

李杰, 祝凌, 仝利红, 等. 蔬菜温室长期种植下土壤重金属累积风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(10): 2159–2165.

LI Jie, ZHU Ling, TONG Li-hong, et al. Risk assessment of heavy metals accumulation in soils under long-term greenhouse vegetable cultivation conditions [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10): 2159–2165.

蔬菜温室长期种植下土壤重金属累积风险评价

李杰, 祝凌, 仝利红, 吕贻忠*, 李季

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 利用中国农业大学曲周实验站有机种植长期定位试验, 比较了有机种植(ORG)、无公害种植(LOW)和常规种植(CON)3种不同种植模式下土壤中Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、As、Ni 7种重金属含量的差异, 并采用单因子指数法、内梅罗综合累积指数法和潜在生态风险指数法分别对土壤中重金属的累积风险和生态风险进行了评价。结果表明: 经过15 a的种植, 与2002年的初始值相比, 3种植模式下土壤重金属均有明显的累积。其中土壤中Cd累积较为明显, 分别提高了312.50%、175.00%、100.00%, 有机和无公害种植模式下土壤Cd含量超过了温室蔬菜产地环境质量评价标准, 其他重金属含量虽也有一定程度累积, 但均未超标。以初始值为参考, 评价结果表明, 3种植模式下土壤重金属累积指数表现为ORG>LOW>CON, 有机种植存在较高的土壤重金属累积风险。以温室蔬菜产地标准值为参比值, 可以看出经过15 a的长期定位试验, 各个重金属元素均未造成生态系统的风险, 3种植模式的综合生态风险也都属轻微生态危害程度, 但相比较而言, 3种植模式生态风险指数表现为ORG>LOW>CON, 因此应加强有机农场有机肥质量监控, 以确保有机农业的健康发展。

关键词: 土壤重金属; 累积风险; 污染评价; 有机种植; 长期定位试验

中图分类号: X825 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)10-2159-07 doi:10.11654/jaes.2018-0162

Risk assessment of heavy metals accumulation in soils under long-term greenhouse vegetable cultivation conditions

LI Jie, ZHU Ling, TONG Li-hong, LÜ Yi-zhong*, LI Ji

(College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The effect of different planting modes on soil heavy metals contents was investigated in this study. The differences in the contents of Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, As and Ni in soil under long-term greenhouse organic planting (ORG), low-input planting (LOW) and conventional planting (CON) conditions were compared. The accumulation and ecological risks of heavy metals in soil were evaluated using the single factor index method, Nemerow comprehensive accumulation index method and potential ecological risk index method. The results showed that the heavy metals accumulation in the soil was significant after 15 years of the planting exercise utilizing the three planting modes. The accumulation of Cd in soil was the most significant among the investigated heavy metals, increasing by 312.50%, 175.00% and 100.00% for ORG, LOW and CON, respectively. Only the Cd content under ORG and LOW was found to exceed the environmental quality assessment standard of greenhouse vegetable production, whereas none of the other heavy metals exceeded their standards, albeit with accumulation of each to some extent. Taking into account the initial value as reference, the evaluation results showed that there was a high risk of heavy metal accumulation in soil under ORG, and the accumulation index of heavy metals was ordered as ORG>LOW>CON. Considering the standard values for greenhouse vegetables, the heavy metal contents in soil did not cause any ecosystem risks after 15 years of long-term planting. In addition, the comprehensive ecological risks of the three planting modes were generally minor, with the ecological risk index ordered as ORG>LOW>CON. Therefore, quality control of organic fertilizer should be strengthened to ensure the healthy development of organic agriculture.

Keywords: soil heavy metals; cumulative risk; pollution evaluation; organic planting; long-term location experiment

收稿日期: 2018-01-29 录用日期: 2018-04-27

作者简介: 李杰(1994—), 男, 江苏常州人, 硕士研究生, 主要从事有机种植研究。E-mail: 822786259@qq.com

*通信作者: 吕贻忠 E-mail: lyz@cau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571317)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41571317)

目前重金属对土壤环境的污染已经引起国际社会的广泛关注,根据《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国农田土壤点位超标率为19.4%,以Cd、Ni和Cu等重金属污染最为突出。造成土壤重金属污染有很多来源,其中施肥是农田重金属污染的主要原因之一。Zhou等^[1]研究了22年施肥和耕作对红壤中重金属积累的影响,结果表明:施用有机肥会显著增加土壤中Cu、Zn、Cd的积累,其中Cd甚至超过了国家土壤标准的3倍;王美等^[2]对肥料中重金属的含量状况以及施肥对土壤重金属累积影响的研究进展进行了系统分析和总结,研究表明,有机肥中的重金属含量高于化肥,施用有机肥比不施肥提高了土壤Cu、Zn、Pb、Cd的含量。由此可见,施用有机肥对土壤重金属的污染值得深入研究。设施农业一般施用有机肥量都比较大,因此其造成的土壤重金属污染问题尤为显著。Zhang等^[3]对北京通州的设施蔬菜土壤中Cu、Cd的蓄积状况进行了调查,结果表明,设施蔬菜土壤中Cu、Cd浓度明显增加,部分土壤样品超过了我国设施蔬菜生产农田环境质量评价标准;茹淑华等^[4]分析了设施蔬菜土壤中重金属含量的差异,结果表明,设施蔬菜土壤中Cd、As、Cu和Zn平均含量均显著高于露地蔬菜,且随着种植年限增加,蔬菜土壤中Cd、Pb和Hg含量均呈明显上升趋势。

不同种植模式下土地管理措施有明显差异,这些差异会对土壤质量产生深刻的影响。传统观念认为有机肥比化肥安全,从而忽视了畜禽有机肥施用带来的环境风险^[5]。由于畜禽养殖业大量使用含重金属的饲料添加剂,因此畜禽粪便等原材料也存在重金属污染风险,Holzel等^[6]、Qian等^[7]检测了猪粪、牛粪等畜禽有机肥,皆发现了一定量重金属的存在。Luo等^[8]研究表明畜禽粪便对农业土壤中总Cd、Cu和Zn的投入分别占到了55%、69%和51%,因此有必要对有机种植的环境风险问题进行研究^[9]。有机农业在我国兴起的时间比较晚,长期定位试验比较少,重金属累积又是一个长期的过程,因此本研究在河北曲周中国农业大学实验站进行有机种植长期定位试验,同时设定无

公害和常规种植作为对照,更加有利于揭示有机种植土壤中重金属累积状况。同时采用不同方法对有机种植的土壤重金属污染风险进行评价,以期对有机农业土壤中重金属污染风险的控制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验为有机蔬菜温室长期定位试验,于2002年3月在中国农业大学曲周实验站(36°52'N,115°01'E)进行,实验站位于河北省邯郸市曲周县北部,属温带半湿润季风气候区,光、热、水等气候资源比较丰富,但受季风的强烈影响,冬春寒冷干燥,夏季温暖多雨,属一年两熟种植区。年均降水量604 mm。原始土壤为盐化潮褐土,试验前为多年菜田。温室分为3种不同种植模式:有机种植(ORG)、无公害种植(LOW)和常规种植(CON),3种蔬菜种植模式分别在3个温室进行。每个温室东西长52 m,南北宽7 m,钢架结构,占地面积约0.04 hm²。每个温室内人工平分为3个小区,各温室3个小区之间处理均相同,进行重复试验。试验前土壤重金属含量及pH值见表1。

1.2 试验设计

长期定位试验已连续进行了15 a,主要种植作物为春季番茄(3—7月)和秋冬季黄瓜(9月—次年1月)。试验设3个处理:

(1)有机种植(ORG):只施用有机肥(EM堆肥和干鸡粪),不施用化肥,有机肥施用量达到25 t·hm⁻²·a⁻¹;病虫害防治以人工防治和物理防治为主。

(2)无公害种植(LOW):以有机肥(EM堆肥和干鸡粪)为主,施用量为15 t·hm⁻²·a⁻¹,少量施用化肥,化肥施用量为400 kg·hm⁻²;病虫害防治以生物防治为主,病虫害严重时使用低毒低残留的化学农药进行防治。

(3)常规种植(CON):采用常规管理方式,有机肥施用量为9 t·hm⁻²·a⁻¹,化肥施用量为2 t·hm⁻²·a⁻¹;病虫害防治以化学防治为主。

不同种植方式下的养分投入、农药施用及灌溉情

表1 试验前土壤重金属含量及pH值(2002)

Table 1 Heavy metals content in soil before test and pH(2002)

种植模式	Cu/mg·kg ⁻¹	Zn/mg·kg ⁻¹	Pb/mg·kg ⁻¹	Cd/mg·kg ⁻¹	Cr/mg·kg ⁻¹	As/mg·kg ⁻¹	Ni/mg·kg ⁻¹	pH
ORG	15.75	44.96	9.41	0.08	28.73	7.68	18.99	7.33
LOW	17.05	51.20	14.27	0.12	29.99	7.01	21.34	7.00
CON	27.05	62.66	10.84	0.11	31.74	8.11	20.21	7.31

况见表2。

1.3 样品采集

每个种植模式地块各设3个小区,每个小区内采取S形布点取样,每5个点为一个混合样,采样时先清除地表杂物,均匀采集0~20 cm的土壤,多点混合后的样品按四分法取舍,保留1 kg左右,用塑封袋装好带回室内。土壤样品经自然风干,去除石砾和作物根系残渣,按要求磨细过0.15 mm尼龙筛后,用于测定土壤重金属指标。

1.4 测定方法

重金属Cd、Cr、As、Ni、Cu、Zn、Pb的测定方法参照国家环境保护标准(HJ 832—2017),采用微波辅助消解 ICP-MS测定,土壤样品在高压消解罐中用硝酸-盐酸-氢氟酸进行前处理,测定过程中采用国家标准土样GBW07427进行质量监控。

1.5 数据处理

原始数据先经过Microsoft Excel程序进行整理,运用SPSS单因素方差分析对不同种植模式下土壤环境质量指标进行显著性检验,Least significance difference(LSD)法进行均值比较。

本研究以2002年土壤重金属含量初始值作为基础,采用单因子指数法、内梅罗综合累积指数法对土壤中重金属累积风险及等级进行评价,从而评价不同种植模式对土壤重金属累积的影响。利用重金属数据,根据公式(1)和公式(2)计算单因子累积指数(P_i)和内梅罗综合累积指数(P)。

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

$$P = \left\{ \left[(C_i / S_i)_{\max}^2 + (C_i / S_i)_{\text{ave}}^2 \right] / 2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: P_i 为土壤中各重金属的累积指数; C_i 为土壤中各重金属的实测含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; S_i 为2002年土壤中各重金属含量的初始值, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; $(C_i / S_i)_{\max}$ 为土壤重金属元素中累积指数最大值; $(C_i / S_i)_{\text{ave}}$ 为土壤各累积指数的平均值。

另外,本研究还以温室蔬菜产地标准为参比值,

采用潜在生态风险指数法对不同种植模式下土壤重金属的生态风险进行评价。根据公式(3)和公式(4)计算各重金属的单项潜在生态风险参数(E_i)和多种重金属的潜在生态风险指数(RI)。

$$E_i = T_i \times C_i / C_0 \quad (3)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i \quad (4)$$

式中: C_i 和 C_0 分别为第*i*种重金属的监测浓度和《HJ 333—2006 温室蔬菜产地环境质量评价标准》中的规定值; T_i 为单种重金属的毒性数据,在本研究中土壤重金属的毒性系数采用徐争启等^[10]的方法进行计算,得到Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、As和Ni的毒性系数分别为5、1、5、30、2、10和5。

2 结果与分析

2.1 有机种植土壤中重金属含量

各试验地不同种植模式下土壤中7种常见重金属的测定结果如表3所示。从表1可以看出,试验开始前,土壤中重金属含量初始值均符合温室蔬菜产地环境质量评价标准,土壤环境质量良好。经过15 a的种植,与初始值相比,3种植模式下土壤重金属均有明显的累积,其中ORG和LOW种植下Cd超过了温室蔬菜产地标准,有一定的环境风险,需引起重视。但其余重金属含量都没有超过温室蔬菜产地标准,基本符合农业用地标准。

从土壤各重金属指标的含量来看,3种植模式下土壤中Zn、Cd和Cr含量有显著差异,基本表现为ORG>LOW>CON。与初始值相比,ORG、LOW及CON种植下土壤中Zn含量分别提高199.80%、96.64%、54.72%,土壤中Cd含量分别提高312.50%、175.00%、100.00%,土壤中Cr含量分别增加253.74%、178.46%、147.70%。虽然3种植模式下土壤中Cu和As差异不明显,但它们在土壤中的富集效应都很明显,与初始值相比,Cu分别增加113.71%、64.87%、23.73%,As分别增加126.56%、163.20%、100.99%。

表2 不同种植方式下养分投入、农药施用及灌溉情况

Table 2 Nutrient input, pesticide application and irrigation under different planting patterns

种植模式	化肥/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$			有机肥/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$			总计/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$			喷药次数/ $\text{次} \cdot \text{a}^{-1}$	喷药量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	灌溉次数/ $\text{次} \cdot \text{a}^{-1}$	灌溉量/ $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O				
ORG	—	—	—	1 032.2	490.8	1 596.7	1 032.2	490.8	1 596.7	0	0	8	390
LOW	293.8	75	285	516.1	245.4	798.4	809.9	320.4	1 083.4	10	9.15	8	390
CON	587.5	150	570	236	117	423.2	823.5	267	993.2	20	29.1	8	390

2.2 有机种植土壤中重金属污染评价

2.2.1 重金属累积评价

单因子指数法是目前国内通用的一种重金属污染评价方法^[11],单因子累积指数 $P_i \leq 1$,污染等级为清洁; $P_i > 1$ 为污染水平,且 P_i 越大,累积越严重。为全面反映各重金属元素对土壤的不同作用,突出高浓度重金属元素对环境质量的影响,同时采用了内梅罗综合累积指数法^[12]。内梅罗综合累积指数 $P \leq 0.7$ 污染等级为安全, $0.7 < P \leq 1$ 污染等级为警戒水平, $1 < P \leq 2$ 污染等级属于轻度累积, $2 < P \leq 3$ 时达到中度累积, P 越大累积越严重。

从表4可以看出,3种植植模式下土壤中7种重金属的 P_i 值各不相同,其中有机种植下Cd和Cr属重度累积,有机种植下Cu、Zn、Pb、无公害种植下Cd、无公害和常规种植下Cr以及3种植植模式下As属中度累积,其他皆为轻度累积。相比较而言,Ni在土壤中累积风险相对较小,在3种植植模式下都为轻度累积。总体来看,综合累积指数表现为ORG>LOW>CON,其中ORG综合累积指数大于3,属重度累积,而LOW和CON综合累积指数在2~3之间,属中度累积。

2.2.2 重金属生态风险评价

潜在生态风险指数法是由瑞典科学家Hakanson提出并用于评价土壤中重金属的方法,不仅反映了某一特定环境中各种污染物的影响,也反映了多种污染物的综合影响,并以定量的方法划分出潜在危害程度,是一种综合反应土壤中重金属对生态环境影响潜

力的方法^[13]。单项潜在生态风险系数 $E_i < 40$ 属于轻微生态危害, $40 \leq E_i < 80$ 属于中等生态危害,多种重金属潜在生态风险指数 $RI < 150$ 处于轻微生态危害, E_i 和 RI 值越大,生态危害程度越大。

根据表5,土壤中潜在生态风险最大的元素为Cd,表现出轻微生态危害程度,其次是As、Ni、Pb、Cu、Cr,危害程度最小的是Zn。3种植植模式下的各个重金属元素 E_i 值都小于40,均未造成生态系统的风险。潜在生态危害指数 RI 可以表征重金属元素对当地生态系统的影响,反映总的污染造成的生态风险。如表5所示,3种植植模式的 RI 值均小于150,属于轻微生态危害程度。相比较而言,3种模式下7种重金属的综合生态风险指数表现为ORG>LOW>CON,有机种植模式下土壤中潜在的生态风险指数最高。

3 讨论

土壤重金属含量的变化受成土母质和人为资源输入的影响极大,而且土壤重金属是目前很受关注的土壤污染之一^[14],土壤中重金属含量对土壤环境质量有很大影响。目前重金属已经成为我国农业生产中不可忽视的重要污染物,重金属含量的增加不但会造成土壤污染,影响农产品产量与品质,而且可通过食物链危害动物和人类的生命健康^[15]。本研究对重金属的污染评价分为累积评价和生态风险评价两部分,累积评价是为了评估不同种植模式土壤中重金属的累积程度,国内已有很多研究报道了长期施肥下会出

表3 不同种植模式下土壤重金属含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
Table 3 Heavy metals content in soil under different planting patterns ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

项目	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	As	Ni
ORG	33.66±0.21a	134.79±2.60a	21.45±1.06a	0.33±0.01a	101.63±3.49a	17.40±0.49a	26.87±0.30a
LOW	28.11±0.99a	100.68±4.27b	21.51±0.84a	0.33±0.04a	83.51±0.82b	18.45±0.82a	27.51±0.67a
CON	33.47±3.23a	96.95±6.82b	18.89±1.48a	0.22±0.02b	78.62±2.50b	16.30±1.08a	26.87±0.76a
温室蔬菜产地标准	100	250	50	0.30	200	25	50

注:同列不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著($n=3$)。

Note: Different lowercase letters indicate a significant difference at $P < 0.05$ ($n=3$).

表4 不同种植模式下土壤重金属的单因子指数和综合累积指数

Table 4 Single factor index and comprehensive cumulative index of heavy metals in soil under different planting patterns

种植模式	单因子累积指数 P_i							内梅罗综合累积指数 P
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	As	Ni	
ORG	2.14 ^②	3.00 ^②	2.28 ^②	4.13 ^③	3.54 ^③	2.27 ^②	1.41 ^①	3.48 ^③
LOW	1.65 ^①	1.97 ^①	1.51 ^①	2.75 ^②	2.78 ^②	2.63 ^②	1.29 ^①	2.46 ^②
CON	1.24 ^①	1.55 ^①	1.74 ^①	2.00 ^①	2.48 ^②	2.01 ^②	1.33 ^①	2.15 ^②

注:①轻度累积;②中度累积;③重度累积。

Note: ①Slight accumulation, ②Moderate accumulation, ③Heavy accumulation.

表5 不同种植模式下土壤重金属潜在生态风险系数和潜在生态风险指数

Table 5 Potential ecological risk factors and potential ecological risk indices of heavy metals in soil under different planting patterns

种植模式	潜在生态风险系数 E_i							潜在生态风险指数 RI
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	As	Ni	
ORG	1.68	0.54	2.15	33.00	1.02	6.96	2.69	48.03
LOW	1.41	0.40	2.15	33.00	0.84	7.38	2.75	47.93
CON	1.67	0.39	1.89	22.00	0.79	6.52	2.69	35.94

现土壤重金属元素的累积富集现象,而有机种植长期大量施用有机肥是否也会存在类似的问题,值得我们关注和研究;生态风险评价是为了评估试验地重金属的污染风险,土壤重金属会迁移到其他生态系统,通过污染食物、大气和水环境间接影响环境质量,对人类的生存和发展有着严重的威胁^[13],因此对土壤重金属污染风险进行评价具有重大意义。

长期定位试验地进行了长达15 a的蔬菜温室种植,且施肥量较大,因此3种植植模式下土壤重金属都有不同程度的累积,富集效应比较明显。然而Ni在3种植植模式下累积风险均较小,可能是由于所施有机肥和化肥中Ni的含量较低,尽管长期施用但没有向土壤中输入过多的Ni,因此调查地区土壤Ni含量均较低。研究表明,有机种植下Zn、Cd和Cr累积较为严重,这主要是因为目前集约化畜禽养殖业广泛使用的饲料添加剂中含有大量的Zn、Cd、Cr等重金属^[16-18],而这些重金属不能被动物完全吸收,大部分随粪便排出体外^[19],因此与普通化肥相比^[20-21],畜禽粪便可有机肥中这些元素的含量更高。其次,根据评价结果,虽然3种植植模式生态风险均属轻微生态危害程度,但相比较而言仍是有机种植下土壤重金属污染最为严重,Kumar等^[22]、王开峰等^[23]、唐政等^[24]的研究也都发现有机种植土壤中重金属污染风险较大,支持了本文的评价结果。农业生产中,重金属主要来源于农用物资,而本研究区是有机种植长期定位试验站,试验区不受工业废物及污水灌溉影响,试验地又是温室大棚管理模式,所以也不存在由降尘带来的重金属污染,因此有机种植重金属累积主要源于长期大量施用有机肥中的重金属元素。由于在非自然养殖条件下,规模化养殖的饲料添加剂和农药中通常含有多种重金属^[25],因此利用养殖场的畜禽粪制作的有机肥也必然含有重金属。在有机种植过程中,如果不能控制有机肥来源,施用的商品有机肥质量参差不齐,难免会给土壤带来一定重金属污染的风险。根据15 a长期定位试验的土壤重金属元素累积情况,估算土壤中重金属平均年增加量,同时参照潜在生态风险指

数法划定的等级值估算出土壤对重金属的最高承载年限,为今后有机种植合理管控风险提供参考^[26]。7种重金属元素中Cd累积最快,若仍然按照这种速率累积,则5 a后Cd的生态风险将达到轻微生态危害水平,因此今后在有机种植的各个环节中应尽量规避这种风险,加强对有机肥源的监控,合理施肥,防止重金属在土壤中的富集和污染,以促进有机种植的持续健康发展。

本研究在长期定位试验的基础上对蔬菜温室不同种植模式下土壤重金属污染状况进行了研究,经过15 a的长期定位种植数据可靠,且目前国内有机种植长期定位试验站少,因此对于有机种植健康合理发展具有很好的借鉴意义。同时,本文综合运用不同评价方法对不同种植模式下土壤重金属污染进行综合评价,单因子指数法和内梅罗综合指数法是国内通用的重金属污染评价方法,以2002年初始值为评价标准,反映了不同种植模式下土壤重金属的累积程度,潜在生态风险指数法是土壤重金属潜在生态风险评价的一种常用方法,以温室蔬菜产地标准作为参比值,对不同种植模式的生态风险进行了评价,全面地反映了土壤污染状况,评价结果可靠,对了解长期有机种植模式下土壤重金属累积特点与污染风险有一定的参考意义。近年来,有机农业的面积和种植者数目不断增加,全球有机食品市场正在以年均20%~30%的速度增长^[27],因此为保证有机农业健康可持续发展,必须对大量施用有机肥带来的土壤重金属污染保持高度重视,也需要对更多的有机农场进行调查和检测分析,并加强有机农场有机肥质量监控。

4 结论

(1)从土壤各重金属指标的含量来看,3种植植模式土壤中Zn、Cd和Cr含量有显著差异,基本表现为ORG>LOW>CON,其中Cd累积最为严重,在有机和无公害种植模式下超过了温室蔬菜产地环境质量评价标准,甚至在有机种植下还达到了重度累积,需引起重视。

(2)与2002年土壤初始值相比,3种种植模式下土壤重金属累积风险表现为ORG>LOW>CON,其中有机种植属重度累积,而无公害和常规种植属中度累积,因此有机种植会对土壤产生一定的重金属累积风险。

(3)以温室蔬菜产地标准为参比值,经过15 a的长期定位试验,3种种植模式下的各个重金属元素均未造成生态系统的风险,试验地没有产生较大的环境风险,3种种植模式的综合生态风险指数表现为ORG>LOW>CON,因此应加强有机农场有机肥质量监控,以确保有机农业的健康发展。

参考文献:

- [1] Zhou S W, Liu J, Xu M G, et al. Accumulation, availability, and uptake of heavy metals in a red soil after 22-year fertilization and cropping[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(19): 15154-15163.
- [2] 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.
- [3] Zhang H Z, Li H, Wang Z, et al. Heavy metals in greenhouse vegetable soils in Beijing: Accumulation characteristics of copper and cadmium [C]//International Conference on Biomedical Engineering and Biotechnology. IEEE, 2012: 1499-1502.
- [4] 茹淑华, 耿暖, 张国印, 等. 河北省典型蔬菜产区土壤和蔬菜中重金属累积特征研究[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(8): 1407-1411.
RU Shu-hua, GENG Nuan, ZHANG Guo-yin, et al. Heavy metals accumulation in soil and vegetable collected from typical vegetable production areas in Hebei Province[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(8): 1407-1411.
- [5] 潘霞, 陈励科, 卜元卿, 等. 畜禽有机肥对典型蔬果地土壤剖面重金属与抗生素分布的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2012, 28(5): 518-525.
PAN Xia, CHEN Li-ke, BU Yuan-qing, et al. Effects of livestock manure on distribution of heavy metals and antibiotics in soil profiles of typical vegetable fields and orchards[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, 28(5): 518-525.
- [6] Holzel C S, Muller C, Harms K S, et al. Heavy metals in liquid pig manure in light of bacterial antimicrobial resistance[J]. *Environment Research*, 2012, 113: 21-27.
- [7] Qian P, Schoenau J J, Wu T, et al. Copper and zinc amounts and distribution in soil as influenced by application of animal manure in east-central Saskatchewan[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2003, 83(2): 197-202.
- [8] Luo L, Ma Y B, Zhang S Z, et al. An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(8): 2524-2530.
- [9] Nicholson F A, Chambers B J, Williams J R, et al. Heavy metal contents of livestock feeds and animal manures in England and Wales[J]. *Bioresource Technology*, 1999, 70(1): 23-31.
- [10] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 2008, 31(2): 112-115.
XU Zheng-qi, NI Shi-jun, TUO Xian-guo, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 31(2): 112-115.
- [11] 姜璐, 吕贻忠, 申思雨. 华北地区有机种植和常规种植模式下土壤重金属含量及污染评价[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(7): 877-885.
JIANG Rong, LÜ Yi-zhong, SHEN Si-yu. Assessment of heavy metal content and pollution in organic and conventional farming soils in North China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(7): 877-885.
- [12] 高军侠, 党宏斌, 郑敏, 等. 郑州市郊农田土壤重金属污染评价[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(21): 116-120.
GAO Jun-xia, DANG Hong-bin, ZHENG Min, et al. Heavy metal pollution assessment of farmland soil in suburb in Zhengzhou City[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(21): 116-120.
- [13] 何东明, 王晓飞, 陈丽君, 等. 基于地累积指数法和潜在生态风险指数法评价广西某蔗田土壤重金属污染[J]. *农业资源与环境学报*, 2014, 31(2): 126-131.
HE Dong-ming, WANG Xiao-fei, CHEN Li-jun, et al. Assessment on heavy metals contaminations of sugarcane soil in Guangxi Province by the geo-accumulation index and potential ecological risk index[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31(2): 126-131.
- [14] Hanesch M, Scholger R. Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements[J]. *Environmental Geology*, 2002, 42(8): 857-870.
- [15] 顾继光, 周启星, 王新. 土壤重金属污染的治理途径及其研究进展[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2003, 11(2): 143-151.
GU Ji-guang, ZHOU Qi-xing, WANG Xin. Reused path of heavy metal pollution in soils and its research advance[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2003, 11(2): 143-151.
- [16] Cong L, Wang Y J, Zhou D M, et al. Heavy metals pollution in poultry and livestock feeds and manures under intensive farming in Jiangsu Province, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2004, 16(3): 371-374.
- [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]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2005, 11(6): 822-829.
- [18] 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.
- [19] Li Y X, Chen T B. Concentrations of additive arsenic in Beijing pig feeds and the residues in pig manure[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2005, 45(4):356-367.
- [20] 王起超, 麻壮伟. 某些市售化肥的重金属含量水平及环境风险[J]. 农村生态环境, 2004, 20(2):62-64.
WANG Qi-chao, MA Zhuang-wei. Heavy metals in chemical fertilizer and environmental risks[J]. *Rural Eco-Environment*, 2004, 20(2):62-64.
- [21] Senesi N, Polemio M. Trace element addition to soil by application of NPK fertilizers[J]. *Fertilizer Research*, 1981, 2(1):289-302.
- [22] Kumar R R, Park B J, Cho J Y. Application and environmental risks of livestock manure[J]. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*, 2013, 56(5):497-503.
- [23] 王开峰, 彭娜, 王凯荣, 等. 长期施用有机肥对稻田土壤重金属含量及其有效性的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1):105-108.
WANG Kai-feng, PENG Na, WANG Kai-rong, et al. Effects of long-term manure fertilization on heavy metal content and its availability in paddy soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(1):105-108.
- [24] 唐政, 邱建军, 陈小香, 等. 有机种植中施肥引发的重金属累积风险研究[J]. 广东农业科学, 2012(16):95-97.
TANG Zheng, QIU Jian-jun, CHEN Xiao-xiang, et al. Effects of different organic fertilizer management on the heavy metal cumulate of organic planting[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2012(16):95-97.
- [25] 郭洁, 张海荣. 饲料添加剂中重金属的污染及其防治措施[J]. 畜牧兽医杂志, 2010, 29(6):98-103.
GUO Jie, ZHANG Hai-rong. Pollution of heavy metals in feed additives and its control measures[J]. *Journal of Animal Science and Veterinary Medicine*, 2010, 29(6):98-103.
- [26] 王美, 李书田, 马义兵, 等. 长期不同施肥措施对土壤和作物重金属累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(1):63-74.
WANG Mei, LI Shu-tian, MA Yi-bing, et al. Effect of long-term fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(1):63-74.
- [27] 丁长琴. 我国有机农业发展模式及理论探讨[J]. 农业技术经济, 2012(2):122-128.
DING Chang-qin. Study on the development model and theory of organic agriculture in China[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2012(2):122-128.