3): 173-174.

[2] Mohan D, Singh K P, Singh V K. Trivalent chromium removal from wastewater using low cost activated carbon derived from agricultural waste material and activated carbon fabric cloth[J]. *Hazard Mater*, 2006, 135: 280-295.

[3] Kimbrough D E, Cohen Y, Winer A M, et al. Critical assessment of chromium in the environment [J]. *Crit Rev Environ Sci Technol*, 1999, 29 (1):1-46.

[4] Mohan D, Singh K P, Singh V K. Removal of hexavalent chromium from aqueous solution using low-cost activated carbons derived from agricultural waste materials and activated carbon fabric cloth[J]. *Ind Eng Chem Res*, 2005, 44: 1027-1042.

[5] Dinesh Mohan, Pittman Jr. C U. Activated carbons and low cost adsorbents for remediation of tri- and hexavalent chromium from water[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, B137: 762-811.

[6] 满稳宁. 我国部分地区土壤的铬背景值及其富集的规律性[J]. 环境污染治理技术与设备, 1987, 8(8):27-31.
MAN Wen-ning. Soil background values of Cr in some regions of China and its enrichment regularity[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 1987, 8(8):27-31.

[7] 郑袁明, 宋波, 陈同斌, 等. 北京市不同土地利用方式下土壤锌的

- 积累及其污染风险[J]. 自然资源学报, 2006, 21(1):62-72.
- ZHENG Yuan-ming, SONG Bo, CHEN Tong-bin, et al. Zinc accumulation and pollution risk in soils under different land use types in Beijing [J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(1):62-72.
- [8] 徐京萍, 张 柏, 王宗明, 等. 九台市不同利用方式下土壤铬含量及其空间分布特征[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3):36-39.
- XU Jing-ping, ZHANG Bai, WANG Zong-ming, et al. Chromium accumulation in soils for different land uses and spatial distribution of chromium in Jiutai City of Jilin Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(3):36-39.
- [9] 宋 波, 高 定, 陈同斌, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜铬含量及其健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2006, 26(10):1707-1715.
- SONG Bo, GAO Ding, CHEN Tong-bin, et al. A survey of chromium concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(10):1707-1715
- [10] 李莲芳, 曾希柏, 白玲玉. 不同农业利用方式下土壤铜和锌的累积[J]. 生态学报, 2008, 28(9):4372-4380.
- LI Lian-fang, ZENG Xi-bai, BAI Ling-yu. Accumulation of copper and zinc in soils under different agricultural and natural field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(9):4372-4380.
- [11] 廖自基. 微量元素的环境化学及生物效应[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.
- LIAO Zi-ji. The environmental chemistry of trace elements and the biological effects[M]. Beijing: China Environmental Sciences Press, 1992.
- [12] 郑袁明, 陈同斌, 郑国砥, 等. 北京市不同土地利用方式下土壤铬和镍的积累[J]. 资源科学, 2005, 27(6):162-166.
- ZHENG Yuan-ming, CHEN Tong-bin, ZHENG Guo-di, et al. Chromium and nickel accumulations in soils under different land uses in Beijing municipality[J]. *Resources Science*, 2005, 27(6):162-166.
- [13] 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.
- [14] 曾希柏, 白玲玉, 苏世鸣, 等. 山东寿光不同种植年限设施土壤的酸化与盐渍化[J]. 生态学报, 2010, 30(7):1853-1859.
- ZENG Xi-bai, BAI Ling-yu, SU Shi-ming, et al. Acidification and salinization in greenhouse soil of different cultivating years from Shouguang City, Shandong[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(7):1853-1859.
- [15] 中华人民共和国民政部, 中华人民共和国建设部. 中国县情大全(东北卷)[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 1993.
- Ministry of Civil Affairs P. R. China, Ministry of Construction P. R. China. Encyclopaedia of Chinese Counties Vol. East China[M]. Beijing: China Social Press, 1993.
- [16] 冯春霞. 合理调制饲料降低畜禽粪便中氮、磷、铜排出量[J]. 饲料技术, 2006, 3:14-15.
- FENG Chun-xia. Reducing nitrogen, phosphorus, copper excretion in livestock and poultry manure by reasonable modulation of feed[J]. *Feed Technology*, 2006, 3:14-15.
- [17] 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 Shu-qing, ZHANG Fu-dao, LIU Xiu-mei, et al. Determination and analysis on main harmful composition in excrement of scale livestock and poultry feedlots[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2005, 11(6):822-829.
- [18] 李见云, 侯彦林, 化全县, 等. 大棚设施土壤养分和重金属状况研究[J]. 土壤, 2005, 37(6):626-629.
- LI Jian-yun, HOU Yan-lin, HUA Quan-xian, et al. Variation of soil nutrient and heavy metal concentrations in greenhouse soils [J]. *Soils*, 2005, 37(6):626-629.
- [19] 寇长林, 巨晓棠, 高 强, 等. 两种农作体系施肥对土壤质量的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(11):2548-2556.
- KOU Chang-lin, JU Xiao-tang, GAO Qiang, et al. Effects of fertilization on soil quality in two different cropping systems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11):2548-2556.
- [20] 曾希柏, 李莲芳, 白玲玉, 等. 山东寿光农业利用方式对土壤砷累积的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(2):310-316.
- ZENG Xi-bai, LI Lian-fang, BAI Ling-yu, et al. Arsenic accumulation in different agricultural soils in Shouguang of Shandong Province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(2):310-316
- [21] 段永慧, 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.