

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.037.

庄向婷, 强敏敏, 叶超. 集约化养猪场粪污堆肥对菜地土壤污染的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 462-467.

ZHUANG Xiangting, Qiang Minmin, Ye Chao. Influence of Manure Compost from Intensive Pig Farm on Pollution of Vegetable Soil[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 462-467.

# 集约化养猪场粪污堆肥对菜地土壤污染的影响

庄向婷<sup>1</sup>, 强敏敏<sup>2</sup>, 叶超<sup>1</sup>

(1.杨凌职业技术学院 动物工程分院, 陕西 杨凌 712100; 2.中国电建集团 西北勘测设计研究院有限公司, 西安 710065)

**摘要:** [目的] 评估集约化养猪场粪污堆制的有机肥在蔬菜种植应用中的土壤污染风险, 进而为提高蔬菜产量和改善蔬菜品质, 减少土壤污染提供科学依据。 [方法] 设计了4个等氮用量处理: CK: 纯无机肥; M<sub>1</sub>: 有机肥(1/3) + 无机肥(2/3); M<sub>2</sub>: 有机肥(2/3) + 无机肥(1/3); M<sub>3</sub>: 纯有机肥, 进行田间小区试验, 研究了猪粪有机肥对蔬菜(茼蒿)地土壤理化性质和重金属含量的影响。 [结果] 各处理硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)含量从土壤表层到深层均表现为递减趋势, 其主要分布在0—40 cm土层, 高量有机肥的投入会引起土壤上层轻微的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N淋溶, 但不会对地下水造成污染; 施用有机肥可不同程度地增加土壤表层速效磷和水溶性磷的含量, 存在一定的磷污染风险, 对深层土壤无显著影响; 施用有机肥后土壤和蔬菜中的重金属元素Cd, Pb, As, Hg, Cr及微量元素Cu的含量均在安全标准以内, 未导致土壤重金属污染和蔬菜品质下降; 随着有机肥施用量的增加, 产量反而呈下降趋势, 低量有机肥配施减量化肥(M<sub>1</sub>), 即可显著增加蔬菜产量。 [结论] 在菜地生产中建议采用化肥与适量有机肥配施, 可促使蔬菜产量、品质提升和土壤污染防治等多目标协同实现。

**关键词:** 猪粪有机肥; 菜地; 硝态氮; 磷; 重金属

中图分类号: X131.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)05-0462-06

## Influence of Manure Compost from Intensive Pig Farm on Pollution of Vegetable Soil

ZHUANG Xiangting<sup>1</sup>, Qiang Minmin<sup>2</sup>, Ye Chao<sup>1</sup>

(1. College of Animal Engineering, Yangling Vocational and Technical College, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Power China Northwest Survey Design and Research Institute Co. Ltd., Xi'an 710065, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to assess the potential soil pollution risk associated with the utilization of organic fertilizer derived from intensive pig farms in vegetable cultivation, and to provide scientific basis for increasing vegetable yield, improving vegetable quality and reducing soil pollution. [Methods] A field experiment was conducted to investigate the impact of pig manure organic fertilizer on the physicochemical properties and heavy metal contents of vegetable soil. Four treatments were set: CK (pure inorganic fertilizer), M<sub>1</sub> (organic fertilizer: 1/3 + inorganic fertilizer: 2/3), M<sub>2</sub> (organic fertilizer: 2/3 + inorganic fertilizer: 1/3), and M<sub>3</sub> (pure organic fertilizer). [Results] The nitrate nitrogen (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N) content exhibited a decreasing trend from the soil surface to the deeper layers, primarily concentrated within the 0—40 cm soil layer. The application of a substantial amount of organic fertilizer resulted in minor soil leaching in the upper layer, but no groundwater pollution occurred. Organic fertilizer application increased the availability of phosphorus and water-soluble phosphorus in the surface soil to varying extents, posing a certain risk of phosphorus pollution; however, no significant impact was observed in the deeper soil layers. Heavy metal concentrations, including Cd, Pb, As, Hg, Cr, as well as trace elements like Cu, in both soil and vegetables, complied with safety standards following organic fertilizer application, indicating the absence of

收稿日期: 2022-11-09

修回日期: 2022-11-19

资助项目: 国家自然科学基金(41601321); 陕西省自然科学基金(2022JM-154); 陕西省教育科学“十四五”规划2021年度课题(SGH21Y0599)

第一作者: 庄向婷(1988—), 女, 河南许昌人, 硕士, 讲师, 主要从事畜牧养殖研究。E-mail: xiangtingzhuang@163.com

<http://stbcj.paperonce.org>

soil heavy metal pollution and vegetable quality degradation. Increasing the application rate of organic fertilizer demonstrated the decreasing trend in yield, whereas combining a reduced amount of organic fertilizer with decreased chemical fertilizer application ( $M_1$ ) significantly increased vegetable yield. [Conclusion] It is recommended to employ a combination of chemical fertilizer and appropriate organic fertilizer in vegetable cultivation, leveraging technology to achieve multiple objectives such as improvement of vegetable yield, enhancement of quality, and effective prevention and control of soil pollution.

**Keywords:** pig manure organic fertilizer; vegetable; nitrate nitrogen; phosphorus; heavy metal

随着集约化养殖业的快速发展,养殖畜禽所产生的粪便量也在与日俱增。由于目前管理不到位和技术不成熟等问题,大量畜禽粪便未经消毒、灭菌处理就直接排放,对环境造成了严重的污染<sup>[1]</sup>。目前,我国畜禽粪便的消纳场所主要是菜地和果园,在蔬菜生产过程中农民凭经验过量施用粪污堆肥的现象非常普遍<sup>[2]</sup>。据《第二次全国污染源普查公报》公布,2021年我国畜禽粪便量达到了30.5亿t,以猪粪、牛粪和羊粪为主,畜禽粪污已成为农业面源污染的主要来源之一。菜地化肥及有机肥的不合理施用,导致菜地土壤质量问题严重,严重破坏蔬菜产业的发展和土壤健康循环<sup>[3-4]</sup>,因此菜地施肥问题,尤其是有机肥的合理施用量是目前亟需解决的问题。

硝态氮( $\text{NO}_3^-$ -N)是蔬菜利用氮素的主要形态,而土壤胶体难以吸附( $\text{NO}_3^-$ -N),一旦施用超量的氮肥, $\text{NO}_3^-$ -N就会淋失对环境造成污染<sup>[5]</sup>。众多研究表明,施用有机肥会导致土壤中 $\text{NO}_3^-$ -N累积,进而造成地下水的硝酸盐污染<sup>[6]</sup>,在田间径流液和淋失液中80%的氮来源于有机肥中的矿化氮<sup>[7]</sup>。大量施用有机肥可使4m以上土层中 $\text{NO}_3^-$ -N浓度达到40~50 mg/kg<sup>[8-9]</sup>。此外,有机肥与无机肥配施可以改变无机磷组分的含量进而增加土壤有机磷的含量,当土壤速效磷因有机肥的过量施用而达到一定临界值时,土壤水溶性磷含量也会显著提高<sup>[10]</sup>,导致土壤磷的淋失。

此外,畜禽粪肥的大量施用也会带来一定的重金属污染风险。在集约化养殖中饲料会普遍添加Cu, As等微量营养元素<sup>[11]</sup>,但由于猪等畜禽对饲料中添加的微量元素不能够完全吸收利用,使得大部分重金属和微量元素随着粪尿排出<sup>[12]</sup>,导致畜禽粪便含较高浓度的重金属等元素<sup>[13-14]</sup>。含微量元素的畜禽堆肥营养丰富,可以补充土壤中缺乏的微量元素以促进农作物生长,但对农田土壤重金属污染而言,这些富含微量元素的有机肥对其构成了潜在威胁<sup>[15-17]</sup>。

综上所述,在农业生产中大量使用畜禽粪肥对土壤环境存在一定污染风险,尤其是在高氮肥投入的设施菜地。因而,确定有机肥的合理用量、降低有机肥使用对土壤环境污染是亟待解决的问题。为此,本研

究以陕西省杨凌示范区某设施蔬菜生产基地为对象,研究有机肥与无机肥配施对设施菜地耕层土壤 $\text{NO}_3^-$ -N、磷、重金属和蔬菜产量、品质的时空影响,提出区域适宜的有机肥与无机肥的配施比例,可为评估有机肥施用后土壤污染风险,提高蔬菜产量和改善蔬菜品质,减少土壤污染提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地概况

研究区位于陕西杨凌示范区设施菜地种植集中区五泉镇,属暖温带季风半湿润气候区,年均辐射总量为475.5 KJ/m<sup>2</sup>,多年平均气温为13.0℃,全年无霜期为210 d,年平均降水量632 mm,年平均蒸发量为1 500 mm。

试验土壤属褐土类壤土亚类,红油土属,厚层红油土种(土垫旱耕人为土),黄土母质。土壤田间持水率为24%,表层土壤pH值为8.12,土壤容重为1.38 g/cm<sup>3</sup>。表层(0—20 cm)土壤养分状况为:有机碳11.39 g/kg,全氮0.98 g/kg,全磷0.79 g/kg,全钾13.81 g/kg,硝态氮79.06 mg/kg,速效磷24.52 mg/kg,速效钾75.21 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验期从2021年5月开始至2021年10月结束,为一个蔬菜季,蔬菜品种选择为多次收获叶类蔬菜茼蒿(*Chrysanthemum coronarium* L.),试验共设4个处理,3次重复,随机区组排列,小区面积为3 m×2.5 m。供试有机肥采用腐熟猪粪有机肥,采自周边集约化种猪场,该猪场现存栏基础母猪3 000头,每年可向社会提供优质种猪26 200头,提供商品猪31 300头。猪粪肥中含有有机碳650.0 g/kg,全氮32.32 g/kg,全磷16.27 g/kg,全钾9.74 g/kg,无机肥采用复合肥(N 15%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 15%, K<sub>2</sub>O 15%),各处理均施同等量的氮肥(折纯氮180 kg N/hm<sup>2</sup>)。4个处理有机肥用量分别为:CK:100%无机肥; $M_1$ :有机肥(1/3折氮量)+无机肥(2/3折氮量); $M_2$ :有机肥(2/3折氮量)+无机肥(1/3折氮量); $M_3$ :100%有机肥(表1)。所有肥料采用洒施方式并立即人为翻耕,整个蔬菜季设置一次基肥和一次追肥,采用沟灌方式每5~7 d浇水一次,具体取决于土壤干湿度和蔬菜长势。试验期间的灌溉、翻

耕和除草等管理措施,均按照当地传统蔬菜生产管理方式统一进行,各处理相同。

表1 不同处理的有机肥和化肥的施用量

时间	施肥	处理	肥料种类	施用量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	
				复合肥	有机肥
2021-5-23	基肥	CK	复合肥	1200	0
		M <sub>1</sub>	1/3 有机肥+2/3 复合肥	800	1857
		M <sub>2</sub>	2/3 有机肥+1/3 复合肥	400	3715
		M <sub>3</sub>	100% 有机肥	0	5571
2021-8-21	追肥	CK	复合肥	400	0
		M <sub>1</sub>	复合肥	400	0
		M <sub>2</sub>	复合肥	400	0
		M <sub>3</sub>	复合肥	400	0

注:复合肥:N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=15:15:15;有机肥中全氮含量为32.3 g/kg。

### 1.3 样品采集和分析方法

土壤样品采集:蔬菜生育期采集0—20 cm 土壤样品用于监测硝态氮的动态变化,约10 d 一次;在蔬菜收获后进行土壤样品采集,每个小区用土钻取深度为0—100 cm 土壤剖面样品(每20 cm 一层),随机取5 个点,每个处理小区相同土层的土壤样品混为一个样品。剖面样品用于测定土样硝态氮、速效磷和水溶性磷含量,其中0—20 cm 土样,风干过筛后用于土壤重金属的测定。每茬蔬菜收获后称其鲜重作为产量,每次收获产量之和为总产量。收获的茼蒿样品用去离子水冲洗并用滤纸吸去表面多余水分,并用高速组织捣碎机将其捣成匀浆,采用聚乙烯样品盒装样,放置-18℃冰柜中保存待测其重金属含量。

土壤和植物测定方法:硝态氮含量用1 mol/L KCL 浸提土壤(水土质量比为5:1),采用流动分析仪测定;土壤速效磷含量采用NaHCO<sub>3</sub> 浸提—钼锑抗比色法测定;土壤水溶性磷采用CaCl<sub>2</sub> 溶液浸提,钼蓝比色法测定;采用火焰原子吸收分光光度法检测土壤和植物Cu,Cr,采用石墨炉原子吸收分光光度法检测Pb,Cd,采用原子荧光光谱法检测Hg,As。

### 1.4 数据分析

采用Excel 2021(Microsoft)对试验数据进行整理和标准差计算;采用SPSS 20.0(IBM)软件中的单因素ANOVA 进行统计分析,显著性分析采用Duncan 新复极差法;用OriginPro8.5(Origin Lab)进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 施用有机肥对菜地土壤NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的影响

图1 为各处理0—20 cm 土层NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量在蔬菜生长期的动态变化。各处理的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量差异较大,但变化趋势相似。从不同处理土壤NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 在整个作物

生长期的动态变化来看,基肥对土壤NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 累积影响大,施肥后硝态氮累积量明显增加;之后随着蔬菜生长对氮需求量增大,在生育期追肥致使NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 累积量并不高。各处理NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量随有机肥使用量的增加而增加,M<sub>3</sub> 处理的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量一直处于较高水平。施用有机肥的处理NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 动态变化规律基本一致,CK 处理的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 增加滞后于有机肥处理。

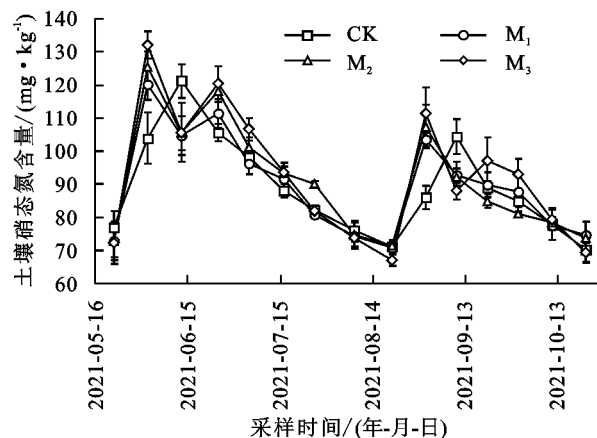


图1 不同有机肥处理0—20cm 土层硝态氮季节动态变化

图2 为试验结束后各处理土壤剖面的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量。各处理NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量主要分布在0—40 cm 土层,均表现为从表层到深层逐渐降低的趋势。CK 处理不同土层NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量差异较小,有机肥处理表层NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量明显高于下层土壤,且随着有机肥用量的增加差值增大。下层土壤NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量差异不明显,尤其是M<sub>2</sub> 和M<sub>3</sub> 处理60—80 cm 和80—100 cm 土层NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量基本相同,主要是由于有机肥在表层发生矿化。因此,增施有机肥对表层NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的影响较大,对下层影响较小。

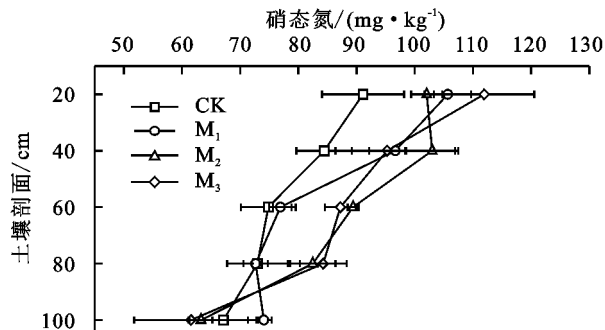


图2 不同有机肥处理土壤剖面硝态氮含量

CK 处理下,各土层NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量基本都低于有机肥处理的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量,尤其是0—20 cm 和20—40 cm 土层。由此可以看出,在当地土壤肥力条件下,需要适当的施用有机肥才能满足作物的生长需求。M<sub>1</sub> 处理40—60 cm 和60—80 cm 土层NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量与本底含量差异不显著,而M<sub>2</sub> 和M<sub>3</sub> 处理的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量均高于本底NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量,这可能是由于施用高量有机

肥导致表土轻微淋溶,但淋溶程度较低。在 80—100 cm 土层,各处理土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量也均低于本底  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  含量,说明有机肥的施入并未引起土壤中  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  淋溶,不会造成地下水污染。

2.2 施用有机肥对菜地土壤速效磷的影响

图 3 是不同处理土壤剖面速效磷和水溶性磷含量变化图。从图 3A 中可以看出,不同处理土壤 0—20 cm 和 20—40 cm 土层速效磷含量变化差异显著,40 cm 以下土层的速效磷变化不大,表明速效磷主要集中在耕层。对比各处理结果发现,0—20 cm 和 20—40 cm 土层 CK 处理土壤速效磷含量低于施用有机肥处理,说明有机肥的施用可以增加土壤速效磷含量,且有机肥施用量的增加其含量也随之增加。有研究认为把当地土壤磷淋失的速效磷含量临界点

为  $39.3 \text{ mg/kg}$ <sup>[18]</sup>。本研究所有施肥处理 0—20 cm 和 20—40 cm 土层的速效磷含量基本都超过了  $39.3 \text{ mg/kg}$ 。因此在该试验条件下,有机肥的施用可能会提高土壤耕层的磷污染,且当有机肥施用量大于一定量(即  $M_2$ )后会显著增加速效磷的含量,因此有机肥的过量滥施加大了土壤耕层的磷污染风险。

从图 3B 中可以看出,与速效磷的变化规律一致,土壤水溶性磷的含量由于添加有机肥而显著提高,尤其是在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层。低量有机肥对水溶性磷含量影响不大,而高量有机肥明显提高了水溶性磷含量。总之,过度施用有机肥会不同程度地提高土壤表层中速效磷和水溶性磷的含量,对深层土壤没有显著影响,因此该研究地的土壤表层存在磷污染风险,但不存在磷淋溶风险。

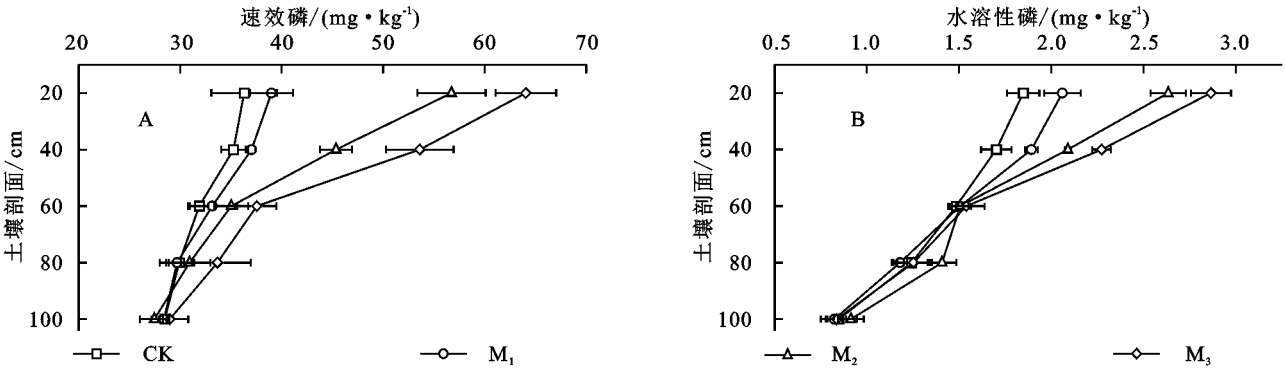


图 3 不同有机肥处理土壤剖面速效磷含量(A)和水溶性磷含量(B)

2.3 施用有机肥对土壤重金属污染的影响

有机肥中重金属含量参照现有的 NY525—2012 标准,该研究使用的猪粪堆肥中的重金属含量也均低于标准规定的限值(表 2)。

研究结果表明,不同的施肥处理土壤中重金属的积累存在一定差异(表 2)。相比 CK 处理,有机肥施用在一定程度上增加了土壤中重金属的含量,且

高量有机肥显著增加其含量,尤其是 Cu。相比 CK 处理,有机肥处理土壤中 Cu 含量相比试验前有明显提高, $M_1$ , $M_2$  和  $M_3$  处理分别增加了 13.5%,27.1% 和 45.9%。与各重金属的二级标准 GB15618-1995 比较,施用猪粪有机肥后土壤中的重金属元素 Cd, Pb,As,Hg,Cr 及微量元素 Cu 的含量也均在安全标准以内。

表 2 不同处理对土壤重金属含量的影响

项次		重金属含量/( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )					
		Cd	Pb	As	Hg	Cr	Cu
有机肥	猪粪肥	0.16	3.97	0.99	0.11	33.37	29.31
参考标准	NY525-2012	3	50	15	2	150	—
	试验前	0.118	18.99	9.06	0.12	61.88	15.76
土壤	CK	$0.129 \pm 0.005\text{b}$	$18.34 \pm 0.056\text{b}$	$10.05 \pm 0.286\text{b}$	$0.121 \pm 0.005\text{a}$	$60.70 \pm 0.132\text{c}$	$14.84 \pm 9.43\text{d}$
	$M_1$	$0.143 \pm 0.012\text{a}$	$19.36 \pm 0.061\text{ab}$	$11.07 \pm 0.276\text{b}$	$0.121 \pm 0.006\text{a}$	$63.03 \pm 0.144\text{bc}$	$16.85 \pm 10.09\text{c}$
	$M_2$	$0.144 \pm 0.013\text{ab}$	$19.80 \pm 0.067\text{ab}$	$11.55 \pm 0.296\text{ab}$	$0.122 \pm 0.006\text{a}$	$64.09 \pm 0.155\text{ab}$	$18.86 \pm 10.30\text{b}$
	$M_3$	$0.156 \pm 0.015\text{a}$	$20.73 \pm 0.077\text{a}$	$12.21 \pm 0.302\text{a}$	$0.123 \pm 0.006\text{a}$	$64.93 \pm 0.153\text{a}$	$21.65 \pm 12.30\text{a}$
参考标准	GB 15618-1995	0.6	350	25	1	250	100

注:“—”表示无此元素含量标准;每列不同的小写字母表示不同处理间差异显著( $p < 0.05$ )。

2.4 施用有机肥对蔬菜产量和蔬菜重金属积累的影响

从表 3 中可以看出, $M_1$  处理的每茬蔬菜产量都高于其他处理。蔬菜总产量呈现: $M_1 > \text{CK} > M_2 > M_3$ , $M_1$  处理的产量高于常规化肥处理 21.2 %。可见

低量施用有机肥蔬菜的产量得到显著增加,而高量有机肥对蔬菜产量影响不大,且蔬菜产量随有机肥施用量的增加而下降,尤其是  $M_3$  处理,茼蒿的产量相比常规化肥处理降低了 11.2 %。在试验结束后测定了



蔬菜中重金属含量,由表4可知,有机肥处理均在一定程度上增加了蔬菜中重金属的含量,尤其是高量有机肥的施用。相比CK处理,蔬菜中Cd、Pb、As、Hg、Cr和Cu的含量在M<sub>3</sub>处理下分别增加了25.0%、37.5%、5.59%、20.0%、15.9%和30.4%。但各处理蔬菜中重金属Cd、Pb、As、Hg含量仍在无公害蔬菜质量要求(GB18406.1-2001)的安全标准以内。

表4 不同处理对蔬菜重金属含量的影响

处理	重金属含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )					
	Cd	Pb	As	Hg	Cr	Cu
CK	0.012±0.000c	0.056±0.004c	0.286±0.008ab	0.005±0.000b	0.132±0.007b	9.43±0.476b
M <sub>1</sub>	0.012±0.000bc	0.061±0.001bc	0.276±0.012b	0.006±0.000a	0.144±0.005a	10.09±0.593b
M <sub>2</sub>	0.013±0.000b	0.067±0.004b	0.296±0.013a	0.006±0.000a	0.155±0.006a	10.30±0.778b
M <sub>3</sub>	0.015±0.001a	0.077±0.004a	0.302±0.004a	0.006±0.000a	0.153±0.005a	12.30±0.502a
参考标准 GB18406.1-2001	0.05	0.2	0.5	0.01	—	—

注:“—”表示无此元素含量标准;每列不同的小写字母表示不同处理间差异显著( $p<0.05$ )。

### 3 讨论

畜禽粪便中蕴含充足的有机质和植物所需的养分,是农作物生产的重要肥料来源,但畜禽有机肥在农田长期施用存在一定的土壤污染风险。已有研究表明,化肥或有机肥施用过量都会造成土壤NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的大量累积<sup>[19]</sup>,一般认为畜禽粪便更容易造成矿质氮的累积<sup>[20]</sup>。本研究中,不同处理土壤NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量均表现为从表层到深层逐渐递减的特征,这是由于各处理折氮施用量完全相同,而只有有机肥的用量不同,加上有机肥移动性差,其矿化作用主要发生在土壤表层<sup>[21]</sup>,因此增施有机肥对表层NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的影响较大,对下层影响较小。但是,施入土壤中的有机肥越多会使土壤表层的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N累积越多,可能会加大表层NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N向下层土壤迁移的风险<sup>[22]</sup>。本研究中高量有机肥的投入会引起上层土层轻微的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N淋溶,但淋溶程度较低,深层土层各处理土壤NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N含量也均低于土壤本底值,说明该菜地施用有机肥后短期内未造成NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N在土壤中的淋溶。

施无机肥虽然也会增加速效磷含量,但增加幅度较有机肥缓慢。施有机肥可显著增加速效磷含量,随有机肥施用量的增加土壤表层速效磷含量也随之增加,这可能是由于粪便本身含有较多活性和中等活性的有机磷,可以减少土壤对磷的吸附并增加对磷的解吸<sup>[23]</sup>,通过还原、酸溶、络合溶解等过程促进溶磷微生物的增殖,将土壤中难利用的磷活化有效磷<sup>[24]</sup>。再者,有机肥分解过程还可以通过其阴离子的取代和竞争吸附进而改变土壤对磷的吸附与解吸<sup>[25]</sup>。土壤中速效磷含量随土壤剖面逐渐降低,但对上层土壤的影响比深层显著,这可能是由于植物的根系集中在耕层和有机酸分泌较多<sup>[23]</sup>,土壤经过多年耕作,促进了

表3 不同处理对蔬菜产量的影响

处理	收获时间			总产量/ (10 <sup>3</sup> kg·hm <sup>-2</sup> )
	7月10日	8月28日	6月21日	
CK	6.00±0.87b	5.51±0.37a	5.20±0.76ab	16.71±1.10b
M <sub>1</sub>	7.26±0.71a	6.92±1.74a	6.07±0.87a	20.25±1.07a
M <sub>2</sub>	5.79±0.58b	6.37±0.52a	4.25±0.64b	16.42±0.71bc
M <sub>3</sub>	5.26±0.36b	5.16±0.51a	4.42±0.61b	14.83±0.52c

注:每列不同的小写字母表示不同处理间差异显著( $p<0.05$ )。

耗氧微生物和解磷菌的增殖,提高表层土壤速效磷含量等<sup>[26-27]</sup>。土壤速效磷含量在本研究的土壤剖面具有迁移行为,随着深度的增加其含量逐渐降低,但本研究深层土壤磷的含量均低于磷污染临界值,故而不存在磷淋溶风险。此外,施用有机肥对表层土壤水溶性磷的含量有显著增加的作用(图3),水溶性磷可以增加土壤磷的淋洗风险,且水溶性磷及其在全磷中的比例随着有机肥的添加而显著升高,增加土壤磷饱和度,极大地提高土壤中磷素的移动性<sup>[28]</sup>。本研究发现,高量施用有机肥提高了表层土壤水溶性磷含量(图3),表层土壤磷污染风险较高但磷素淋洗风险较低,而低量有机肥的施用可以维持表层土壤速效磷含量的同时降低了磷素污染和淋洗风险。

有机肥的施用作为重金属积累最主要的因素之一,在蔬菜种植过程中畜禽粪便的添加无可避免会增加重金属污染的风险。本研究中施用的猪粪堆肥中的重金属含量符合中国有机肥行业标准NY525-2012。在本研究短期试验内,有机肥施用后土壤中各重金属的含量均存在一定程度的增加,且随有机肥施用量的增加而显著增加,尤其是Cu(表2)。研究表明,当有机肥被单独作为蔬菜生产的肥料来源时,土壤及蔬菜中重金属的含量明显升高,尤其是有机肥中含量略高的元素<sup>[29]</sup>。此外,本研究茼蒿中重金属Pb、Cd、Cu、Cr随有机肥施用量的增加而增加,M<sub>3</sub>的含量最高。刘全东<sup>[16]</sup>通过盆栽模拟试验和田间长期定位试验系统地研究了土壤—蔬菜体系中重金属的积累和迁移,结果表明,土壤中重金属元素的有效性与有机肥施用量呈极显著正相关,有机肥的施用明显提高了重金属元素从土壤向蔬菜的迁移。化肥减量与适量猪粪堆肥配合施用的处理(M<sub>1</sub>)不仅蔬菜产量最高,且土壤和蔬菜中的重金属积累相对较低,各处理的蔬菜中重金属含量也均

低于无公害蔬菜的质量要求(GB 18406.1-2001)(表2)。该结果与黄新灿等<sup>[29]</sup>研究结论一致,高量猪粪堆肥连续施用三年后土壤中Cu, Zn, Pb, Cd, Hg和As含量显著增加,蔬菜中Cu, Zn, Pb, Cd, Hg和As含量均显著高于对照处理,但减量化肥和少量猪粪堆肥配合施用的蔬菜产品中重金属含量与对照处理相比差异不显著。由此可见,大量施用有机肥的情况下可在较短时间内就可以使微量元素含量达到较高水平,而适量地施用有机肥既可以提高作物产量也不会对土壤和作物造成重金属污染的风险。因此,在农田中施用有机肥时要严格控制有机肥的施用量。然而本研究试验周期较短且蔬菜种植只有一个生长季,长期施用有机肥是否会对深层土壤或地下水造成一定污染风险,需要长期试验进行进一步的研究。

## 4 结论

高量有机肥的投入会引起上层土壤轻微的 $\text{NO}_3^-$ -N淋溶,短期内淋溶程度较低;过量施有机肥会不同程度地增加土壤表层速效磷和水溶性磷的含量,对深层土壤没有显著影响,不存在磷淋溶风险;施用有机肥后土壤和蔬菜中的重金属元素含量均在安全标准以内,没有对土壤污染和蔬菜品质造成影响;低量施用有机肥可以显著增加蔬菜的产量。因此,在菜地种植过程中建议重视化肥与适量有机肥配施,均衡考虑蔬菜产量和土壤污染防治。

### 参考文献:

- [1] 王孝忠.我国蔬菜生产的环境代价、减排潜力与调控途径[D].北京:中国农业大学,2018.
- [2] 王丽英,张彦才,陈丽莉,等.不同种类畜禽粪肥与化肥配施对设施番茄产量、品质和土壤养分的影响[J].华北农学报,2011,26(S2):152-156.
- [3] 周建斌,翟丙年,陈竹君,等.设施栽培菜地土壤养分的空间累积及其潜在的环境效应[J].农业环境科学学报,2004,23(2):332-335.
- [4] 王立河,赵喜茹,王喜枝,等.有机肥与氮肥配施对日光温室黄瓜和土壤硝酸盐含量的影响[J].土壤通报,2007,38(3):472-476.
- [5] 陈肖如,李晓欣,胡春胜,等.华北平原农田关键带硝态氮存储与淋失量研究[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(9):1546-1557.
- [6] 井永苹,李彦,张英鹏,等.不同有机肥用量对土壤硝态氮含量及氮素利用率的影响[J].山东农业科学,2016,48(12):95-100.
- [7] 林葆.化肥与无公害农业[M].北京:中国农业出版社,2003.
- [8] 姚丽贤,周修冲.有机肥对环境的影响及预防研究[J].中国生态农业学报,2005,13(2):113-115.
- [9] 刘勤,张斌,谢育平,等.施用鸡粪稻田土壤氮磷养分淋洗特征研究[J].中国生态农业学报,2008,16(1):91-95.
- [10] 王彩绒,胡正义,杨林章,等.太湖典型地区蔬菜地土壤磷素淋失风险[J].环境科学学报,2005,25(1):76-80.
- [11] 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):116-123.
- [12] 董占荣,陈一定,林咸永,等.杭州市郊规模化养殖场猪粪的重金属含量及其形态[J].浙江农业学报,2008,20(1):35-39.
- [13] 黄玉溢,刘斌,陈桂芬,等.规模化养殖场猪配合饲料和粪便中重金属含量研究[J].广西农业科学,2007,38(5):544-546.
- [14] 姜萍,金盛杨,郝秀珍,等.重金属在猪饲料—粪便—土壤—蔬菜中的分布特征研究[J].农业环境科学学报,2010,5(29):942-947.
- [15] 赵国华,潘先庭,沈贻芸,等.不同有机物料施用年限对设施菜地土壤养分和重金属含量的影响[J].山西农业大学学报:自然科学版,2015,35(5):509-513.
- [16] 刘全东.有机肥源重金属Cu, Zn元素在土壤—蔬菜体系中累积迁移的研究[D].南宁:广西大学,2014.
- [17] 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,2012,39(16):95-97.
- [18] 席雪琴,孙本华,陈勇,等.楼土区作物和土壤淋溶磷临界值研究及推荐施磷建议[J].中国土壤与肥料,2015(6):34-40.
- [19] 寇长林,骆晓声,巨晓棠.优化施氮对设施番茄土壤硝态氮残留及土壤氮平衡的影响[J].植物营养与肥料学报,2021,27(5):837-848.
- [20] 杨世琦,王永生,谢晓军,等.宁夏引黄灌区猪粪还田对稻作土壤硝态氮淋失的影响[J].生态学报,2014,34(16):4572-4579.
- [21] 张帆,王晨冰,牛茹萱,等.6种类型有机肥的矿化特性研究[J].甘肃农业科技,2017(8):29-33.
- [22] 王宝档,刘家明,董作为,等.有机肥对涂园土壤的改良效果及施用技术[J].中国土壤与肥料,2011(3):72-77.
- [23] 刘晓玲,宋照亮,单胜道,等.畜禽粪肥施加对嘉兴水稻土总磷、有机磷和有效磷分布的影响[J].浙江农林大学学报,2011,28(1):33-39.
- [24] 王云丽.钝化剂筛选及其对设施菜地镉污染土壤钝化效果研究[D].河北保定:河北大学,2018.
- [25] 叶会财,李大明,柳开楼,等.不同有机培肥方式对红壤性水稻土磷素的影响[J].土壤通报,2019,50(2):374-380.
- [26] 王学东,李贵宝,王殿武,等.湿地土壤对苯酚的净化能力及其影响因素研究[J].水土保持学报,2005,18(4):135-138.
- [27] 宋春.不同土地利用方式下黑土磷素肥力特征的研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2007.
- [28] 丁效东,张士荣,娄金华,等.有机肥与磷肥配施对滨海盐渍化土壤磷素淋洗风险的影响[J].生态环境学报,2016,25(7):1169-1173.
- [29] 黄新灿,章明奎.长期施用猪粪源有机肥对蔬菜—土壤系统重金属积累的影响[J].农学报,2016,6(4):30-35.