

沼肥施用量对上海青产量及土壤理化特性的影响

金柯达¹, 王绍轩¹, 胡宝娥², 贾世江¹, 万小春³, 王媛媛¹, 艾平¹, 王海^{3*}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 湖北省汉川市农业农村局, 湖北 汉川 432300;

3. 农业农村部农业生态与资源保护总站, 北京 100125)

摘要: 为研究沼肥替代化肥的应用潜力, 探究沼肥的合理施用量, 评估其作为肥料的质量和安全风险, 对不同沼肥施用量梯度的上海青进行大棚栽培试验, 研究了不同沼肥施用量对上海青产量、品质以及土壤质量的影响并进行风险评估。结果表明, 合理施用沼肥可以有效提高上海青产量及品质, 各试验组中, BF-170 组($TN = 170 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)产量最高, 达到 $46.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其产量比空白组和化肥组分别提高了 48.1% 和 28.1%。不同梯度沼肥施用后上海青可食用部中重金属含量未明显增加, 短期内不同梯度沼肥施用对上海青产量和品质没有负面影响, 但过量施用沼肥时 BF-340 组 $TN = 340 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, BF-680 组 $TN = 680 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 存在养分尤其是氮素的高量损失。与化肥相比, 合理的沼肥施用对改善土壤理化性质有明显的效果, 沼肥施用后土壤重金属含量多数实验组(除 BF-340 组的 $TN = 340 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 外)都在规定的安全浓度限值以内。短期过量施用沼肥并未造成上海青重金属超标, 未出现安全风险, 且对土壤重金属污染的风险较低。

关键词: 沼肥; 风险评估; 重金属; 农产品品质; 土壤肥力

中图分类号: S216.4; S5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1166(2022)06-0050-07

DOI: 10.20022/j.cnki.1000-1166.2022060050

Effects of Biogas Fertilizer Application Rate on Shanghai Cabbage Yield and Soil Physicochemical Properties / JIN Keda¹, WANG Shaoxuan¹, HU Baoc², JIA Shijiang¹, WAN Xiaochun³, WANG Yuanyuan¹, AI Ping¹, WANG Hai^{3*} / (1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Hanchuan Agricultural and Rural Bureau of Hubei Province, Hanchuan 432300, China; 3. Rural Energy and Environment Agency, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China)

Abstract: In order to study the application potential of biogas fertilizer as a substitute for chemical fertilizer, explore the reasonable application amount of biogas fertilizer, and evaluate the quality and safety risks of biogas fertilizer as a fertilizer, this paper carried out a greenhouse planting experiment of Shanghai cabbage, studied the impact of different application amount of biogas fertilizer on the yield, quality and soil quality of Shanghai cabbage, and carried out a risk assessment of biogas fertilizer used in facilities planting of Shanghai cabbage. The results showed that reasonable application of biogas fertilizer could effectively improve the yield and quality of Shanghai cabbage. Among the experimental groups, the yield of BF-170 group with $TN = 170 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ was the highest, reaching $46.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, which was 48.1% and 28.1% higher than that of the blank group and chemical fertilizer group respectively. The content of heavy metals in edible parts of Shanghai cabbage did not increase significantly after the application of biogas fertilizer with different gradients, thus there was no safety risk in short period. Excessive application of biogas fertilizer had a high loss of nutrients BF-340 group with $TN = 340 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, BF-680 group $TN = 680 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, especially nitrogen. Compared with chemical fertilizer, reasonable application of biogas fertilizer had a significant effect on improving the physical and chemical properties of soil. The results showed that the application gradient of biogas fertilizer had no negative impact on the yield and quality of Shanghai cabbage crops. The excessive application of biogas fertilizer did not cause the phenomenon that heavy metals in agricultural products exceeded the standard in the short term. After the application of biogas fertilizer, the content of heavy metals in the soil was basically within the specified concentration limit (except BF-340 group with $TN = 340 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), and the risk of biogas fertilizer pollution to soil heavy metals in the short term was low.

收稿日期: 2022-11-14 **修回日期:** 2022-11-28

项目来源: 国家自然科学基金项目(51406064); 中国高校基本科研业务费专项(2662019PY064)。

作者简介: 金柯达(1995-), 男, 浙江台州人, 博士研究生, 主要从事农业废弃物资源化利用研究等工作, E-mail: jinkeda@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 王海, E-mail: reea5261@126.com

Key words: biogas fertilizer; risk assessment; heavy metals; quality of agricultural products; soil fertility

过去几十年,我国化肥产量急剧上升,化肥使用量从 1998 年的 4085.60 万 t 增加至 2021 年的 5191.26 万 t,增长了 1.27 倍^[1],其过度施用会导致土壤和空气的环境污染,还会影响食品安全和人类健康^[2],且化肥的生产消耗了大量的化石能源,加速了资源枯竭。因此,应积极探寻高效环保的化肥替代品。

以厌氧发酵为核心的处理技术是畜禽养殖场粪污及其它污染物削减的重要手段,是回收氮磷养分、减少化肥施用、减少温室气体排放和增加土壤碳封存的一种有效方法。厌氧发酵后产生的沼液沼渣中除了含有丰富的氮(N)、磷(P)、钾(K)等元素外,还含有大量微量元素、有机质、多种氨基酸、维生素及有益菌群等,是一种优质的生物有机肥。沼肥中含有丰富的微量元素和营养物质,可以改善土壤条件和微生物群落^[3]。沼肥作为有机肥,养分含量齐全,含有作物生长必须的 N、P、K 大量元素^[4],可提高农作物和果蔬的产量、改善品质、提高抗性、预防病虫害等^[5]。目前处理沼液沼渣最主要和最方便的形式就是将其直接还田利用。

然而,无论是沼液与化肥配施还是单独施用沼液,均加剧了表层土壤的酸化和盐渍化,长期使用易导致深层土壤酸化和盐渍化^[6]。同时,厌氧发酵过程中使用的有机原料种类广泛,产生的沼肥往往存在重金属、抗生素、病原体和农药等有害物质^[7]。畜禽养殖过程中,铜、锌、铅、铬等微量元素常作为饲料添加剂加入,导致畜禽粪便中的重金属含量显著增加^[8],重金属元素又因沼气发酵过程中有机物料的生物分解而浓缩在沼渣中或以离子型态溶解在沼液中,从而增加了沼肥施用的重金属污染风险。在沼肥施用对油菜生长和土壤环境的影响研究中,发现施用沼肥后显著提高了土壤铅、铬、砷、镉和油菜中铬含量,但没有超过国家相关标准^[9]。但也有研究者提出合理施用沼肥不仅能提高作物产量,而且不会造成重金属超标^[10]。稻田连续施用 2 茬沼液后的试验结果表明,稻田土壤中 Cd、Cr、As、Pb 和 Hg 含量都符合标准,无重金属污染风险,但 As 和 Cr 含量与沼液用量呈现明显正相关性,长期施用沼液可能会致使土壤中 As 和 Cr 含量超标^[11]。

因此,尽管沼肥有代替化肥的潜力,但由于对其作为肥料的质量和安全性缺乏理论依据,对沼肥替

代化肥的合理施用量等相关研究存在争议。因此,本文开展了沼肥种植上海青的试验,初步研究了不同沼肥施用量对上海青产量和品质以及土壤质量的影响,探究沼肥施用可能造成的重金属污染,探寻沼肥的施用阈值。旨在为沼肥的合理施用进一步提供依据和参考,以实现化肥替代,实现农业绿色高效发展。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2019 年 10 月开始在湖北省武汉市华中农业大学工程机电训练中心的试验大棚中进行,试验场地位置为北纬 30.6°,东经 114.1°,海拔 23.1 m。试验土壤为黄壤土;试验作物为由上海西农种子有限公司提供的上海青;试验所用的沼液沼渣取自湖北省鄂州市沼气工程,发酵原料为猪粪。土壤、沼渣和沼液的基本理化特性如表 1 所示。试验中使用的氮、磷、钾化肥分别为尿素、过磷酸钙和硫酸钾。

表 1 供试土壤、沼渣和沼液的基本理化特性

供试材料	原土壤	沼液	沼渣
TN/(mg·kg ⁻¹)	990.00 ± 0.02	2036.70 ± 0.02	7386.70 ± 0.01
TP/(mg·kg ⁻¹)	592.00 ± 5.29	30.70 ± 8.31	7375.50 ± 156.27
TK/(mg·kg ⁻¹)	9300.00 ± 0.01	1400.00 ± 0.00	1866.70 ± 115.47
EC/(mS·m ⁻¹)	61.90 ± 0.20	13.70 ± 0.00	14.20 ± 0.15
pH 值	6.60 ± 0.15	9.20 ± 0.00	8.10 ± 0.10
Cu/(mg·kg ⁻¹)	28.00 ± 0.70	3.30 ± 0.58	153.00 ± 8.54
Zn/(mg·kg ⁻¹)	88.00 ± 2.20	2.70 ± 0.58	485.00 ± 25.12
Pb/(mg·kg ⁻¹)	28.00 ± 0.70	0.10 ± 0.00	1.10 ± 0.44
Cr/(mg·kg ⁻¹)	72.00 ± 1.80	3.70 ± 1.15	5.00 ± 1.00
Cd/(mg·kg ⁻¹)	0.100 ± 0.003	0.040 ± 0.007	0.270 ± 0.111
As/(mg·kg ⁻¹)	9.670 ± 0.242	0.00	0.270 ± 0.029
Hg/(mg·kg ⁻¹)	0.150 ± 0.004	0.010 ± 0.004	0.010 ± 0.001

1.2 上海青种植试验方案

本研究中使用上海青园艺种植中的常规氮肥用量(TN = 170 kg·hm⁻²)作为标准肥料氮施用量,并设置了 4 组不同梯度的沼肥施用组(BF),分别为 BF-85(TN = 85 kg·hm⁻²),BF-170(TN = 170 kg·hm⁻²),BF-340(TN = 340 kg·hm⁻²)和 BF-680(TN = 680 kg·hm⁻²)。此外,设置空白对照 CK(不施肥)和化肥施用组 CF-170(TN = 170 kg·hm⁻²)作为对照

组,CF-170 组配以与 BF-170 组等量的 N、P、K 施用。每处理设 2 次重复。沼渣作基肥,沼液作追肥,按各处理全过程施入的总氮量计算,基肥占 45%,

第 1 次追肥占 10%,第 2~4 次追肥各占 15%。具体施肥方案见表 2。

表 2 上海青种植试验不同处理施肥方案

(kg·hm⁻²)

试验组	基肥肥料类型	基肥施用量	追肥肥料类型	追肥 1 施用量	追肥 2 施用量	追肥 3 施用量	追肥 4 施用量
沼肥组	BF-85	沼渣	5178	沼液	4173	6285	6285
	BF-170	沼渣	10357	沼液	8347	12569	12569
	BF-340	沼渣	20713	沼液	16694	25139	25139
	BF-680	沼渣	41426	沼液	33387	50277	50277
对照组	CF-170	尿素	170	尿素	38	57	57
		过磷酸钙	325	过磷酸钙	1.0	1.5	1.5
		硫酸钾	43	硫酸钾	26	39	39
CK		—	—	—	—	—	—

种植开始前,将大棚内土壤翻耕均匀,按每小区 4.4 m² (2.2 m×2 m) 划分区块,并在小区之间用 50 cm 深的 PVC 板隔开。上海青种植的株间距和行间距均为 20 cm,选择 4~5 片幼叶的幼苗定植,每行定植 11 株,每区定植 10 行,共有 110 株上海青幼苗。试验于 2019 年 10 月 25 日开始并施用沼渣作为基肥,施用基肥后翻土混匀,隔日定植;定植后第 7 天进行第 1 次追肥,之后每隔一周进行一次追肥,总共进行 4 次追肥。其他时期正常农艺管理,均以清水灌溉。

1.3 样品采集与检测方法

种植试验于 2019 年 11 月 30 日结束,全部收获、称重,并计算产量。每区取 10~15 株正常生长的上海青,用蒸馏水冲洗干净后,取鲜样冷冻保存,用以测定叶绿素和维生素 C(Vc) 的含量;另一部分样品置于烘箱中 105℃ 杀青 30 min,65℃ 烘 24 h,碾碎,过 100 目筛,并保存在自封袋中,备用。在种植试验前后采用 5 点法钻取 0~20 cm 耕作层土壤,去除根系、杂草、土壤动物和石块等杂质后,土壤样品自然风干,碾碎,过 100 目筛,保存在自封袋中,备用。

上海青的 SPAD(Soil and Plant Analyzer Development) 值使用 SPAD 仪(YLS-501,宁波科迈仪器有限公司,中国) 测定;上海青 Vc 含量和可溶性糖的含量用紫外分光光度计(UH5300,Hitachi 公司,日本) 测定;土壤电导率(EC) 和 pH 值分别使用电导率电极(DDS-307A,INESA 科学仪器有限公司,中国) 和 pH 仪(FE28,Mettler Toledo 公司,美国) 测定;土样和上海青样品用微波消解仪(MARS 6TM,CEM 公司,美国) 分别用 HNO₃-HF-H₂O₂ 和 H₂SO₄-

H₂O₂ 进行消解,消解后的样品用来测定总氮(TN)、总磷(TP)、全钾(TK) 和重金属元素。TN 和 TP 用全自动化学分析仪(Smart Chem 200,AMS-Westco 公司,意大利) 测定;TK、铜(Cu)、锌(Zn)、铅(Pb)、镉(Cd)、铬(Cr)、砷(As) 和汞(Hg) 用原子吸收分光光度计(AA-6880,SHIMADZU 公司,日本) 进行分析测定。

1.4 数据处理与分析

本研究通过计算目标重金属的目标熵(Hazard quotient,HQ) 和危害指数(Hazard index,HI) 来量化蔬菜消费的健康风险,这种方法已被广泛采用^{[12][13]}。具体计算方法如公式(1) 和(2) 所示^[14]。

$$HQ = \frac{EF \times ED \times C_{veg} \times IR_{veg}}{BW \times AT \times RfD} \quad (1)$$

$$HI = \sum_i HQ_i \quad (2)$$

式中:EF 为暴露频率,一年 365 d;ED 为暴露时间,74.68 年;C_{veg} 为蔬菜中的重金属含量;IR_{veg} 为 1 天中平均食用蔬菜的量,0.236 kg·d⁻¹;BW 为平均体重,成人 60.1 kg;AT 为非致癌物的平均暴露时间,365 d×74.68 年;RfD 为参考每日摄入量,指通过食用蔬菜而摄入的重金属的每日安全摄入量(Cd,Hg,As,Pb,Cr,Cu 和 Zn 分别为 0.001、0.0003、0.0003、0.004、0.003、0.04 和 0.3 mg·kg⁻¹ d⁻¹)^[13]。

此外,采用单项污染指数(Pi) 法评价上海青可食用部和土壤中的重金属含量是否超标^[14],其计算方法如公式(3) 所示。

$$Pi = Ci/Bi \quad (3)$$

式中: Ci 为实际测得的某种重金属的浓度; Bi 为相关标准中限定的该种重金属的浓度。

本研究通过计算内梅罗污染指数(PN)来评价土壤重金属污染的程度,PN的计算方法如公式(4)所示。

$$PN = \sqrt{\frac{(P)^2 + (P_{\max})^2}{2}} \quad (4)$$

式中: P 为各类重金属单项污染指数的平均值; $P_{\max}$ 为各类重金属单项污染指数中的最大值。按内梅罗污染等级划分: 安全($PN \leq 0.7$), 需注意污染($0.7 < PN \leq 1.0$), 轻度污染($1.0 < PN \leq 2.0$), 中度污染($2.0 < PN \leq 3.0$) 和重度污染($PN > 3.0$)。

采用 SPSS 19.0、Excel 2016 和 Origin 2021 进行统计分析和作图,对数据进行单因素方差分析,采用 Duncan 检验($p < 0.05, n = 3$) 进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同沼肥施用量对上海青的影响

2.1.1 不同沼肥施用量对上海青产量及品质的影响

作物产量是衡量作物系统的关键指标,产量的高低直接反映了农艺管理方式的有效性。不同肥料处理之间的青菜产量存在明显差异,与空白对照组相比,沼肥与化肥施用都能显著提高青菜的总产量(见图1)。沼肥组的青菜产量普遍高于化肥组,以 BF-170 沼肥组的青菜产量为最高,达到 $46.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,相比空白组和化肥组分别提高了 48.1% 和 28.1%。随着沼肥用量的提高,青菜产量并没有呈现上升趋势,反而产量有所下降,BF-340 和 BF-680 的产量较 BF-170 降低了 15.5% 和 15.1%。

SPAD 值是一个无量纲比值,使用 SPAD 测定仪可在植株自然生长的情况下,短时间内无损测定植物叶片当前叶绿素的相对含量,目前已在多种植物中得到应用^[17-18]。宋廷宇^[19] 等对总叶绿素含量及 SPAD 值的相关性进行了统计分析,发现 SPAD 值与叶绿素含量均呈极显著正相关。在本试验中,SPAD 值最小为 BF-85 组(41.9)。随着沼肥施用量的增加,SPAD 值会有小幅度的增加,但并无显著差异($p > 0.05$),其中 BF-680 组 SPAD 值(43.1)会有降低趋势,可能是因施入过多的沼肥导致青菜烧苗,叶片枯萎或变色,造成叶片内含氮化合物变少。总体来说,SPAD 值与施氮量有一定的正相关性,但 SPAD 值的变化范围较小,且如果施氮量过大,如 BF-680 较之 BF-340 会有少许下降。

青菜营养的评价常用 V_c 、可溶性糖作为主要评

价指标,通常 V_c 、可溶性糖含量高,其营养价值也相应较高。本研究结果表明,沼肥组的上海青 V_c 含量要明显高于空白对照组和化肥组,空白对照组的 V_c 含量最低为 $41.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,化肥组为 $41.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而 BF-85 组的青菜 V_c 含量最高,达到 $56.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。但是,青菜 V_c 含量随着沼肥施用量的增加而下降。此外,与空白组相比,化肥和沼肥组均能提高青菜的可溶性糖含量,其中 BF-340 组的可溶性糖含量最高,达到 3.4%,显著高于空白组的 2.8% 和化肥组的 3.0%。说明在中低施用量(BF340 及以下)下可获得较高的 V_c 与可溶性糖含量,过量施用沼肥反而会导致两者含量下降。

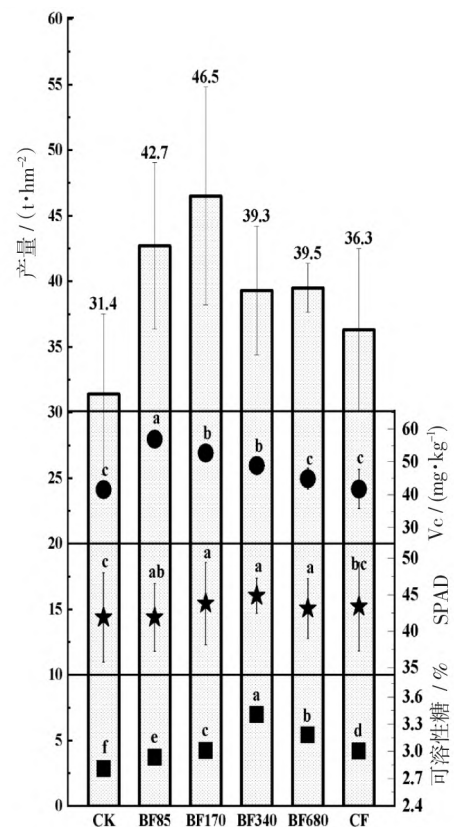


图1 不同施肥组上海青的产量及品质变化

2.1.2 不同沼肥施用量对上海青重金属含量的影响

植物污染指数是以实际污染水平与限量值相比较的方法,可直接评估重金属污染情况,上海青植物污染指数、危害指数计算结果如图2所示。

此外,危害指数(HI)的结果显示,沼肥施用后上海青重金属危害指数并未有明显差异,未存在随着沼肥施用量的增加而出现重金属富集的风险。同时各处理间危害指数值都明显小于1,这说明此试验中上海青均不存在重金属摄入风险。

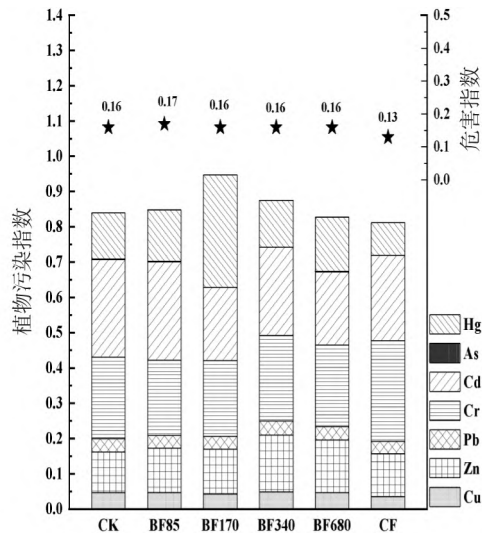


图2 不同施肥组上海青可食用部的污染指数和危害指数

2.2 不同沼肥施用量对土壤的影响

2.2.1 不同沼肥施用量对土壤肥力的影响

各组的土壤 pH 值、EC 值及土壤中 TN、TP、TK 含量显示土壤 TN、TP、TK 都会随着沼肥施用量的增加而增加(见图3),BF-680 处理增幅最大,TN、TP、

TK 分别含量达到 $1470 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DM}$ 、 $1128 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DM}$ 、 $10100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DM}$ 。然而,不同沼肥施用量之间差异并不明显,表层土壤中的养分并未随着沼肥施用量的成倍增加而显著提高。虽然 CF 组与 BF-170 组施用的 TN、TP 和 TK 相等,但是 CF 组种植后土壤中 N、P、K 含量略低于 BF-170 组,说明沼肥可以更好地将养分保存在表层土壤中,有效保持土壤肥力,防止养分流失造成的浪费^[2]。

试验原始土壤为酸性(pH 值 6.60),不同施肥处理后土壤 pH 值主要集中在 6.45~7.15。其中化肥组最低,仅为 6.45,显著低于空白组和沼肥施用组($p < 0.05$),造成这一现象的原因是由于化肥组中所用的过磷酸钙、硫酸钾属于生理酸性肥料,即植物吸收肥料中养分离子后土壤中 H^+ 增多,造成土壤酸性。而由于沼渣沼液呈弱碱性,因此试验后土壤 pH 值较原始土壤有所升高,但沼肥施用组中各组的土壤 pH 值整体变化不大。有研究表明,有机肥料可以降低碱性土壤的 pH 值,同时增加酸性土壤的 pH 值^[2]。

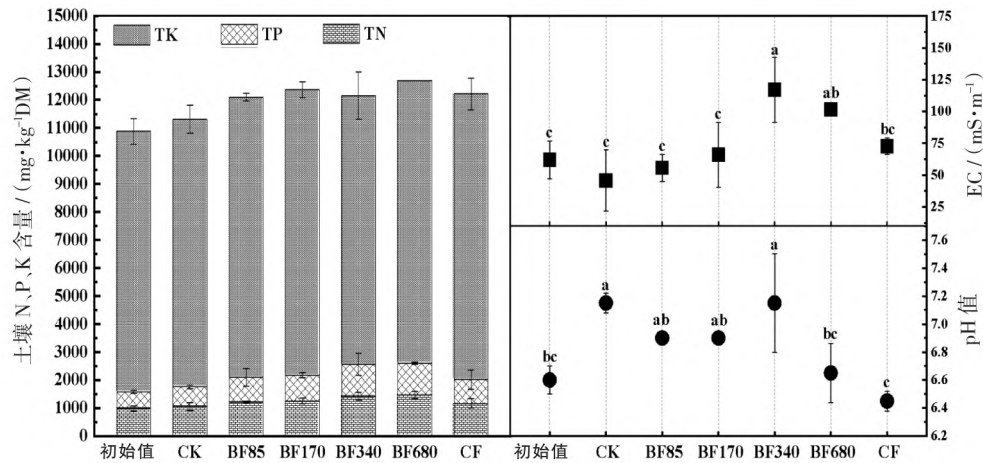


图3 不同施肥处理后土壤的基本理化特性变化

EC 值常用于估算土壤可溶性盐的浓度。土壤 EC 值随着沼肥施用量的增加而增加,其中以 BF-340 和 BF-680 组最为明显,分别达到 $117.00 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $101.45 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$,相比 CF 化肥组的 $73.00 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$ 分别增高 60% 和 39%。土壤 EC 值过高,会导致盐分积累,土壤渗透率降低,从而损害作物生长和产量。这也可以从上海青产量得到验证,BF-340 和 BF-680 组处理后的产量会明显降低。另外,有研究表明^[2],设施种植土壤 EC 值与种植年限、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量、TOC 含量、有效磷含量、速效钾

含量等因素呈正相关,而雨水淋洗可以显著降低土壤盐分。因此,不同于露天环境,大棚种植对沼肥的消纳量有限。

因此,对 EC 值的参考评估可以对防止土壤盐碱化起到至关重要的作用,也是沼肥施用中需要特别注意的一点。

2.2.2 不同沼肥施用量对土壤中重金属累积的影响

图4 为土壤重金属单项污染指数(P_i)和内梅罗综合污染指数(P_N)。沼肥处理后的土壤重金属含

量相比 CK、CF 组都有增加,其中 BF-85、BF-170 和 BF-680 组内梅罗污染指数在 0.7 ~ 1.0 之间,较空白组和 CK 有所增加。BF-340 组内梅罗污染指数达到 1.43,处于轻度污染,其中 Cd 含量显著高于其他处理,并且高于《农业土地土壤污染风险控制标准》(GB15618—2018)规定的浓度限值,存在土壤污染的风险。总的来说,沼肥施用后土壤重金属含量基本都在规定的浓度限值以内,这表明沼肥在短期内对土壤重金属污染的风险较低。然而,单轮种植无法有效说明用沼肥施肥不会对土壤造成重金属污染,弄清楚这一方面的机理,仍需要长时间的沼肥栽培试验。

此外,由于沼肥本身的 Cu、Zn 元素的含量要显著高于其他重金属元素,因此,施用沼肥带入土壤最大的便是 Cu 和 Zn。但是根据土壤中重金属元素的生物化学性质分类,Cu 和 Zn 属于在一定浓度范围内可维持生物正常生理活动的必需元素,只有其浓度超过一定范围,才会导致机体中毒^[23]。因此,土壤中 Cu 和 Zn 含量在合理范围的增长并不认为会导致土壤微生物和农作物的安全风险。在部分文献结果中^[24],土壤重金属含量和沼肥的施用量呈现正相关性,土壤重金属含量会随着沼肥的施用累积。这是由于重金属本身并不会自然降解,它们的半衰期较长且性质相当稳定,所以重金属可以长期存在于土壤中。然而,这在本研究中并不明显,造成这种现象的原因,有可能是由于设施栽培中的高灌溉量,部分重金属离子随着灌溉水向深层土壤和地下水转移^[25],另外,沼肥中的重金属也会通过土壤被作物

根系吸收固定,有研究发现,重金属被作物根系吸收后大部分会积累在根部,仅有少量的重金属会传递到地上部^[24],本文 2.1.2 中的上海青重金属危害指数无明显变化也印证了此结论。

3 结论

(1) 相比于空白组和化肥组,上海青产量在低沼肥施用量($TN = 85 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $TN = 170 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)有显著增加,其中 BF-170 组的上海青产量最高,达到 $46.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,比 CK 和 CF 组分别提高了 48.1% 和 28.1%,并且与化肥组相比,合理施用沼肥有利于提高上海青的 Vc 和可溶性糖含量。

(2) 沼肥施用后土壤的 N、P、K 含量相较试验前均有升高,但不同沼肥施用量对土壤 N、P、K 含量的影响并不显著。因此,过量施用沼肥施入的养分除了储存于土壤中和作物吸收外,其余部分会以各种形式流失,过量施用沼肥存在养分尤其是氮素的高量损失。此外,与化肥相比,合理的沼肥施用对改善土壤理化性质有明显的效果。

(3) 施用沼肥种植上海青可食用部的重金属含量无明显差异,短期内过量施用沼肥并未造成农产品重金属超标的现象,重金属污染指数和危害指数均在安全范围内。沼肥施用后土壤重金属含量基本(除 BF-340 组)都在规定的浓度限值以内,沼肥在短期内对土壤重金属污染的风险较低。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 农用化肥施用折纯量 [R/OL]. <https://data.stats.gov.cn/index.htm>, 2022-10-28.
- [2] Yi X Y, Yu L R, Chang S H E, et al. The effects of China's Organic-Substitute-Chemical-Fertilizer (OSCF) policy on greenhouse vegetable farmers [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 297: 126677.
- [3] Albuquerque J A, Fuente C D L, Campoy M, et al. Agricultural use of digestate for horticultural crop production and improvement of soil properties [J]. European Journal of Agronomy, 2012, 43: 119-128.
- [4] 王富全, 孙家宾, 赵永康, 等. 沼肥还田对小麦和油菜产量、品质及土壤改良的影响 [J]. 中国沼气, 2015, 33(06): 98-101.
- [5] 刘红艳, 胡涵, 王昌梅, 等. 沼肥对水果产量、品质和土壤理化性质影响的研究现状 [J]. 中国沼气, 2019, 37(06): 65-69.
- [6] 曲明山, 郭宁, 陈保华, 等. 沼液与化肥长期配施对

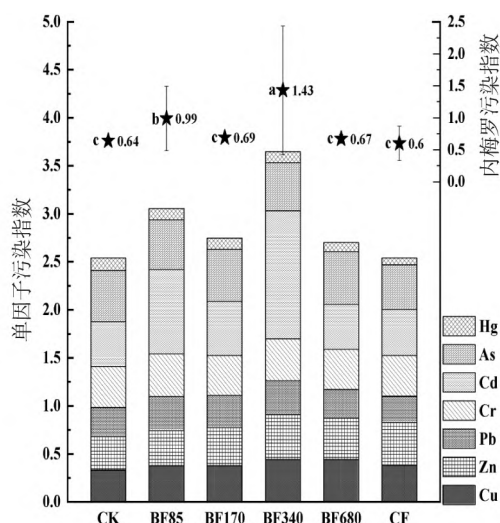


图4 不同施肥组的土壤重金属单项污染指数和内梅罗综合污染指数

- 蔬菜生产和土壤肥力的影响 [J]. 中国沼气, 2013, 31(01): 44 – 47.
- [7] 王紫艳, 杨桂玲, 虞轶俊, 等. 有机肥施用对农产品质量安全及土壤环境的影响研究 [J]. 农产品质量与安全, 2020(04): 67 – 73.
- [8] 马金智, 朱志平, 卢连水, 等. 河北省规模肉鸭场粪污重金属和抗生素调查分析 [J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(02): 421 – 427.
- [9] 宋丽芬, 孙丽英, 邵 蕾, 等. 沼肥施用对油菜生长及土壤环境影响研究 [J]. 中国沼气, 2017, 35(06): 83 – 88.
- [10] 秦乃群, 陈现朝, 高敬伟, 等. 沼液施用对花生小麦轮作土壤养分和重金属含量的影响 [J]. 山西农业科学, 2022, 50(10): 1422 – 1428.
- [11] 黄继川, 彭智平, 徐培智, 等. 沼液稻田消解对水稻生产、土壤肥力及环境安全的影响 [J]. 广东农业科学, 2016, 43(10): 69 – 76.
- [12] 刘 蕊, 张 辉, 勾 昕, 等. 健康风险评估方法在中国重金属污染中的应用及暴露评估模型的研究进展 [J]. 生态环境学报, 2014, 23(07): 1239 – 1244.
- [13] Xiao R, Guo D, Amjad A, et al. Accumulation, ecological-health risks assessment, and source apportionment of heavy metals in paddy soils: A case study in Hanzhong, Shaanxi, China [J]. Environmental Pollution, 2019, 248: 349 – 357.
- [14] Chen Z, Baloch M I, Zhang Y, et al. Transfer of heavy metals in fruits and vegetables grown in greenhouse cultivation systems and their health risks in Northwest China [J]. Science of The Total Environment, 2020: 142663.
- [15] USEPA. Risk-based concentration table [EB/OL]. Washington DC, United States Environmental Protection Agency, 2010 [2022 – 11 – 14]. [http:// www. Epa. Gov/ reg3hwmd/ risk/ human/ index](http://www.epa.gov/reg3hwmd/risk/human/index).
- [16] 刘衍君, 汤庆新, 白振华, 等. 基于地质累积指数与内梅罗指数结合法的耕地土壤重金属污染空间分布 [J]. 中国农学通报, 2009, 25(20): 174 – 178.
- [17] Azia F, Stewart K A. Relationships between extractable chloro-phyll and SPAD values in muskmelon leaves [J]. Journal of Plant Nutrition, 2001, 24(6): 961 – 966.
- [18] 蹇 黎, 丹 凤, 秦小军. 野生白芨叶绿素含量与 SPAD 值的测定与分析 [J]. 北方园艺, 2013(21): 165 – 167.
- [19] 宋廷宇, 何自涵, 程 艳, 等. 菜心叶片 SPAD 值与叶绿素含量的相关性分析 [J]. 东北农业科学, 2017, 42(01): 34 – 37.
- [20] 陈 霞, 罗友进, 吴纯清, 等. 沼肥深施对果园土壤性质及柑橘产量的影响 [J]. 水土保持学报, 2016, 30(05): 177 – 183, 189.
- [21] Wei M, Hu G Q, Wang H, et al. 35 years of manure and chemical fertilizer application alters soil microbial community composition in a Fluvo-aquic soil in Northern China [J]. European Journal of Soil Biology, 2017, 82: 27 – 34.
- [22] 刘书哲. 设施蔬菜地土壤障碍因子调查与影响因素分析 [D]. 南京: 南京师范大学, 2020.
- [23] 贾 丽, 乔玉辉, 陈 清, 等. 我国设施菜田土壤重金属含量特征与影响因素 [J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(02): 263 – 274.
- [24] 杨军芳, 贾良良, 冯 伟, 等. 施用沼渣对白菜及土壤重金属含量状况的影响 [J]. 华北农学报, 2014, 29(S1): 322 – 327.
- [25] 李丽华. 灌溉方式对水稻土重金属迁移的影响研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- [26] 朱 臻, 杨相东, 徐章倩, 等. 农作物叶片对大气沉降重金属的吸收转运和积累机制 [J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(02): 332 – 345.