

沃惜慧, 杨丽娟, 曹庭悦, 等. 长期定位施肥下设施土壤重金属积累及生态风险的研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(10): 2319–2327.

WO Xi-hui, YANG Li-juan, CAO Ting-yue, et al. Accumulation and ecological risk of heavy metals in greenhouse soil under long-term fertilization[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(10): 2319–2327.

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*

(沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866)

摘 要: 为了了解在长期不同施肥处理下改良设施土壤的同时, 设施土壤中重金属的含量与污染状况, 本文以长期定位施肥的设施土壤(建于2009年)为供试土样, 研究了不同施肥处理对设施土壤中重金属(Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn)积累的影响, 并对其进行重金属污染及潜在生态风险评价。结果表明, 不同施肥处理下, 土壤中除Cd以外的其他5种重金属在土壤中的含量均未达到污染水平。Cd、Cr、Zn在鸡粪、秸秆、K₂SO₄、生石灰与复合肥共同施入时积累速率最大, Cu、Ni、Pb在鸡粪、秸秆与复合肥同时施入时积累速率最大。目前, Cd仅在CK处理下无污染, 其他处理均产生污染, 其中在鸡粪、秸秆、K₂SO₄、生石灰与复合肥5者共同施入时污染最严重, 且20年后污染将加剧。同时该处理下的土壤Zn将于近20年后超标, 造成污染。该处理下土壤的综合污染状况也最为严重。而不同施肥处理均可增加土壤重金属生态风险, 其中5者同时施入时生态风险最强。研究表明, 鸡粪、秸秆、K₂SO₄、生石灰与复合肥不同组合的长期施入可导致设施土壤重金属不同程度的积累, 产生污染, 增加其生态风险。

关键词: 长期定位施肥; 设施土壤; 重金属; 污染评价; 生态风险评价

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)10-2319-09 doi:10.11654/jaes.2019-0293

Accumulation and ecological risk of heavy metals in greenhouse soil under long-term fertilization

WO Xi-hui, YANG Li-juan, CAO Ting-yue, LI Jun*

(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: In order to understand the content and pollution status of heavy metals in greenhouse soil while improving it under different long-term fertilization treatments, this study used fertilized greenhouse soil that was established in 2009 to study the effects of different fertilization treatments on the accumulation of heavy metals (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) in the soil. An assessment of heavy metal pollution and potential ecological risk was also conducted. The results showed that of all the heavy metals, Cd was present under all the treatments and caused pollution. The exception was CK. The pollution was most severe when chicken manure, straw, K₂SO₄, lime and compound fertilizer were applied together, causing comprehensive soil pollution and ecological risk. The accumulation rate of Cd, Cr and Zn was highest when five kinds of fertilizers were applied together. The highest accumulation rate of Cu, Ni and Pb was shown when chicken manure, straw and compound fertilizer were applied together. The soil was polluted with Zn after nearly 20 years when five kinds of fertilizers were applied together, and substantial soil pollution and ecological risk of Cd would increase in the next 20 years. The long-term application of different combinations of five kinds of fertilizers can lead to the accumulation of, and pollution by, heavy metals. This will simultaneously increase ecological risk.

Keywords: long-term fertilization; greenhouse soil; heavy metal; pollution assessment; ecological risk assessment

收稿日期: 2019-03-18 录用日期: 2019-05-21

作者简介: 沃惜慧(1993—), 女, 浙江舟山人, 硕士研究生, 从事污染土壤修复与利用的研究。E-mail: woxh2323@163.com

*通信作者: 李 军 E-mail: syau_ljun@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0201004); 辽宁省特聘教授项目; 国家自然科学基金项目(31372132)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2016YFD0201004); Project of Distinguished Professor of Liaoning Province; The National Natural Science Foundation of China (31372132)

设施农业是我国农业发展中的重点。至2002年,我国已是世界第一大设施农业国^[1]。2013年,我国设施蔬菜种植面积和总产量分别占蔬菜种植面积的18%和蔬菜总产量的34%以上^[2]。设施土壤的环境质量会直接影响设施蔬菜作物的品质与产量。而长年作物连作及长期大量肥料投入,导致设施土壤质量下降、土壤结构退化等问题。张玥琪等^[3]研究表明施用鸡粪、稻草和石灰可促进设施土壤中>0.25 mm团聚体的形成,增加土壤全碳含量,提高团聚体的稳定性,有效缓解土壤结构退化与土壤富营养化。而鸡粪、稻草与K₂SO₄的施用可提高土壤微生物功能多样性,降低土壤酚酸类物质含量,减缓连作障碍^[4]。但同时畜禽粪便的施用是农田土壤重金属污染的主要来源之一^[5]。畜禽饲料中通常存在Cu、Zn等重金属添加剂,而重金属不易被畜禽吸收,大部分都随畜禽粪便排出^[6]。我国鸡粪、猪粪、羊粪、牛粪中均存在重金属元素超标^[7]。秸秆还田虽可有效增加土壤中有机质及微量元素的含量^[8-9],但秸秆中富集的重金属会重新释放到土壤中^[10],且其还田初期可活化土壤中重金属^[11-12]。有研究发现长期秸秆还田与施用猪粪会导致土壤Cd、Cu、Zn全量与有效态含量的增加^[13-14]。因此在向设施土壤中施入不同物质改善土壤的同时,可能会产生土壤重金属积累甚至超标的问题。

许多学者都对长期施肥条件下大田土壤的重金

属积累问题开展了研究。有研究表明化肥与有机肥长期配施可增加土壤重金属含量,有污染土壤的风险^[15-28]。有研究发现长期施用化肥对土壤重金属的影响不明显,而长期施用有机肥后土壤中重金属含量增加^[19]。目前对设施土壤这方面的研究还不多,因此本文将针对长期定位施肥的设施土壤,分析在长期不同施肥处理下改良土壤的同时,设施土壤中重金属的含量与污染状况,进行土壤重金属污染评价及潜在生态风险评价。旨在为设施农业的安全生产与可持续发展提供一定的参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本研究的供试土样于2016年11月采自沈阳农业大学温室番茄长期施肥定位试验基地(建于2009年),2009年该土壤理化性质如表1所示。该长期定位施肥试验共设10种处理,如表2所示,每一处理设3次重复。除CK外,其余处理都根据辽宁省保护地生产常规用量施入等量复合肥。秸秆切成约3 cm长度,与生石灰、鸡粪、40%复合肥在番茄定植前一个月作为基肥均匀翻入20 cm耕层以下。剩余的60%复合肥分别于番茄定植后30、60 d等量追施。鸡粪、生石灰、K₂SO₄与复合肥每年分别购自同一厂家,秸秆为沈阳农业大学水稻试验田自然风干的水稻秸秆。各

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil

pH	碱解氮 Available nitrogen/ mg·kg ⁻¹	速效磷 Available phosphorus/mg·kg ⁻¹	速效钾 Available potassium/mg·kg ⁻¹	全氮 Total nitrogen/ g·kg ⁻¹	全磷 Total phosphorus/ g·kg ⁻¹	全钾 Total potassium/ g·kg ⁻¹	有机质 Organic matter/ g·kg ⁻¹
6.96	39.12	11.9	147.48	0.54	0.43	25.85	15.47

表2 试验处理及其肥料施用量

Table 2 Test treatments and fertilizer application rate

处理 Treatments	鸡粪(M) Chicken manure/kg·m ⁻²	秸秆(R) Straw/kg·m ⁻²	生石灰(Ca) Lime/g·m ⁻²	K ₂ SO ₄ (K) Potassium sulfate/g·m ⁻²	复合肥 Compound fertilizer/g·m ⁻²
CK	—	—	—	—	—
R	—	1.44	—	—	45
M	3.75	—	—	—	45
MCa	3.75	—	30	—	45
MR	3.75	1.44	—	—	45
MK	3.75	—	—	30	45
MRCa	3.75	1.44	30	—	45
MRK	3.75	1.44	—	30	45
MKCa	3.75	—	30	30	45
MRKCa	3.75	1.44	30	30	45

物料的养分含量与重金属含量如表3所示。

1.2 分析方法

1.2.1 样品分析

土壤样品pH:用pH计进行测定,水土比为2.5:1。土壤样品重金属(Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn)含量:采用HNO₃-HF微波消解,用ICP-OES对各重金属元素含量进行测定,同时加入国家标准物质(GSS-3)进行质量控制。

1.2.2 土壤重金属污染评价方法

本文采用了单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法,对土壤重金属污染程度进行了评价。计算公式分别如下:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$
$$P_{\text{综合}} = \sqrt{\frac{(P_{i\text{ave}})^2 + (P_{i\text{max}})^2}{2}}$$

本文选取《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中的农用地土壤污染风险管控标准(以下简称为筛选值)作为基准值,如表4所示。 $P_i < 1$ 表示土壤未受该评价因子污染, $P_i > 1$ 表示该土壤受到该评价因子的污染,且 P_i 值越大,污染越严重。 $P_{\text{综合}} \leq 0.7$,土壤污染等级为安全级, $0.7 < P_{\text{综合}} \leq 1.0$,为警戒级; $1.0 < P_{\text{综合}} \leq 2.0$,土壤轻度污染; $2.0 < P_{\text{综合}} \leq 3.0$,土壤中度污染; $P_{\text{综合}} > 3.0$,土壤重度污染。

1.2.3 土壤重金属风险评价方法

本文采用瑞典科学家Hakanson提出的潜在生态风险指数法^[20](The potential ecological risk index, RI)对设施土壤进行重金属风险评价,计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i^i = \sum_{i=1}^n T_i^i C_i^i = \sum_{i=1}^n T_i^i C_i^i / C_n^i$$

式中: E_i^i 为评价区域土壤中某一污染物的潜在生态危害指数; T_i^i 为评价区域内某一污染物的毒性响应系数($Zn=1$, $Cr=2$, $Cu=Ni=Pb=5$, $Cd=30$ ^[21]); C_i^i 为污染物的污染系数; RI 为评价区域土壤的潜在生态危害指数; $C_{\text{测}}^i$ 为污染物的实测浓度, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_n^i 为该元素的评价标准,本文采用筛选值作为评价标准。

由于污染物潜在生态风险评价的分级标准与所研究的污染物的种类和数量密切相关,而本文研究涉及的污染物种类、数量与Hakanson当年的研究不尽相同,因此参考Fernández等^[22]、徐姗楠等^[23]、张倩等^[24]及其他文献^[25-27]中的方法对 E_i^i 和 RI 的分级标准进行了适当的调整,本文的分级标准如表5所示。

1.2.4 土壤重金属积累速率计算

土壤中重金属元素含量的积累速率的计算参考李恋卿等^[28]研究中的计算方法:

$$k = (C_t - C_0) / t$$

式中: k 为土壤中重金属元素的积累速率, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$; C_t 为 t 时间的土壤环境重金属元素的含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_0 为背景含量或变化起始时含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,本文以CK值作为起始值; t 为经历的时间, a 。同时利用土

表3 肥料中重金属含量与养分含量
Table 3 Heavy metal and nutrient content in fertilizer

肥料 Fertilizer	Cd/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Cr/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Cu/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Ni/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Pb/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Zn/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮 Total nitrogen/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全磷(P_2O_5) Total phosphorus/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全钾(K_2O) Total potassium/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	有机碳 Organic carbon/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH
秸秆(R)	0.66	30.74	7.86	9.29	3.05	72.96	9.80	1.60	6.30	395	—
鸡粪(M)	0.49	21.15	51.43	14.51	4.37	107.96	22.20	14.90	16.60	151	7.51
生石灰(Ca)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	13.60
K_2SO_4 (K)	0.003 2	—	0.92	—	—	4.19	—	—	456.70	—	6.80
复合肥	0.46	10.77	6.13	7.80	1.22	70.20	130.00	74.20	125	—	6.07

表4 《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
Table 4 Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land(GB 15618—2018)($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

pH	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
pH≤5.5	0.3	150	50	60	70	200
5.5<pH≤6.5	0.3	150	50	70	90	200
6.5<pH≤7.5	0.3	200	100	100	120	250
pH>7.5	0.6	250	100	190	170	300

壤重金属积累速率预测未来该土壤中重金属的含量。

1.3 数据处理

本文采用 Excel 2010 与 SPSS 18.0 对数据进行整理与处理。

2 结果与分析

2.1 长期定位施肥土壤中重金属含量分析

如表 6 所示,鸡粪、秸秆、K₂SO₄与生石灰不同组合施入后,土壤中 6 种重金属含量较 CK 处理,均有不同程度的增加,且 Cd、Pb、Zn 含量在 9 种处理下较 CK 均显著增加。但除 Cd 以外的 5 种重金属含量在 10 种处理下均未超出《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中相应的农用地土壤污染风险筛选值。而 Cd 含量仅在 CK 处理下未超出该标准值,其他 9 种处理下土壤中 Cd 含量均超出该标准值。说明本试验中,鸡粪、秸秆、K₂SO₄与生石灰不同组合的长期施入对设施土壤中 Cd 元素含量影响较大。

除 MRKCa 处理外,其余 9 种处理中,土壤中 Cr、Cu、Ni、Pb 与 Zn 含量均为在 MR 处理下最高,并且 MR 处理下土壤中 6 种重金属含量均高于 M 与 R 处理。

说明本研究中,鸡粪与秸秆同时施入对土壤中重金属积累的影响较大。MCa 处理下土壤中各重金属含量较 M 处理均变化不大,说明本试验中在施入鸡粪的基础上,单独施入生石灰对土壤中重金属含量的影响并不显著。MRKCa 处理较 MRK 处理,土壤中 Cd、Cr、Ni、Pb、Zn 均有所增加,其中 Cr 达到显著水平。而 MRCa 处理下,土壤中各重金属含量较 MR 处理均有所减少,其中 Ni、Pb 达到显著水平。MK 处理下,土壤中除 Pb 外其他 5 种重金属含量较 M 处理均有小幅增加。MRK 处理下,土壤中各重金属含量较 MK 处理均有所增加。这可能是因为秸秆的加入增加了土壤中重金属的含量。而该处理下,土壤中除 Cd 以外的重金属含量较 MR 处理均有不同程度的减少。

土壤重金属积累速率计算结果如表 7 所示,同时根据该积累速率计算 10 年及 20 年后该设施土壤中重金属的含量,结果如表 8 所示。由表可知,Cu、Ni、Pb 的积累速率在 MR 处理下最大,Cd、Cr、Zn 的积累速率在 MRKCa 处理下最大。10 年及 20 年后,该设施土壤中 Cr、Cu、Ni、Pb 含量均远低于标准值。而由上文分析可知,当前各处理下土壤中 Cd 含量均已不同程度超标,未来 20 年各处理下土壤 Cd 的积累及污染情况

表 5 本研究 E_i^p 与 RI 的分级标准
Table 5 The grading standard of E_i^p and RI in this study

单一重金属潜在危害指数(E_i^p)与污染程度 Single heavy metal potential ecological index and pollution degree		潜在危害指数(RI)与污染程度 Potential ecological index and pollution degree	
$E_i^p < 30$	轻微生态危害	$RI < 60$	轻微生态危害
$30 \leq E_i^p < 60$	中等生态危害	$60 \leq RI < 120$	中等生态危害
$60 \leq E_i^p < 120$	强生态危害	$120 \leq RI < 240$	强生态危害
$120 \leq E_i^p < 240$	很强生态危害	$RI \geq 240$	很强生态危害
$E_i^p \geq 240$	极强生态危害		

表 6 长期定位施肥土壤中重金属含量(mg·kg⁻¹)
Table 6 Heavy metal content in the long-term located fertilization soil (mg·kg⁻¹)

处理 Treatments	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	pH
CK	0.220 4±0.02d	33.77±2.81c	25.52±1.00c	23.63±0.70e	16.84±1.94c	77.44±2.46e	7.59a
R	0.321 5±0.03abc	38.13±0.51bc	28.59±1.00ab	27.85±0.72cd	21.91±3.78b	101.17±8.51d	7.08bc
M	0.312 0±0.02bc	38.79±2.91bc	26.11±1.00bc	27.18±1.65d	23.37±2.56ab	110.29±3.72cd	7.09bc
MCa	0.304 6±0.02c	39.32±7.99bc	28.72±1.45ab	27.46±0.76cd	23.22±1.92ab	112.57±14.82bc	7.03cd
MR	0.358 8±0.06abc	45.00±3.82ab	29.08±0.22a	32.62±0.99a	27.28±1.38a	121.78±1.91ab	6.92d
MK	0.328 8±0.12abc	39.98±9.50bc	27.21±1.41abc	29.83±1.53bc	23.20±1.70ab	111.74±9.00bc	6.94d
MRCa	0.315 1±0.03bc	42.36±0.74bc	28.51±3.18ab	28.59±1.92bcd	22.06±3.63b	114.37±2.75bc	7.13bc
MRK	0.366 8±0.05ab	41.31±1.77bc	28.35±0.53ab	30.65±2.22ab	24.66±2.14ab	115.38±2.14abc	6.90d
MKCa	0.363 8±0.05ab	40.55±1.62bc	28.90±2.45a	29.38±1.56bcd	22.54±1.87b	113.92±3.27bc	7.11bc
MRKCa	0.374 4±0.03a	51.30±1.63a	28.69±0.82ab	32.51±0.84a	24.75±3.17ab	124.59±2.09a	7.17b

注:表中同列不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著。
Note: Different lowercase letters in the same column in the table indicate significant differences at $P < 0.05$ level.

表7 不同施肥方式设施土壤重金属积累速率($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)Table 7 Accumulation rate of heavy metals in soils with different treatments($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)

处理 Treatments	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
R	0.014 4	0.62	0.44	0.60	0.72	3.39
M	0.013 1	0.72	0.08	0.51	0.93	4.69
MCa	0.012 0	0.79	0.46	0.55	0.91	5.02
MR	0.019 8	1.60	0.51	1.28	1.49	6.33
MK	0.015 5	0.89	0.24	0.89	0.91	4.90
MRCa	0.013 5	1.23	0.43	0.71	0.75	5.28
MRK	0.020 9	1.08	0.40	1.00	1.12	3.51
MKCa	0.020 5	0.97	0.48	0.82	0.81	5.42
MRKCa	0.022 0	2.50	0.45	1.27	1.13	6.74

表8 10年与20年后各处理下土壤重金属含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 8 Heavy metal content under different treatments after 10 years and 20 years($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理 Treatments	Cd		Cr		Cu		Ni		Pb		Zn	
	10 a	20 a	10 a	20 a	10 a	20 a	10 a	20 a	10 a	20 a	10 a	20 a
R	0.465 8	0.610 2	44.36	50.59	32.98	37.36	33.88	39.91	29.15	36.40	135.07	168.97
M	0.442 9	0.573 7	45.96	53.13	26.95	27.80	32.25	37.32	32.70	42.03	157.22	204.15
MCa	0.424 9	0.545 2	47.25	55.18	33.29	37.86	32.93	38.40	32.33	41.45	162.76	212.94
MR	0.556 5	0.754 2	61.04	77.09	34.17	39.25	45.46	58.31	42.19	57.11	185.12	248.47
MK	0.483 7	0.638 5	48.85	57.72	29.62	32.04	38.69	47.54	32.29	41.37	160.74	209.74
MRCa	0.450 5	0.585 7	54.63	66.90	32.78	37.05	35.68	42.76	29.52	36.97	167.13	219.88
MRK	0.576 0	0.785 2	52.08	62.85	32.39	36.44	40.68	50.71	35.83	47.00	137.09	172.17
MKCa	0.568 7	0.773 5	50.24	59.92	33.73	38.56	37.59	45.81	30.68	38.83	169.53	223.70
MRKCa	0.594 5	0.814 5	76.34	101.39	33.22	37.75	45.20	57.88	36.05	47.35	191.95	259.30

将更为严重。另外,在MRKCa处理下,土壤中Zn的积累速率达到最高的 $6.74 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 。按该速率计算,20年后该处理下的土壤Zn含量便将超标,同时MR处理下的土壤Zn含量也将逼近标准值。

2.2 长期定位施肥土壤中重金属污染指数评价

如表9所示,由单因子污染指数评价结果可知,土壤Cd仅在CK处理下无污染,其他处理下均有不同程度的污染,其中MRKCa处理下污染指数最大,为1.25,污染最严重。而其他5种重金属在各处理下均无污染。由内梅罗综合污染指数评价结果可知,仅在CK处理下,土壤达到安全级,土壤为清洁。其他9种处理下土壤均为警戒级,土壤尚且清洁,其中MRKCa处理下土壤的综合污染指数最大。

由表10可知,10年及20年后土壤Cd污染将更为严重。另外,20年后MRKCa处理下的土壤Zn也将处于污染状态。其余元素在各处理下均仍未产生污染。由内梅罗综合污染指数可知,10年后各处理下设施土壤均将具有轻度污染,20年后MRKCa处理下的设

施土壤将达到中度污染。

2.3 长期定位施肥土壤重金属生态风险评价

由土壤重金属潜在生态风险评价结果可知(表11),Cr、Cu、Ni、Pb、Zn的单项污染风险均较为微弱,目前产生的生态危害较小。而Cd仅在CK处理下为轻微生态危害,其他处理下均为中等生态危害。由此可见,在长期不同施肥处理下,设施土壤中Cd元素的积累产生的生态危害较为严重。而各处理下土壤的RI值均小于60,生态危害较为轻微。

由表12可知,土壤Cd的生态风险将随年限的增加而加剧。10年后,各处理下土壤Cd虽仍为中等生态危害,但MRKCa处理下已接近强生态危害。20年后,R、MR、MK、MRK、MKCa、MRKCa处理下土壤Cd将变为强生态风险;而其他重金属元素在各处理下的生态风险虽均有所增加,但仍较为轻微。由未来20年各处理下土壤的RI值可知,10年后MR、MRK、MKCa、MRKCa处理下设施土壤将均有中等生态危害,20年后各处理下土壤的生态风险均有不同程度的增加,各

表9 长期定位施肥土壤单因子污染指数与内梅罗综合污染指数评价结果

Table 9 The results of long-term fertilization soil single factor pollution index and Nemerow pollution index

处理 Treatments	P_{Cd}	P_{Cr}	P_{Cu}	P_{Ni}	P_{Pb}	P_{Zn}	$P_{综合}$
CK	0.37	0.14	0.26	0.12	0.10	0.26	0.30
R	1.07	0.19	0.29	0.28	0.18	0.40	0.81
M	1.04	0.19	0.26	0.27	0.19	0.44	0.79
MCa	1.02	0.20	0.29	0.27	0.19	0.45	0.77
MR	1.20	0.23	0.29	0.33	0.23	0.49	0.91
MK	1.10	0.20	0.27	0.30	0.19	0.45	0.83
MRCa	1.05	0.21	0.29	0.29	0.18	0.46	0.80
MRK	1.22	0.21	0.28	0.31	0.21	0.46	0.92
MKCa	1.21	0.20	0.29	0.29	0.19	0.46	0.91
MRKCa	1.25	0.26	0.29	0.33	0.21	0.50	0.94

表10 10年与20年后设施土壤重金属单因子污染指数与内梅罗综合污染指数评价结果

Table 10 Single factor and Nemerow comprehensive pollution index of greenhouse soil after 10 years and 20 years

处理 Treatments	P_{Cd}		P_{Cr}		P_{Cu}		P_{Ni}		P_{Pb}		P_{Zn}		$P_{综合}$	
	10 a	20 a	10 a	20 a	10 a	20 a	10 a	20 a	10 a	20 a	10 a	20 a	10 a	20 a
R	1.55	2.03	0.22	0.25	0.33	0.37	0.34	0.40	0.24	0.30	0.54	0.68	1.16	1.52
M	1.48	1.91	0.23	0.27	0.27	0.28	0.32	0.37	0.27	0.35	0.63	0.82	1.11	1.43
MCa	1.42	1.82	0.24	0.28	0.33	0.38	0.33	0.38	0.27	0.35	0.65	0.85	1.07	1.37
MR	1.86	2.51	0.31	0.39	0.34	0.39	0.45	0.58	0.35	0.48	0.74	0.99	1.40	1.89
MK	1.61	2.13	0.24	0.29	0.30	0.32	0.39	0.48	0.27	0.34	0.64	0.84	1.21	1.59
MRCa	1.50	1.95	0.27	0.33	0.33	0.37	0.36	0.43	0.25	0.31	0.67	0.88	1.13	1.47
MRK	1.92	2.62	0.26	0.31	0.32	0.36	0.41	0.51	0.30	0.39	0.55	0.69	1.43	1.94
MKCa	1.90	2.58	0.25	0.30	0.34	0.39	0.38	0.46	0.26	0.32	0.68	0.89	1.41	1.91
MRKCa	1.98	2.72	0.38	0.51	0.33	0.38	0.45	0.58	0.30	0.39	0.77	1.04	1.49	2.03

表11 长期定位施肥土壤重金属潜在生态风险评价结果

Table 11 The results of long-term fertilization soil potential ecological index

处理 Treatments	E_r^i						R_I
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	
CK	11.02	0.27	1.28	0.62	0.50	0.26	13.94
R	32.15	0.38	1.43	1.39	0.91	0.40	36.67
M	31.20	0.39	1.31	1.36	0.97	0.44	35.67
MCa	30.46	0.39	1.44	1.37	0.97	0.45	35.08
MR	35.88	0.45	1.45	1.63	1.14	0.49	41.04
MK	32.88	0.40	1.36	1.49	0.97	0.45	37.55
MRCa	31.51	0.42	1.43	1.43	0.92	0.46	36.17
MRK	36.68	0.41	1.42	1.53	1.03	0.41	41.48
MKCa	36.38	0.41	1.45	1.47	0.94	0.46	41.09
MRKCa	37.44	0.51	1.43	1.63	1.03	0.50	42.55

处理下土壤的生态风险均将变为中等生态危害。

3 讨论

畜禽粪便与秸秆作为有机肥施入土壤,可增加土壤有机质与微量元素的含量,提高土壤质量,增加作

物产量。但畜禽粪便与秸秆中的重金属会随之进入土壤,同时秸秆可钝化土壤中的重金属,减少作物对重金属的吸收^[10],长期大量施用可导致土壤中重金属的积累。本研究中,鸡粪与秸秆长期的分别单独施入或两者混合施入均可大幅增加设施土壤中重金属的

表 12 10 年与 20 年后长期定位施肥土壤重金属潜在生态风险

Table 12 The results of long-term fertilization soil potential ecological index after 10 years and 20 years

处理 Treatments	E_{Cd}		E_{Cr}		E_{Cu}		E_{Ni}		E_{Pb}		E_{Zn}		RI	
	10 a	20 a	10 a	20 a	10 a	20 a	10 a	20 a	10 a	20 a	10 a	20 a	10 a	20 a
R	46.58	61.02	0.44	0.51	1.65	1.87	1.69	2.00	1.21	1.52	0.54	0.68	52.13	67.58
M	44.29	57.37	0.46	0.53	1.35	1.39	1.61	1.87	1.36	1.75	0.63	0.82	49.70	63.73
MCa	42.49	54.52	0.47	0.55	1.66	1.89	1.65	1.92	1.35	1.73	0.65	0.85	48.27	61.46
MR	55.65	75.42	0.61	0.77	1.71	1.96	2.27	2.92	1.76	2.38	0.74	0.99	62.74	84.45
MK	48.37	63.85	0.49	0.58	1.48	1.60	1.93	2.38	1.35	1.72	0.64	0.84	54.26	70.97
MRCa	45.04	58.57	0.55	0.67	1.64	1.85	1.78	2.14	1.23	1.54	0.67	0.88	50.91	65.65
MRK	57.60	78.52	0.52	0.63	1.62	1.82	2.03	2.54	1.49	1.96	0.55	0.69	63.81	86.15
MKCa	56.87	77.35	0.50	0.60	1.69	1.93	1.88	2.29	1.28	1.62	0.68	0.89	62.89	84.68
MRKCa	59.45	81.45	0.76	1.01	1.66	1.89	2.26	2.89	1.50	1.97	0.77	1.04	66.40	90.26

含量,因此施用鸡粪与秸秆对土壤中重金属积累、富集的影响不可忽视。另外,复合肥中含有一定量的重金属,长期施入土壤也可能导致土壤重金属的积累^[29-30]。

本研究中,MRCa处理较MR处理,土壤中各重金属含量均有所减少,且Ni、Pb减少显著。这可能是由于生石灰的施入增加了土壤中Ca元素的含量,促进了作物的生长^[31],从而增加了作物对重金属的吸收。也可能是因为秸秆与生石灰的同时施入增加了土壤中大团聚体(5~2 mm)的含量^[3]。而土壤中的重金属优先富集于小粒径的土壤团聚体^[32],有研究发现在黄泥土与乌珊土中均为黏粒级团聚体(粒径<2 μm)对重金属的吸附量最高^[33]。因而大团聚体含量的增加减少了土壤对重金属的吸附。

K₂SO₄作为钾肥施入土壤,可增加蔬菜产量,提高蔬菜品质^[34-35],同时还可降低土壤中有效态Cd含量^[36-37]。MK处理下土壤中Cd、Cr、Cu、Ni、Zn含量较M处理均有小幅增加,这可能是由于K₂SO₄的施入增加了土壤对重金属的固定。黑亮等^[38]研究发现,K₂SO₄作为重金属固定剂加入污泥中,可有效地将Zn固定在污泥中。Zhang等^[39]认为,向土壤中加入SO₄²⁻可增加土壤中负电荷的密度并增加土壤负电位,从而增加土壤对Cd和Zn的吸附量。但在MRK处理下,除Cd以外的重金属含量较MR处理均有不同程度的减少。这可能是由于K₂SO₄可促进作物的生长^[35],从而增加了作物对土壤中各营养元素及重金属的吸收。

由土壤污染评价及生态风险评价结果可知,鸡粪、秸秆、K₂SO₄、生石灰与复合肥不同组合的长期施入可增加土壤重金属污染的程度及生态风险。并且在五者同时施入时,土壤受污染程度最为严重,生态

风险最强。一方面,这可能是因为复合肥中含有一定量的重金属,同时鸡粪与秸秆中的重金属在土壤中释放,极大增加了土壤中重金属的含量。另一方面,K₂SO₄对土壤中的重金属具有一定的固定作用。而秸秆在其分解过程中生成腐殖质也可吸附固定重金属^[41]。同时有机物料与石灰配施可提高土壤pH,同时减少土壤中重金属的有效态含量^[40],从而减少作物对土壤中重金属元素的吸收。上述对土壤中重金属总量与有效态含量的影响作用,随物料的施入共同产生了土壤重金属的积累效应。

因此,多种物质同时施入土壤后,会在土壤中产生一系列复杂多样的反应,对土壤中重金属的积累产生不同的影响。该过程与反应机理,及其对土壤中重金属含量的影响都有待于进一步更深入的研究与探索。

4 结论

(1)长期向设施土壤中施入鸡粪、秸秆、生石灰与K₂SO₄可引起土壤重金属不同程度的积累。Cu、Ni、Pb的积累速率在MR处理下最大,Cd、Cr、Zn的积累速率在MRKCa处理下最大。目前各处理下土壤Cd已超标,产生污染。而各处理下土壤综合污染状况均为警戒级,土壤尚且清洁,其生态危害均较为轻微。其中MRKCa处理下的土壤综合污染指数与潜在生态风险指数最大。

(2)20年后,土壤Cr、Cu、Ni、Pb均未超标,而Cd污染情况将更为严重,MRKCa处理下的土壤Zn将在近20年后产生污染。土壤重金属的综合污染水平与生态风险也将随之增强,20年后各处理下的土壤均将变为中等污染,具有中等生态危害。

参考文献:

- [1] 刘彩文. 我国设施农业发展现状探讨[J]. 现代园艺, 2018, 7(14): 24.
LIU Cai-wen. Discussion on the current situation of the development of facility agriculture[J]. *Modern Horticulture*, 2018, 7(14): 24.
- [2] 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 China's facility vegetable industry[J]. *Chinese Horticulture Abstracts*, 2017, 33(1): 75-77.
- [3] 张明琦, 孙 雪, 张国显, 等. 稻草与生石灰添加介导的温室内土壤团聚体稳定性及碳分布特性[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 199-204.
ZHANG Yue-qi, SUN Xue, ZHANG Guo-xian, et al. Soil aggregation and total carbon distribution in soil amended with straw and lime of greenhouse[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3): 199-204.
- [4] 张明琦, 刘 慧, 赵凤艳, 等. 不同施肥措施对番茄连作土壤酚酸含量和微生物功能多样性的调节[J]. 土壤通报, 2017, 48(4): 887-894.
ZHANG Yue-qi, LIU Hui, ZHAO Feng-yan, et al. Regulation of various fertilization measures on soil microbial functional diversity and phenolic acid contents under tomato continuous cropping in greenhouse[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(4): 887-894.
- [5] 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.
- [6] Cang 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.
- [7] 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. Effect of applying potassium sulfate on the yield and quality of vegetables and fruit trees in northern China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2): 392-397.
- [8] 杨玉爱. 我国有机肥料研究及展望[J]. 土壤学报, 1996, 33(4): 414-422.
YANG Yu-ai. Perspectives of organic fertilizer research in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33(4): 414-422.
- [9] 姜 洁, 陈 宏, 赵秀兰. 农作物秸秆改良土壤的方式与应用现状[J]. 中国农学通报, 2008, 24(8): 420-423.
JIANG Jie, CHEN Hong, ZHAO Xiu-lan. The application actuality and methods of meliorated soil with crop stalks[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(8): 420-423.
- [10] 汤文光, 肖小平, 唐海明, 等. 长期不同耕作与秸秆还田对土壤养分库容及重金属 Cd 的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 168-176.
TANG Wen-guang, XIAO Xiao-ping, TANG Hai-ming, et al. Effect of long-term tillage and rice straw returning on soil nutrient pools and Cd concentration[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(1): 168-176.
- [11] 倪中应, 沈 倩, 章明奎. 秸秆还田配施石灰对水田土壤铜、锌、铅、镉活性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(3): 215-225.
NI Zhong-ying, SHEN Qian, ZHANG Ming-kui. Effect of crop straw returning with lime on activity of Cu, Zn, Pb and Cd in paddy soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(3): 215-225.
- [12] 贾 乐, 朱俊艳, 苏德纯. 秸秆还田对镉污染农田土壤中镉生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10): 1992-1998.
JIA Le, ZHU Jun-yan, SU De-chun. Effect of crop straw return on soil cadmium availability in different cadmium contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(10): 1992-1998.
- [13] 李本银, 汪 鹏, 吴晓晨, 等. 长期肥料试验对土壤和水稻微量元素及重金属含量的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(2): 281-288.
LI Ben-yin, WANG Peng, WU Xiao-chen, et al. Effect of long-term fertilization experiment on concentration of micronutrients and heavy metals in soil and brown rice[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(2): 281-288.
- [14] 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(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(1): 105-108.
- [15] 王 美. 长期施肥对土壤及作物产品重金属累积的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
WANG Mei. Effects of long-term fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [16] 杨振兴, 周怀平, 解文艳, 等. 长期施肥对土壤及玉米籽粒中 Pb、As 含量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4827-4836.
YANG Zhen-xing, ZHOU Huai-ping, XIE Wen-yan, et al. Effect of long-term fertilization on Pb, as contents of soil and maize grain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4827-4836.
- [17] 高焕梅. 长期施肥对紫色土—作物重金属含量的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2008.
GAO Huan-mei. Effects of long-term fertilization on heavy metal content in purple soil and crop[D]. Chongqing: Southwest University, 2008.
- [18] 王 颖, 韩晓日, 孙杉杉, 等. 长期定位施肥对棕壤重金属的影响及其环境质量评价[J]. 沈阳农业大学学报, 2008(4): 442-446.
WANG Ying, HAN Xiao-ri, SUN Shan-shan, et al. Effects of long term fertilization on the heavy metals in brown soil and environmental quality evaluation[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2008(4): 442-446.
- [19] 苏 姝, 王 颖, 刘 景, 等. 长期施肥下黑土重金属的演变特征[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4837-4845.
SU Shu, WANG Ying, LIU Jing, et al. Evolution characteristics of heavy metals in the black soil under long-term fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4837-4845.
- [20] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14: 975-1000.
- [21] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 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 & Technology*, 2008, 31(2):112-115.
- [22] Fernández J A, Carballeira A. Evaluation of contamination, by different elements, in terrestrial Mosses[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2001, 40(4):461-468.
- [23] 徐姗楠, 李纯厚, 徐娇娇, 等. 大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价[J]. 环境科学, 2014, 35(6): 2075-2084.
- XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, et al. Pollution by heavy metals in the petrochemical sewage waters of the sea area of Daya bay and assessment on potential ecological risks[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(6): 2075-2084.
- [24] 张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 等. 大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 环境科学, 2015, 36(11): 4232-4239.
- ZHANG Qian, CHEN Zong-juan, PENG Chang-sheng, et al. Heavy metals pollution in topsoil from Dagang industry area and its ecological risk assessment[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(11):4232-4239.
- [25] 陈怡先, 姜小三, 王勇, 等. 基于GIS矿区土壤重金属生态环境及人体健康评价[J]. 环境科学学报, 2018, 38(4): 1642-1652.
- CHEN Yi-xian, JIANG Xiao-san, WANG Yong, et al. Assessment of ecological environment and human health of heavy metals in mining area based on GIS[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018,38(4): 1642-1652.
- [26] 范明毅, 杨皓, 黄先飞, 等. 典型山区燃煤型电厂周边土壤重金属形态特征及污染评价[J]. 中国环境科学, 2016, 36(8):2425-2436.
- FAN Ming-yi, YANG Hao, HUANG Xian-fei, et al. Chemical forms and risk assessment of heavy metals in soils around a typical coal-fired power plant located in the mountainous area[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(8): 2425-2436.
- [27] 李一蒙, 马建华, 刘德新, 等. 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2015(3):1037-1044.
- LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, et al. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of urban soil in Kaifeng city, China[J]. *Environment Science*, 2015(3):1037-1044.
- [28] 李恋卿, 潘根兴, 张平究, 等. 太湖地区水稻土表层土壤10年尺度重金属元素积累速率的估计[J]. 环境科学, 2002, 23(3):119-123.
- LI Lian-qing, PAN Gen-xing, ZHANG Ping-jiu, et al. Estimating of decadal accumulation rates of heavy metals in surface rice soils in the Tai Lake region of China[J]. *Environment Science*, 2002, 23(3):119-123.
- [29] 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(2): 62-64.
- WANG Qi-chao, MA Zhuang-wei. Heavy metals in chemical fertilizer and environmental risks[J]. *Rural Eco-Environment*, 2004(2): 62-64.
- [30] 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(2): 466-480.
- WANG Mei, LI Shu-tian. Heavy metals in fertilizers and effect of the fertilization on heavy metal accumulation in soil and crops[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014(2): 466-480.
- [31] 王廷芹, 李钟明. 果蔬钙肥对苋菜生长、品质和产量的影响[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2011(1):162-165.
- WANG Ting-qin, LI Zhong-ming. The effects of different concentration calcium on growth, quality and yield in amaranth[J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2011(1):162-165.
- [32] 路雨楠, 徐殿斗, 成杭新, 等. 土壤团聚体中重金属富集特征研究进展[J]. 土壤通报, 2014, 45(4): 1008-1013.
- LU Yu-nan, XU Dian-dou, CHENG Hang-xin, et al. Recent advances in studying characteristics of heavy metals enriched in soil aggregates[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(4): 1008-1013.
- [33] 王芳, 李恋卿, 董长勋, 等. 黄泥土和乌桕中不同粒径微团聚体对Cu²⁺的吸附与解吸[J]. 环境化学, 2007(2): 135-140.
- WANG Fang, LI Lian-qing, DONG Chang-xun, et al. Sorption and desorption of Cu²⁺ by size fractions of microaggregates from two paddy soils[J]. *Environmental Chemistry*, 2007(2): 135-140.
- [34] 李裕荣, 尹迪信, 朱青, 等. 硫酸钾对蔬菜产量及品质的影响[J]. 贵州农业科学, 2000(4): 40-42.
- LI Yu-rong, YIN Di-xin, ZHU Qing, et al. Effect of potassium sulphate on yield and quality of vegetable in Guizhou[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2000(4): 40-42.
- [35] 郭亚芬, 张忠学, 栾非时. 氯化钾和硫酸钾对蔬菜产量品质的效应[J]. 北方园艺, 1999(1): 3-4.
- GUO Ya-fen, ZHANG Zhong-xue, LUAN Fei-shi. Effects of potassium chloride and potassium sulfate on vegetable yield and quality[J]. *Northern Horticulture*, 1999(1): 3-4.
- [36] 陈苏, 孙丽娜, 孙铁珩, 等. 钾肥对镉的植物有效性的影响[J]. 环境科学, 2007(1): 182-188.
- CHEN Su, SUN Li-na, SUN Tie-heng, et al. Influence of potassium fertilizer on the phytoavailability of cadmium[J]. *Environmental Science*, 2007(1): 182-188.
- [37] 赵晶, 冯文强, 秦鱼生, 等. 不同氮磷钾肥对土壤pH和镉有效性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(5): 953-961.
- ZHAO Jing, FENG Wen-qiang, QIN Yu-sheng, et al. Effects of application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on soil pH and cadmium availability[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010,47(5): 953-961.
- [38] 黑亮, 胡月明, 吴启堂, 等. 用固定剂减少污泥中重金属污染土壤的研究[J]. 农业工程学报, 2007(8): 205-209.
- HEI Liang, HU Yue-ming, WU Qi-tang, et al. Fixing heavy metals in sludge and reducing pollution to soil using heavy metal stabilizers[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007(8): 205-209.
- [39] Zhang G, Brümmer G W, Zhang X N. Effect of sulfate on adsorption of zinc and cadmium by variable charge soils[J]. *Pedosphere*, 1998(3): 54-59.
- [40] 韩德飞. 石灰与有机物料配施对镉、铅、锌污染土壤的修复效果研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2010.
- HAN De-fei. Study on the effects of the combined application of organic materials with lime on the remediation of a Cd,Pb and Zn contaminated soil[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2010.