

肉鸭粪肥替代化肥对小白菜及土壤环境的影响

薛鹏英, 晏婷, 吴雨清, 张哲睿, 宋曼, 朱志平

引用本文:

薛鹏英, 晏婷, 吴雨清, 张哲睿, 宋曼, 朱志平. 肉鸭粪肥替代化肥对小白菜及土壤环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(4): 947-954.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0438>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光合细菌和生物炭对污染土壤中铬的稳定化效果及小白菜生长的影响

任晓斌, 白红娟, 卫燕红, 马瑞, 贾万利, 杨官娥

农业环境科学学报. 2021, 40(10): 2141-2149 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0162>

鸡粪生物炭对土壤铜和锌形态及植物吸收的影响

张艺腾, 范禹博, 徐笑天, 张秀芳, 李明堂

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2514-2521 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0390>

改良剂对镉污染土壤上小白菜镉积累转运及生理特性的影响

李松, 孙向阳, 李素艳, 马其雪, 刘源鑫, 周文洁

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1229-1235 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1182>

木炭施用对镉污染土壤小白菜生长及镉吸收的影响

罗洋, 高晋, 罗绪强, 李仪

农业环境科学学报. 2018, 37(8): 1676-1682 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0042>

猪粪中铜、锌与等量水溶性盐对两种叶类蔬菜的植物有效性比较

颜蒙蒙, 贾武霞, 苏世鸣, 王亚男, 王济, 曾希柏, 白玲玉

农业环境科学学报. 2018, 37(2): 223-231 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1052>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

薛鹏英, 晏婷, 吴雨清, 等. 肉鸭粪肥替代化肥对小白菜及土壤环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(4): 947–954.

XUE P Y, YAN T, WU Y Q, et al. Effects of partial replacement of chemical fertilizer by different treatments of meat duck manure on Chinese cabbage and soil environment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(4): 947–954.



开放科学 OSID

肉鸭粪肥替代化肥对小白菜及土壤环境的影响

薛鹏英¹, 晏婷², 吴雨清¹, 张哲睿¹, 宋曼¹, 朱志平^{1*}

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 农业农村部设施农业节能与废弃物处理重点实验室, 北京 100081; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要:为探究肉鸭粪肥部分替代化肥对小白菜品质及土壤环境的影响,采用盆栽试验的方法,研究了有氧堆肥、异位发酵床、黑膜厌氧塘3种方式腐熟的肉鸭粪肥等氮量替代30%、50%和70%化肥下,小白菜产量、品质及土壤环境的变化情况。结果表明:在38 d的生长期,配施肉鸭粪肥可显著提高小白菜可溶性糖以及可溶性蛋白的含量,黑膜厌氧塘处理的鸭粪肥30%替代化肥对提升小白菜鲜质量,菜叶中可溶性糖和可溶性蛋白效果最优;肉鸭粪肥部分替代化肥处理相较纯化肥处理可使小白菜中硝酸盐含量下降31.4%~41.1%。配施肉鸭粪肥30%替代化肥处理,小白菜地上部重金属As、Cr、Cd的含量均未超出食品安全相关标准的安全限值;而当有氧堆肥处理后的肉鸭粪肥替代比例为50%和70%时,菜叶中Pb含量超标。在本试验条件下各肉鸭粪肥替代化肥处理均未增加土壤重金属污染等级,但增加了土壤中抗生素的种类,且主要以氟甲砜霉素为主。研究表明,肉鸭粪肥等氮量部分替代化学氮肥施用有助于增加小白菜产量,提升小白菜中可溶性糖和可溶性蛋白含量,降低其硝酸盐含量,对小白菜和土壤中重金属的影响较小,但会增加土壤中抗生素的种类,综合结果表明黑膜厌氧塘处理的肉鸭粪肥30%替代化肥施用效果最佳。

关键词:肉鸭粪肥;小白菜品质;土壤环境;重金属;抗生素

中图分类号:S634.3 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)04-0947-08 doi:10.11654/jaes.2023-0438

Effects of partial replacement of chemical fertilizer by different treatments of meat duck manure on Chinese cabbage and soil environment

XUE Pengying¹, YAN Ting², WU Yuqing¹, ZHANG Zherui¹, SONG Man¹, ZHU Zhiping^{1*}

(1. Key Laboratory of Energy Conservation and Waste Management in Agricultural Structures (MOA), Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The aim of this study is to investigate the effects of using duck manure fertilizer instead of chemical fertilizer on the quality of Chinese cabbage and the soil environment. A pot experiment was conducted to study the changes in the yield and quality of Chinese cabbage and the soil environment under the effect of replacing 30%, 50%, and 70% of chemical fertilisers with the nitrogen equivalent of meat duck manure rotted using three treatments: aerobic composting, ectopic fermentation bed, and black film anaerobic pond treatments. The results showed that, during a 38-d growth period, the use of duck manure fertilizer significantly increased the content of soluble sugar and soluble protein in the Chinese cabbage. The black film anaerobic pond treatment with 30% substitution of duck manure fertilizer was the most effective in increasing the fresh weight of the Chinese cabbage as well as the contents of soluble sugar and soluble protein in the leaves. Compared with the pure chemical fertilizer treatment, the use of partially substituted duck manure fertilizer reduced the nitrate

收稿日期:2023-06-05 录用日期:2023-07-31

作者简介:薛鹏英(1996—),女,山东青岛人,硕士,主要从事畜禽粪污资源化处理研究。E-mail:xuepengying22vic@163.com

*通信作者:朱志平 E-mail:zhuzhiping@caas.cn

基金项目:财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系项目(CARS-42-23)

Project supported: Project for Ministry of Finance and Ministry of Agriculture and Rural Affairs “National Modern Agricultural Industry Technology System” (CARS-42-23)

content in the Chinese cabbage by 31.4% to 41.1%. When 30% of duck manure fertilizer was substituted for chemical fertilizer, the levels of heavy metals As, Cr, and Cd in the aerial part of the Chinese cabbage did not exceed the safety limits of relevant food safety standards. However, when the proportions of duck manure fertilizer substituted after anaerobic composting treatment were 50% and 70%, the Pb content in the leaves exceeded the standards. Under the experimental conditions, the use of partially substituted duck manure fertilizer did not increase the heavy metal contamination level of the soil, but it increased the diversity of antibiotics, mainly florfenicol, in the soil. The results showed that the use of partially substituted duck manure fertilizer was beneficial for increasing the yield of Chinese cabbage, improving the contents of soluble sugar and soluble protein in Chinese cabbage, and reducing the nitrate content, and it had little effect on the content of heavy metals in the Chinese cabbage and soil. However, it increased the diversity of antibiotics in the soil. Overall, the use of the black film anaerobic pond treatment with 30% substitution of duck manure fertilizer is the best option.

Keywords: duck manure fertilizer; cabbage quality; soil environment; heavy metal; antibiotic

畜禽粪污合理的资源化利用是发展绿色循环农业经济模式、确保我国农业可持续发展的重要策略^[1]。肉鸭粪便的成分十分复杂,含有多种污染物,包括有机物、重金属和抗生素,且具有较高的含水率,如果肉鸭粪肥没有被及时有效地处理,将对生态环境产生恶劣的影响,同时资源也会被大量浪费^[2]。目前,鸭粪的处理方式主要有异位发酵床处理、好氧堆肥处理、黑膜厌氧塘处理等,通过处理达到还田标准,促进养分循环利用。

国内外进行了很多畜禽粪肥同化肥混合施加对蔬菜质量影响的相关探究,大多研究人员认为在适量施氮的条件下,有机肥部分替代化肥施用到菜地,不仅可以使蔬菜中硝酸盐的含量明显降低,还能够使蔬菜的品质在一定程度上得到改善^[3-6]。鸭粪经过无害化处理变成可施用到土壤的有机粪肥,除了保留有大量植物生长所必需的N、P、K等养分元素外,还含有很多可以被土壤中微生物利用的有机质^[7]。肉鸭粪肥合理替代化肥施用到土壤中,也可以很好地增加土壤中对作物有利的微生物的种类,丰富土壤构成并提升土壤肥力,从而使蔬菜的产量和品质得到提升。高杰云等^[8]探究了沼肥和化肥不同配比处理对设施土壤氮磷养分和重金属累积及蔬菜产量的影响,研究结果显示相较其他粪肥替代比例,沼肥全部替代较其他替代方式污染更严重。但不同研究者在研究有机氮替代比例对作物产量的影响时其结果有些不同,这可能与粪肥原料种类、蔬菜品种、土壤肥力、气候环境甚至试验设计等有较大的关系^[9]。同时,通过粪肥施加到土壤中的重金属和抗生素等有害物质会通过食物链进入蔬菜,并通过水平转移向人体组织内扩散,相较其他作物,蔬菜受到的影响更大,因此施用粪肥具有潜在的健康威胁^[10-12]。

合理的畜禽粪肥替代化肥的施用方式对提高蔬菜产量、改善蔬菜品质,以及减少环境污染具有十分

重要的意义。而目前,探究肉鸭粪肥腐熟处理还田利用对蔬菜影响的研究还相对较少。本试验通过施加肉鸭粪肥种植小白菜,探究肉鸭粪污经不同方式处理腐熟后按不同比例替代化肥施用,对小白菜产量和品质及土壤环境的影响,以期为肉鸭粪污高质量还田利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

盆栽土壤从中国农业科学院南口中试试验基地收集,为表面的耕层褐土。将土壤放在通风阴凉处风干,用2 mm筛网将土壤中体积较大的残留物去除后备用。试验土壤的性质见表1。试验所用的经异位发酵床、好氧堆肥和黑膜厌氧塘3种方式腐熟处理的肉鸭粪肥均来自山东某大型肉鸭养殖企业,其基本性质见表2。无机复合肥料的N:P₂O₅:K₂O为16:16:16,其中氮养分含量为16%。供试小白菜品种为四季小白菜。

1.2 试验设计

采用盆栽试验,使用3种腐熟处理方式的肉鸭粪

表1 供试土壤基本性质

Table 1 Basic properties of tested soil

土壤 Soil	pH	有机质 OM/ (g·kg ⁻¹)	全氮 TN/ (g·kg ⁻¹)	硝态氮 NO ₃ -N/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷 AP/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 AK/ (mg·kg ⁻¹)
褐土	7.3	12.2	0.8	18.4	66.2	255.0

表2 供试肉鸭粪肥基本性质

Table 2 Basic properties of duck manure

处理 Treatment	pH	有机质 OM/(g·kg ⁻¹)	含水率 Moisture content/(%)	全氮 TN/(g·kg ⁻¹)
黑膜厌氧塘	6.11±0.05	—	—	6.60±0.02
好氧堆肥	7.72±0.03	34.71±1.13	52.31±0.42	8.90±0.01
异位发酵床	7.21±0.52	35.85±0.93	62.77±0.23	4.30±0.12

肥:异位发酵床鸭粪处理、好氧堆肥鸭粪处理、黑膜厌氧塘鸭粪处理。调节肉鸭粪肥和化肥的比例,按照各自氮含量的摄入占比确定肉鸭粪肥和化肥的施加量,在等氮平衡条件下(各处理每千克土壤施氮量为0.24 g),共设5类处理,分别为CK处理(不施肥)、CF处理(100%化肥氮施用)、M30F70处理(30%肉鸭粪肥+70%化肥氮配施)、M50F50处理(50%肉鸭粪肥+50%化肥氮配施)、M70F30处理(70%肉鸭粪肥+30%化肥氮配施),换算后的施肥量详见表3。各处理重复3次,每盆装土2 kg,采用完全随机区组排列方式。加水调节土壤含水量为70%,每盆播种20颗小白菜种子,出苗1周后间苗,每盆保留2株小白菜苗。通过质量平衡的方法补给水分,使盆内土壤持水量维持在60%~70%。小白菜生长过程中每日观测并拍照记录其生长情况,直至生长期达到38 d,收获小白菜并随机采集土壤样品进行检测分析。

表3 不同处理施肥量

Table 3 Fertilization amount of different treatments

处理 Treatment	化肥 Chemical fertilizer/g	肉鸭粪肥 Duck manure
CK	0	0
CF	3	0
T1(好氧堆肥 M30F70)	2.1	30.0 g
T2(好氧堆肥 M50F50)	1.5	50.0 g
T3(好氧堆肥 M70F30)	0.9	70.0 g
T4(异位发酵床 M30F70)	2.1	60.0 g
T5(异位发酵床 M50F50)	1.5	100.0 g
T6(异位发酵床 M70F30)	0.9	140.0 g
T7(黑膜厌氧塘 M30F70)	2.1	18.0 mL
T8(黑膜厌氧塘 M50F50)	1.5	30.0 mL
T9(黑膜厌氧塘 M70F30)	0.9	42.0 mL

1.3 指标测定

1.3.1 小白菜理化性质

同时收获不同处理的小白菜,并随机摘取各处理的小白菜同一叶层的4片叶子,叶子用液氮迅速冷冻后放置到-80℃的超低温冰箱中保存备用。

小白菜鲜质量:每个处理取3棵长势较为一致的小白菜,将根部的泥土清理干净后,用电子天平(0.01 g)称质量后取均值并记录。

小白菜重金属含量:Cu、Zn、Pb、Cd、Cr采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消解-原子吸收分光光度法测定,As采用原子荧光光度法测定^[13]。

小白菜品质:可溶性糖含量采用苯酚-硫酸法测

定;可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝法测定;硝酸盐含量采用Cataldo改进的方法测定^[14-16]。

1.3.2 土壤理化性质

在各盆中按五点取样法取样,每盆土样多点混合后共300 g左右,用于土壤相关指标分析。

土壤pH值采用酸度计(水土比为5:1)测定;土壤有机质采用重铬酸钾法测定;土样经 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaHCO}_3$ 浸提后,用UV-2500紫外分光光度计测定有效磷含量;全氮采用半微量开氏法测定;速效钾采用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NH}_4\text{OAc}$ 浸提,火焰光度计测定;土壤中Cu、Zn、Pb、Cd、Cr的测定方法同1.3.1;抗生素采用液相色谱-串联质谱法测定^[17]。

1.4 土壤重金属评价方法

本研究以《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)的风险筛选值为标准,采用内梅罗指数法评价肉鸭粪肥中的重金属污染物对土壤环境的影响。

单项指数法计算公式: $P_i=C_i/S_i$

综合污染指数计算公式: $P_{\text{综}}=[(P_{\text{ave}}^2+P_{\text{imax}}^2)/2]^{1/2}$

式中: P_i 是重金属*i*的污染指数; C_i 为实际值; S_i 为标准中的限值; $P_{\text{综}}$ 是综合污染指数; P_{imax} 为各处理重金属污染物单因子污染指数中的最大值; P_{ave} 为单因子污染指数平均值。

$P_i\leq 1$ 表示土壤未被施加的畜禽粪肥中的重金属污染,处于非污染水平; $P_i>1$ 则表示畜禽粪肥的施加造成了土壤某重金属的污染。 $P_{\text{综}}\leq 0.7$ 时,土壤综合污染等级为1级,即清洁安全等级; $P_{\text{综}}>0.7$ 时,土壤重金属的污染等级将增加。

1.5 数据处理

本研究使用Origin 2022软件进行数据处理并作图,试验结果采用平均值±标准差的形式表示。采用SPSS Statistics 19.0分析不同比例下鸭粪肥替代化肥施用后的土壤pH、养分、重金属、抗生素以及小白菜品质等试验数据之间的显著性和相关性。

2 结果与分析

2.1 不同处理对小白菜产量和品质的影响

如图1a所示,与CK处理相比,T1~T9配施鸭粪肥处理的白菜单株鲜质量增加了9.2%~232.6%。其中,对于配施异位发酵床和好氧堆肥腐熟鸭粪肥的处理,均在粪肥替代量为30%时,小白菜单株鲜质量达到最大值且优于CF处理,之后随替代量的增加单株鲜质量呈现逐渐下降的趋势;配施黑膜厌氧塘腐熟肉鸭

粪肥处理比其他处理的小白菜单株鲜质量增加更明显,且在粪肥替代量为50%时,小白菜单株鲜质量达到最大值。相较CK处理和CF处理,肉鸭粪肥部分替代化肥施用可显著提高小白菜叶片中可溶性糖、可溶性蛋白的含量。其中,配施黑膜厌氧塘处理后的粪肥在30%替代化肥时菜叶中可溶性糖和可溶性蛋白含量最高,分别为 $1.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $11.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图1b和图1c)。相较CF处理,肉鸭粪肥部分替代化肥施用还可显著降低小白菜叶片中31.4%~41.1%的硝酸盐含量(图1d)。综合比较小白菜的产量和品质,配施肉鸭粪肥替代比例为30%~50%较优,且施用黑膜厌氧塘腐熟处理的肉鸭粪肥效果最好。

2.2 不同处理对小白菜重金属含量的影响

各处理小白菜地上部重金属含量如表4所示,随着肉鸭粪肥配施量增加,小白菜地上部重金属Zn、Pb、Cd、As的含量也增加,且均高于CK处理。相较CK处理,T1~T9处理的小白菜中Zn的含量提高了61.2%~179.6%,且好氧堆肥处理(T1~T3)的小白菜对Zn的吸收较其他处理方式高。除了施加50%好氧堆肥鸭粪肥外其余处理均未检测出重金属Cu。施加鸭

粪肥处理的小白菜中As的含量较CK处理提高了2.9%~13.4%,且好氧堆肥处理较其他方式高。小白菜的地上部中Cd、Cr、As的含量均未超过《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)的限值(Cd $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Cr $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、As $0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);而在好氧堆肥处理T1和T2中Pb含量分别为 0.254 、 $0.268 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,超出了污染物限值($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。结果表明,在本试验条件下不同方式腐熟的肉鸭粪肥部分替代化肥,小白菜的地上部中As、Cr、Cd的含量均在食品安全限值以内,但施加好氧堆肥腐熟的肉鸭粪肥对小白菜重金属的吸收影响较大,尤其是当好氧堆肥处理后的肉鸭粪肥替代比例为50%和70%时,小白菜Pb含量存在超标的风险。

2.3 不同处理对土壤重金属含量的影响

从表5可以看出,各处理土壤中重金属成分主要以Zn和Cr为主,施加好氧堆肥腐熟肉鸭粪肥的土壤中重金属Zn、Cr增幅最为明显,最高分别达到16%和5%。各处理土壤中重金属含量最低的是Cd。Cd污染指数较其他重金属高(图2),污染指数较低的是Pb,各处理土壤中各重金属含量均未超出土壤环境

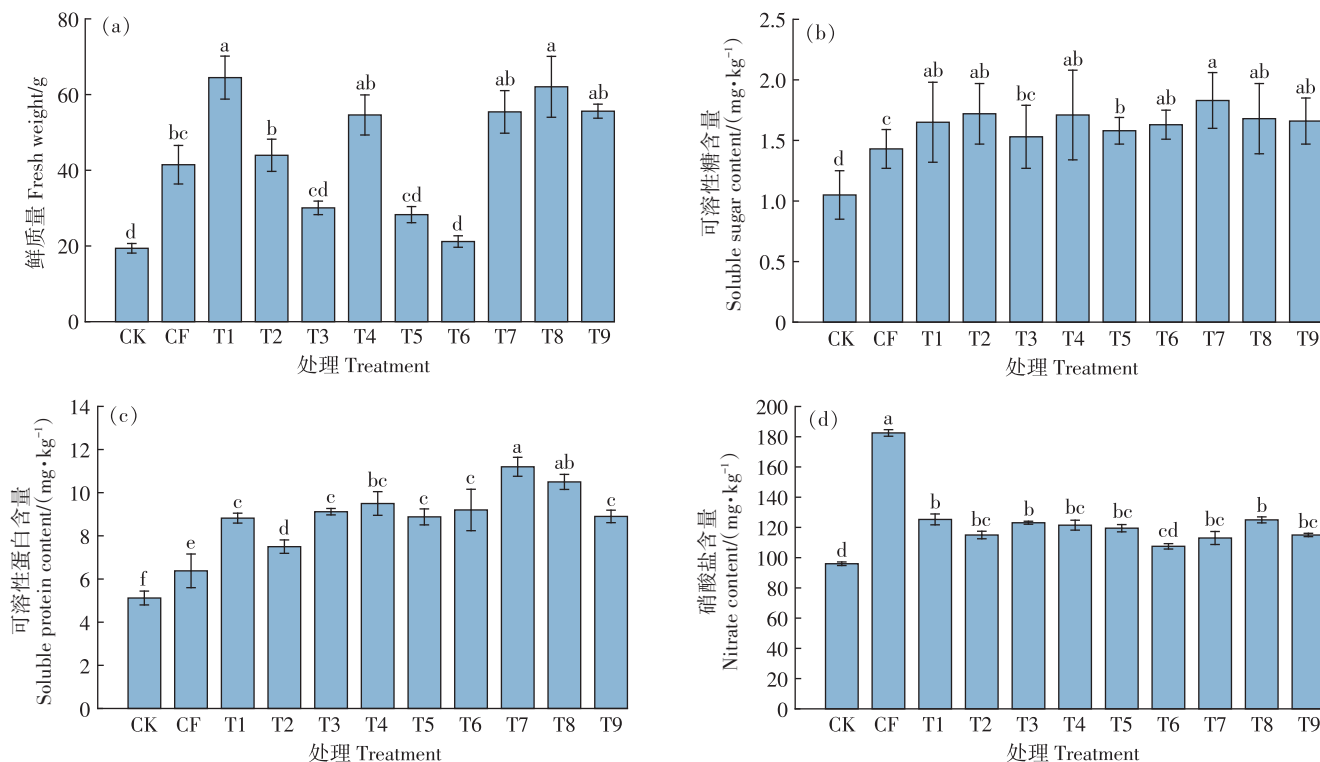


图1 鸭粪部分替代化肥施用对小白菜鲜质量及品质的影响

Figure 1 Effects of duck manure partially replacing chemical fertilizer on the quality and fresh weight of Chinese cabbage

表 4 白菜地上部重金属含量(mg·kg⁻¹)

Table 4 Content of heavy metals in shoot of Chinese cabbage(mg·kg⁻¹)

处理 Treatment	铜 Cu	锌 Zn	砷 As	铅 Pb	镉 Cd	铬 Cr
CK	—	1.962±0.111	0.010±0.043	—	0.009±0.011	—
CF	—	2.151±0.062	0.019±0.021	0.117±0.031	0.013±0.044	0.194±0.156
T1	—	4.042±0.244	0.051±0.038	0.254±0.120	0.020±0.025	0.462±0.112
T2	0.618±0.235	4.563±0.092	0.108±0.042	0.268±0.024	0.023±0.051	0.505±0.021
T3	—	5.482±0.148	0.124±0.023	0.059±0.041	0.026±0.023	—
T4	—	3.161±0.062	0.032±0.092	0.056±0.093	0.021±0.065	—
T5	—	3.442±0.076	0.044±0.028	0.160±0.132	0.023±0.031	0.530±0.073
T6	—	4.022±0.224	0.134±0.114	—	0.032±0.042	—
T7	—	3.923±0.053	0.029±0.025	—	0.017±0.028	—
T8	—	3.931±0.082	0.030±0.043	0.051±0.052	0.025±0.081	0.333±0.044
T9	—	4.153±0.195	0.065±0.072	0.162±0.101	0.027±0.075	—

注：“—”为未检测出。下同。
Note: “—” is not detected. The same below.

表 5 不同处理土壤中重金属含量

Table 5 Comparison of the heavy metal content among different treatment

处理 Treatment	铜 Cu/(mg·kg ⁻¹)	锌 Zn/(mg·kg ⁻¹)	砷 As/(mg·kg ⁻¹)	铅 Pb/(mg·kg ⁻¹)	镉 Cd/(mg·kg ⁻¹)	铬 Cr/(mg·kg ⁻¹)	P _综
CK	24.15±0.41	74.23±0.11	8.13±0.11	28.15±0.11	0.25±0.01	59.87±0.11	—
CF	23.07±0.12	69.85±0.06	7.98±0.06	27.14±0.43	0.22±0.04	62.13±0.15	—
T1	23.96±0.43	75.23±0.24	7.12±0.23	27.21±0.12	0.22±0.02	63.24±0.24	0.32
T2	22.11±0.23	74.08±0.69	6.86±0.43	25.33±0.62	0.21±0.05	63.36±0.02	0.30
T3	22.04±0.31	81.13±0.14	7.19±0.17	28.14±0.34	0.20±0.02	63.07±0.23	0.30
T4	22.20±0.68	70.08±0.56	6.76±0.52	27.27±0.59	0.23±0.06	60.24±0.51	0.32
T5	24.12±0.45	73.31±0.67	6.90±0.41	30.19±0.67	0.21±0.03	61.14±0.07	0.31
T6	21.93±0.21	75.20±0.22	7.78±0.28	29.34±0.51	0.24±0.04	60.89±0.51	0.34
T7	23.02±0.51	71.15±0.45	7.20±0.31	28.22±0.31	0.20±0.02	61.08±0.23	0.29
T8	22.03±0.26	70.11±0.78	6.74±0.09	27.14±0.65	0.18±0.08	57.32±0.64	0.27
T9	21.98±0.11	71.09±0.89	6.97±0.25	29.33±0.10	0.22±0.07	60.48±0.61	0.31

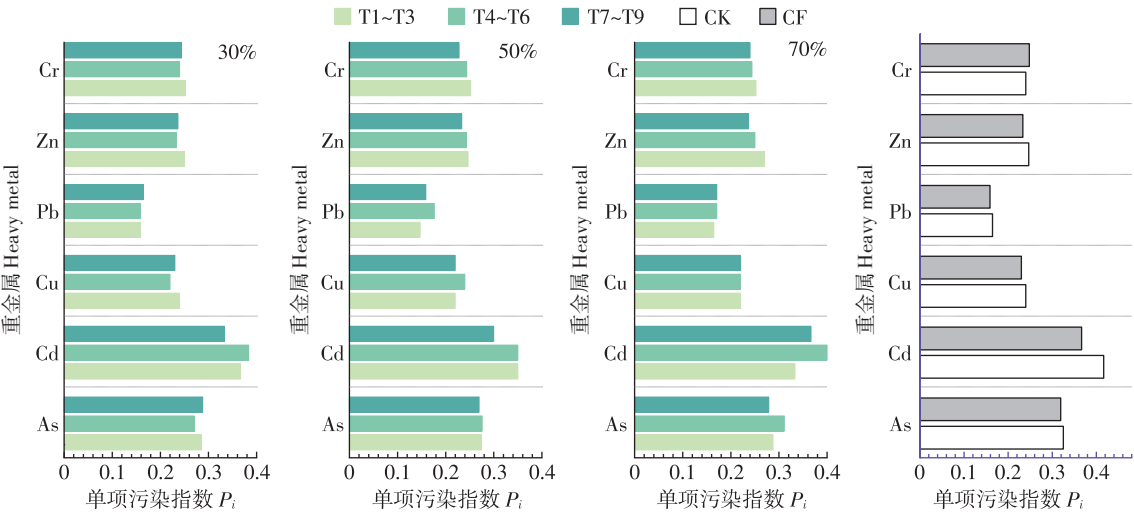


图 2 不同处理土壤中重金属单项污染指数

Figure 2 Heavy metal single pollution index in soils of different treatments

质量安全限值,处于无污染等级($P_i \leq 1$)。相比于其他腐熟处理,施加黑膜厌氧塘腐熟肉鸭粪肥的土壤重金属综合污染指数较低,且在施加肉鸭粪肥各处理中配施比例均在50%时达到最低。由此可见,在本试验设置下各处理腐熟肉鸭粪肥替代化肥施用均未增加土壤重金属的污染等级,施加腐熟肉鸭粪肥的各处理中以50%的比例替代化肥对土壤重金属的影响较小,且黑膜厌氧塘处理最优。

2.4 不同处理对土壤中抗生素的影响

在本试验中共检测了肉鸭粪肥部分替代化肥不同处理中土壤四环素类、磺胺类、氟喹诺酮类、大环内酯类共4大类23种抗生素,其中有5种抗生素被检测出:环丙沙星、磺胺二甲嘧啶、氟甲砜霉素、磺胺嘧啶、恩诺沙星。观测结果见表6,试验土壤中主要以氟甲砜霉素为主,施加鸭粪肥后,土壤中抗生素的种类增加。黑膜厌氧塘处理后的鸭粪替代化肥施用未导致土壤中磺胺嘧啶含量的增多。各处理土壤中环丙沙星的含量会随着鸭粪替代比例的增大而升高。恩诺沙星的含量在好氧堆肥鸭粪处理(T1~T3)和黑膜厌氧塘鸭粪处理(T7~T9)的试验土壤中呈现随替代比例增大而升高的规律,表明在本试验条件下腐熟肉鸭粪肥替代化肥施用会使土壤中抗生素的多样性增加,黑膜厌氧塘处理后的肉鸭粪替代化肥不会给土壤带来磺胺嘧啶含量增加的风险,但随着肉鸭粪肥替代比例的增加会给土壤带来环丙沙星和恩诺沙星含量增加的风险。

3 讨论

3.1 肉鸭粪肥替代化肥对小白菜产量和品质的影响

肉鸭粪肥作为优质肥料部分替代化肥施加到农

田可提升作物品质。评价蔬菜品质的重要指标有可食用部分维生素C、可溶性蛋白以及可溶性糖含量等。本试验结果表明,肉鸭粪肥部分替代化肥能明显增加小白菜的可溶性糖含量以及可溶性蛋白含量,相较其他处理,配施30%黑膜厌氧塘处理的肉鸭粪肥效果最优。此外,配施肉鸭粪肥相较纯化肥处理使得小白菜硝酸盐含量减少。刘玉学等^[18]研究发现,当 $40\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 竹炭和秸秆炭与肥料混合施加到小青菜设施时,小青菜中硝酸盐的含量会降低。这可能是因为试验中施加了具有吸附作用的外源添加物,土壤中生物炭的含量提高使土壤中氮素的含量减少,从而使小青菜的硝酸盐含量减少。

3.2 肉鸭粪肥替代化肥对土壤和小白菜中重金属含量的影响

配施畜禽粪肥能使长期施用化肥造成的土壤板结、肥力下降、土壤面源污染、作物产量下降、作物品质降低等问题得到很好的改善。但是相较化肥,畜禽粪污中重金属的含量较高,故人们十分重视施用畜禽粪肥是否会造成土壤中重金属污染和富集等问题^[19-21]。土壤中重金属的迁移转化与施肥特别是施用粪肥密切相关,畜禽粪便、污泥、沼液以及堆肥产物等有机肥作为一种外源物部分替代化肥施用到土壤中时,由于其重金属含量显著高于化肥,故会直接影响土壤中重金属的含量。前人研究表明,若畜禽粪肥被长期施加到土壤中,土壤中重金属的含量会受到明显的影响^[22-23],然而不同研究结果有一定的差异。本试验将3种不同处理的肉鸭粪肥施用在小白菜种植土壤中,除了施加50%好氧堆肥鸭粪肥外,其余处理的小白菜均未检测出重金属Cu,说明在本试验条件

表6 不同处理土壤抗生素含量(平均值±均方差,ng·g⁻¹)
Table 6 Measured results of the soil antibiotics content in different treatment (Mean±SD, ng·g⁻¹)

处理 Treatment	磺胺嘧啶 Sulfadiazine	磺胺二甲嘧啶 Sulfamethazine	环丙沙星 Ciprofloxacin	氟甲砜霉素 Fosfomycin	恩诺沙星 Enrofloxacin
CK	—	—	—	0.65±0.05	—
CF	—	—	—	1.90±0.05	11.65±1.15
T1	0.30±0.10	0.75±0.05	12.50±1.10	—	33.00±0.30
T2	0.35±0.05	0.30±<0.01	17.40±0.60	—	68.95±1.65
T3	0.70±0.20	0.55±0.05	23.80±0.15	—	130.25±4.05
T4	0.65±0.15	3.20±0.10	19.70±0.60	—	44.80±1.00
T5	1.80±0.10	0.55±0.05	49.10±1.20	—	142.85±12.55
T6	1.20±<0.01	0.40±<0.01	47.20±0.05	—	114.70±4.40
T7	—	0.65±0.05	6.40±0.40	—	28.60±2.20
T8	—	0.80±0.10	9.40±0.15	—	38.70±0.90
T9	—	2.60±0.10	19.10±1.40	0.25±0.05	105.55±0.65

下施加肉鸭粪肥未明显促进Cu向小白菜中迁移。相较于CK组,本试验设置的处理中小白菜重金属Zn、As、Pb、Cd和Cr的含量虽都有所增加,但As、Cd和Cr的含量均低于食品安全国家标准安全限值。乔靖华^[24]的研究表明,环境中的重金属等有害物质会被作物根部器官吸收并富集到植株的各个部位中,故本试验中配施腐熟鸭粪肥的小白菜中重金属的含量也随肉鸭粪肥施加比例的增大而增大。魏益华等^[25]以江西省的设施菜地为研究对象,发现施入有机肥会提高土壤中Zn、Cu和Cd的含量。而本试验中,可能源于重金属大多迁移至小白菜中,处理组与CK组相比土壤中重金属未见明显增加,且均未超出土壤环境质量安全限值。

3.3 肉鸭粪肥替代化肥对土壤中抗生素含量的影响

规模化、产业化的肉鸭养殖业中,为促进肉鸭生长发育、预防疾病,普遍存在使用抗生素的问题,这使得肉鸭粪肥资源化利用带来的抗生素风险问题成为肉鸭粪肥部分替代化肥农用过程中重点关注的问题。人们十分关注肉鸭粪肥部分替代化肥施用到土壤后是否会产生土壤抗生素残留,是否会在农作物植株体内累积富集,是否会通过食物链等途径威胁人类的生命健康等问题^[26]。段然等^[27]对5个省份的调查取样研究显示,长期施用沼液肥会增加土壤中抗生素的检出率。而在本试验中,相较CK和CF处理,在施加鸭粪肥后的土壤样品中检出了恩诺沙星、磺胺二甲嘧啶、磺胺嘧啶和环丙沙星,盆栽小白菜是不完全开放的状态,不具备农田生态系统的开放式特点,土壤中抗生素的含量和种类受工业大气的影响较小,因此施肥是影响土壤抗生素累积的主要因素。耕种之前的初始土壤样品中含有很少或不含抗生素,而肉鸭粪肥中抗生素含量高,从而使土壤中抗生素种类和含量明显增加。肉鸭粪肥中抗生素的含量可能会因不同饲料、不同季节、不同鸭粪腐熟处理方式而有较大差异。在本试验中,由于抗生素含量基础值以及外源添加值均低,且小白菜种植周期时间较短,故土壤中抗生素的积累量较小。长期施加肉鸭粪肥部分替代化肥与土壤中抗生素含量的关系还需要进一步的试验研究。

4 结论

(1)好氧堆肥处理和异位发酵床处理后的肉鸭粪肥施加量增加会使小白菜鲜质量降低;配施肉鸭粪肥均可提高小白菜可溶性糖和可溶性蛋白的含量;相较纯化肥处理,肉鸭粪肥替代化肥处理可使小白菜中的

硝酸盐含量明显下降,且配施黑膜厌氧塘腐熟的肉鸭粪肥效果最优。

(2)3种肉鸭粪肥30%替代化肥施用,小白菜地上部重金属含量不会超出食品安全相关标准的安全限值。

(3)施用不同方式腐熟的肉鸭粪肥部分替代化肥到土壤中,均未增加土壤重金属污染等级。

(4)施加肉鸭粪肥会增加土壤中抗生素的种类,应注意长期施肥后抗生素的累积风险。

参考文献:

- [1] 余磊,姜珊,姜彩红,等.我国畜禽养殖环境管理进程及展望[J].农业环境科学学报,2021,40(11):2277-2282. SHE L, JIANG S, JIANG C H, et al. Progress and prospect for environmental management of livestock and poultry breeding in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11):2277-2282.
- [2] 晏婷,朱志平,高理福,等.肉鸭粪便排放特征的季节性变化[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(1):115-123. YAN T, ZHU Z P, GAO L F, et al. Seasonal variation of meat duck manure production characteristics[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(1):115-123.
- [3] MIN J, ZHAO X, SHI W M, et al. Nitrogen balance and loss in a greenhouse vegetable system in southeastern China[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(4):464-472.
- [4] 宋以玲,于建,陈士更,等.化肥减量配施生物有机肥对油菜生长及土壤微生物和酶活性影响[J].水土保持学报,2018,32(1):352-360. SONG Y L, YU J, CHEN S G, et al. Effects of reduced chemical fertilizer with application of bio-organic fertilizer on rape growth, microorganism and enzymes activities in soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1):352-360.
- [5] OLESEN J E, HANSEN E M, ASKEGAARD M, et al. The value of catch crops and organic manures for spring barley in organic arable farming[J]. *Field Crops Research*, 2007, 100(2):168-178.
- [6] CHIRINDA N, OLESEN J E, PORTER J R, et al. Soil properties crop production and greenhouse gas emissions from organic and inorganic fertilizer-based arable cropping systems[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 139:584-594.
- [7] 杜晓玉.有机肥用量及种类对土壤氮组分和农田氮流失的影响[D].北京:中国农业科学院,2011. DU X Y. Effect of organic fertilizer dosage and type on soil N fraction and N loss from farmland[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011.
- [8] 高杰云,康凌云,严正娟,等.沼肥替代化肥对设施蔬菜产量和土壤养分及重金属累积的影响[J].农业工程学报,2017,33(17):200-207. GAO J Y, KANG L Y, YAN Z J, et al. Effects of biogas manure replacing chemical fertilizer on accumulation of nutrient and heavy metal in greenhouse vegetable soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(17):200-207.
- [9] 魏晓兰,吴彩姣,孙玮,等.减量施肥条件下生物有机肥对土壤养分供应及小白菜吸收的影响[J].水土保持通报,2017,37(1):40-44.

- WEI X L, WU C J, SUN W, et al. Effect of bio-organic fertilizer on soil nutrient supply and absorption of bok choy under different decreasing fertilization[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(1): 40-44.
- [10] CHEN Q L, CUI H L, SU J Q, et al. Antibiotic resistomes in plant microbiomes[J]. *Trends in Plant Science*, 2019, 24(6): 530-541.
- [11] ZHANG Y J, HU H W, CHEN Q L, et al. Transfer of antibiotic resistance from manure-amended soils to vegetable microbiomes[J]. *Environment International*, 2019, 130: 104912.
- [12] ZHANG C, NIE S, LIANG J, et al. Effects of heavy metals and soil physicochemical properties on wetland soil microbial biomass and bacterial community structure[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 557/558: 785-790.
- [13] TESSIER A, CAMPBELL G C, BISSEON M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7): 844-851.
- [14] DUBOIS M, GILLES K A, HAMILTON J K, et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances[J]. *Analytical Chemistry*, 1956, 28(3): 350-356.
- [15] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72(1/2): 248-254.
- [16] CATALDO D A, MAROON M, SCHRADER L E, et al. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant-tissue by nitration of salicylic-acid[J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 1975, 6.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [18] 刘玉学, 王耀锋, 吕豪豪, 等. 生物质炭化还田对稻田温室气体排放及土壤理化性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(8): 2166-2172. LIU Y X, WANG Y F, LÜ H H, et al. Effects of biochar application on greenhouse gas emission from paddy soil and its physical and chemical properties[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(8): 2166-2172.
- [19] 林勇, 章小婷, 计徐, 等. 肉鸭发酵床抗生素、重金属累积及细菌耐药性的演变特性[J]. *微生物学报*, 2015, 55(4): 457-466. LIN Y, ZHANG X T, JI X, et al. Accumulation of antibiotics, heavy metals and antimicrobial-resistant bacteria in duck bio-bed[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2015, 55(4): 457-466.
- [20] 刘思辰, 王莉玮, 李希希, 等. 沼液灌溉中的重金属潜在风险评估[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(6): 1517-1524. LIU S C, WANG L W, LI X X, et al. Potential risk assessment of heavy metal in biogas slurry irrigation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(6): 1517-1524.
- [21] 葛昕, 李布青, 丁叶强, 等. 沼液利用现状和潜在风险分析[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(30): 14897-14898. GE X, LI B Q, DING Y Q, et al. Analysis on utilization status and potential risk of biogas slurry[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2012, 40(30): 14897-14898.
- [22] CUI H, OU Y, WANG L, et al. The passivation effect of heavy metals during biochar-amended composting; emphasize on bacterial communities[J]. *Waste Management*, 2020, 118(6): 360-368.
- [23] 索琳娜, 刘宝存, 赵同科, 等. 北京市菜地土壤重金属现状分析与评价[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(9): 179-186. SUO L N, LIU B C, ZHAO T K, et al. Evaluation and analysis of heavy metals in vegetable field of Beijing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(9): 179-186.
- [24] 乔靖华. 土壤-蔬菜系统中重金属的迁移[D]. 西安: 西安科技大学, 2011. QIAO J H. Migration of heavy metals in soil-vegetable system[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2011.
- [25] 魏益华, 邱素艳, 张金艳, 等. 农业废弃物中重金属含量特征及农用风险评估[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(14): 212-220. WEI Y H, QIU S Y, ZHANG J Y, et al. Characteristic of heavy metal contents in agricultural wastes and agricultural risk assessment[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(14): 212-220.
- [26] 崔亚男. 猪粪不同处理对土霉素残留、土壤性质和小白菜生长与品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2016. CUI Y N. Effects of different treatment of pig manure on tetracycline residue, soil properties and growth and quality of Chinese cabbage[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.
- [27] 段然, 王刚, 杨世琦, 等. 沼肥对农田土壤的潜在污染分析[J]. *吉林农业大学学报*, 2008(3): 310-315. DUAN R, WANG G, YANG S Q, et al. Preliminary research of potential pollution on farmland soil after using biogas[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2008(3): 310-315.

(责任编辑: 李丹)