

## 饲蚓固废对设施小白菜生长及土壤微生物特性的影响<sup>①</sup>

黄玉波<sup>1</sup>, 徐博涵<sup>1</sup>, 庄秋丽<sup>1</sup>, 黄向东<sup>2</sup>, 梁路<sup>1</sup>, 张卫杰<sup>1</sup>

(1 周口市农业科学院, 河南周口 466000; 2 洛阳理工学院能源与化工学院, 河南洛阳 471000)

**摘要:** 采用温室盆栽试验, 以小白菜为供试作物, 以未施用饲蚓固废处理为对照(CK), 设置 2%(T1)、4%(T2)、6%(T3)、8%(T4)、10% (T5)饲蚓固废施用量 5 个处理, 探究了设施土壤施用饲蚓固废对小白菜生长、品质、产量及土壤改良效果的影响。结果表明: 与 CK 处理相比, T3 处理小白菜株高、叶数、根长、地上部鲜重、地下部鲜重分别增加 30.9%、37.9%、41.2%、78.3%、255.6%, 维生素 C、可溶性糖和可溶性蛋白含量分别增加 96.5%、109.7% 和 65.7%, 硝酸盐含量降低 73.8%; T3 ~ T5 各处理, 随着饲蚓固废施用量增加, 小白菜生长及品质的各项指标有所改善, 但处理间差异不显著。与 CK 处理相比, T3 处理土壤 pH 降低 0.18~0.31 个单位, 电导率下降 56.3%, 铵态氮含量增加 146.4%, 土壤微生物生物量碳、基础呼吸、微生物熵及蔗糖酶、脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶活性分别是 CK 处理的 6.7 倍、2.9 倍、4.6 倍、1.8 倍、3.0 倍、2.4 倍、2.3 倍, 差异显著, 且各处理中 T3 处理土壤代谢熵最小。另外, 各处理间土壤有机质、有效磷、硝态氮含量存在显著性差异, 随饲蚓固废施用量的增加而增加。综上, 施用饲蚓固废能够提高土壤肥力、微生物生物量, 促进小白菜生长并提高其品质, 6% 饲蚓固废施用量是种植设施小白菜的理想用量。

**关键词:** 饲蚓固废; 小白菜; 设施土壤; 产量; 品质

中图分类号: S156.4; S634.3 文献标志码: A

## Effects of Solid Waste from Earthworm Feeding on Growth of Chinese Cabbage and Soil Microbial Characteristics in Facility

HUANG Yubo<sup>1</sup>, XU Bohan<sup>1</sup>, ZHUANG Qiuli<sup>1</sup>, HUANG Xiangdong<sup>2</sup>, LIANG Lu<sup>1</sup>, ZHANG Weijie<sup>1</sup>

(1 Zhoukou Academy of Agricultural Sciences, Zhoukou, Henan 466000, China; 2 School of Energy and Chemical Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang, Henan 471000, China)

**Abstract:** A greenhouse pot experiment was conducted using Chinese cabbage as the test crop, with no application of earthworm solid waste treatment as the control (CK). Five treatments, including 2% (T1), 4% (T2), 6% (T3), 8% (T4), and 10% (T5) earthworm solid waste application, were set up to investigate the effects of earthworm solid waste application on the growth, quality and yield of Chinese cabbage in facility soil and soil improvement. The results showed that compared with CK treatment, T3 treatment increased plant height, leaf number, root length, aboveground fresh weight, and underground fresh weight by 30.9%, 37.9%, 41.2%, 78.3%, and 255.6%, respectively. The vitamin C, soluble sugar, and soluble protein content of Chinese cabbage increased by 96.5%, 109.7%, and 65.7%, respectively, while the nitrate content decreased by 73.8%. The growth and quality indicators of Chinese cabbage improved in each treatment from T3 to T5, however, there was no significant difference between the treatments. Compared with CK treatment, T3 treatment reduced soil pH by 0.18–0.31 units, decreased conductivity by 56.3%, increased ammonium nitrogen content by 146.4%, and soil microbial biomass carbon, basal respiration, microbial entropy, and activities of sucrase, urease, phosphatase and catalase were found to be higher than CK treatment at rates of 6.7 times, 2.9 times, 4.6 times, 1.8 times, 3 times, 2.4 times, and 2.3 times, respectively, with significant differences observed among them. Among all treatments, T3 treatment had the lowest soil metabolic entropy. There were significant differences in soil organic matter, available phosphorus, and nitrate nitrogen content among the treatments, which increased with the increase of earthworm solid waste application rate. In summary, the application of earthworm solid waste can improve soil fertility, and microbial biomass, promote the growth and quality of Chinese cabbage, and a rate of 6% earthworm solid waste application is considered ideal for planting

①基金项目: 河南省科技研发计划联合基金(235101610071), 河南省科技研发联合基金重大项目(235101610015)和周口市科技攻关计划项目(2021GG02090)资助。

作者简介: 黄玉波(1977—), 男, 河南宜阳人, 硕士, 副研究员, 主要从事植物营养与高效施肥研究。E-mail: 286932434@qq.com

Chinese cabbage in facilities.

**Key words:** Earthworm solid waste; Chinese cabbage; Facility soil; Yield; Quality

近 40 年来, 我国蔬菜种植面积逐年增长, 截至 2023 年蔬菜种植面积占农作物总播种面积的 13%, 是 1978 年种植面积的 6.7 倍<sup>[1]</sup>。小白菜叶片倒卵形, 长 20~30 cm, 深绿色, 有光泽, 肉质肥厚, 茎叶可食<sup>[2]</sup>, 因其良好的口感、用途多样, 深受人们喜爱, 是老百姓餐桌上一年四季均可见到的一种叶类蔬菜。小白菜栽培范围广泛, 我国南北地区均有种植, 生育期短, 一年可多茬种植。随着人们生活水平提升, 设施蔬菜占比逐年增加, 但高产出激发高投入, 化肥施用量普遍过高<sup>[3]</sup>, 已造成设施土壤盐渍化现象普遍发生<sup>[4-6]</sup>、设施蔬菜产量和品质下降。

饲蚓固废是蚯蚓将有机物质进行消化后的排泄物, 也可称之为蚯蚓粪, 其具有均匀的团粒结构、疏松多孔、表面积大等优良特点。饲蚓固废还富含有机质、氮、磷、钾<sup>[7]</sup>, 有机物种类多达 65 种, 且含有大量细菌、真菌等微生物和活性酶<sup>[8]</sup>、氨基酸、生长素、细胞分裂素等活性成分<sup>[9]</sup>。很多学者在西瓜<sup>[10]</sup>、甜瓜<sup>[11]</sup>、草莓<sup>[12]</sup>、番茄<sup>[13-15]</sup>、黄瓜<sup>[16-18]</sup>等作物上均开展了施用饲蚓固废的相关研究, 结果表明, 适宜的饲蚓固废用量不仅可以促进作物生长, 提高其产量, 改善果实品质, 增加经济效益, 同时, 饲蚓固废含有的微生物、酶类等活性物质还能够抑制土壤的盐渍化和改良土壤酸化。可见, 饲蚓固废可作为优质肥料和土壤改良剂, 提升地力, 促进植物生长, 对农业高效持续性发展具有重要意义。

虽然饲蚓固废在各类作物上的研究已有很多, 但在设施土壤上的应用研究较少。因此, 本研究以小白菜为供试作物, 采用盆栽试验设置不同梯度用量的饲蚓固废处理, 对小白菜的生长、产量及品质等指标进行测定, 并对土壤养分、酶活性及微生物量进行分析, 以确定饲蚓固废的最佳施用量, 为设施土壤小白菜种植及土壤可持续利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试土壤取自河南省洛阳市郊区某农业园温室大棚内发生次生盐渍化的设施菜地, 土壤类型为褐土, 经自然风干后, 去除植物残体等杂物, 过 2 mm 筛, 混匀后备用。供试饲蚓固废由河南悯农生物技术有限公司提供。供试土壤和饲蚓固废基本性质见表 1。

表 1 供试土壤及饲蚓固废基本性质

Table 1 Basic properties of tested soil and earthworm solid waste

供试材料	pH	EC(mS/cm)	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)
土壤	8.10	0.99	15.67	1.06	1.23
饲蚓固废	7.58	1.22	193.86	8.66	16.71

### 1.2 试验设计

采用温室盆栽试验, 以小白菜为供试植物, 2021 年 4 月 20 日播种, 2021 年 6 月 1 日收获。设置 6 个处理, 分别为: CK, 未施用饲蚓固废; T1, 2% 饲蚓固废施用量; T2, 4% 饲蚓固废施用量; T3, 6% 饲蚓固废施用量; T4, 8% 饲蚓固废施用量; T5, 10% 饲蚓固废施用量。栽培用塑料盆口径 25 cm, 底径 15 cm, 深 25 cm, 每盆装物料 8 kg。试验时, 根据每一处理的物料配比要求, 将饲蚓固废和设施蔬菜土壤混合均匀后装盆, 每个处理 3 次重复, 选取大小均匀籽粒饱满的种子播种, 常规管理。收获后, 分析测定小白菜的生长和品质指标, 并将土壤混匀后采样, 测定土壤理化和生物学指标。

### 1.3 测定指标及方法

**1.3.1 小白菜农艺性状测定** 小白菜收获时, 测定植株株高、根长、地上部鲜重、地下部鲜重及叶数, 同时取新鲜叶片测定维生素 C、可溶性糖、可溶性蛋白及硝态氮含量。维生素 C 含量采用 2,6-二氯靛酚滴定法测定, 可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定, 可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 比色法测定, 硝态氮含量通过硝基水杨酸比色法测定<sup>[19]</sup>。

**1.3.2 土壤理化性质测定** 土壤 pH 以 1:2.5 土水质量比用复合电极测定; 电导率(EC)以 1:5 土水质量比用电导率仪测定; 有机质采用重铬酸钾容量法—外加热法测定; 全氮采用开氏法测定; 有效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定; 铵态氮和硝态氮采用 2 mol/L KCl 提取, 提取液中铵态氮和硝态氮分别采用靛酚蓝比色法和紫外分光光度法测定<sup>[20]</sup>。

**1.3.3 土壤生化性质测定** 土壤微生物生物量碳采用氯仿熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提法测定, 土壤基础呼吸采用室内密闭培养法测定<sup>[21]</sup>。土壤蔗糖酶活性测定采用 3,5-二硝基水杨酸比色法, 脲酶活性测定采用靛酚蓝比色法, 磷酸酶活性测定采用磷酸苯二钠比色法, 过氧化氢酶活性测定采用高锰酸钾滴定法<sup>[22]</sup>。

### 1.4 数据处理与分析

采用 SPSS 13.0 及 Excel 2010 对数据进行处理与分

析, 图表中数据为平均值±标准差。其中, 采用单因素方差分析(One-way ANOVA)及最小显著性差异法(LSD)检验各处理之间小白菜农艺性状、土壤理化性质及生化性质的差异显著性, 显著性水平为 $P<0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 饲蚓固废对小白菜生长的影响

由表2可知, 饲蚓固废能够促进小白菜生长, 提

高小白菜产量。与CK处理相比, T1~T5处理小白菜株高增幅分别为8.8%、18.3%、30.9%、34.5%、39.8%;地上部鲜重增幅分别为32.9%、45.4%、78.3%、96.6%、101.0%;叶数均显著增加, 增幅分别为22.8%、32.1%、37.9%、41.2%、43.8%, 但T1~T5处理之间无显著性差异;根长增幅分别为15.8%、24.4%、41.2%、52.7%、61.1%;地下部鲜重分别是CK处理的2.0倍、2.9倍、3.6倍、4.2倍、4.8倍。

表2 饲蚓固废对小白菜生长的影响  
Table 2 Effects of earthworm solid waste on growth of Chinese cabbage

处理	株高(cm)	叶数(个)	根长(cm)	地上部鲜重(g)	地下部鲜重(g)
CK	19.47±0.79 c	10.20±0.87 b	11.02±0.85 d	12.54±1.28 c	0.09±0.02 d
T1	21.19±1.69 bc	12.53±1.27 a	12.76±0.64 c	16.67±1.92 b	0.18±0.02 c
T2	23.03±1.12 b	13.47±0.90 a	13.71±1.26 c	18.23±1.45 b	0.26±0.04 b
T3	25.49±0.98 a	14.07±1.60 a	15.56±1.04 b	22.36±2.09 a	0.32±0.06 b
T4	26.18±1.94 a	14.40±0.53 a	16.83±0.90 ab	24.65±2.23 a	0.38±0.05 ab
T5	27.21±1.41 a	14.67±1.92 a	17.75±1.01 a	25.21±2.04 a	0.43±0.06 a

注: 表中同列不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ ); 下同。

### 2.2 饲蚓固废对小白菜品质的影响

由表3可知, 小白菜维生素C、可溶性糖和可溶性蛋白含量均随饲蚓固废施用量增加而提高, 而小白菜硝酸盐含量随饲蚓固废施用量增加而降低。与CK处理相比, T1~T5处理小白菜维生素C含量分别增加28.5%、63.2%、96.5%、99.8%、108.0%, 可溶性糖含量分别增加22.0%、48.4%、100.0%、109.7%、129.0%, 可溶性蛋白含量分别增加12.8%、37.1%、65.7%、67.4%、71.9%;而硝酸盐含量分别降低23.7%、46.1%、73.8%、72.3%、76.5%。综上, 施用饲蚓固废能显著促进小白菜生长, 促进小白菜维生素C合成, 可溶性糖和可溶性蛋白的积累, 降低硝酸盐含量, 达到显著改善小白菜品质的目的。

### 2.3 饲蚓固废对设施土壤理化性质的影响

由表4可知, 施用饲蚓固废能够提高土壤肥力。施用饲蚓固废对设施土壤pH有一定的影响, 整体上, 随饲蚓固废施用量增加pH降低。对于土壤电导率, 随着饲蚓固废施用量增加, 土壤电导率降低, 与CK处理相比, T1~T5处理分别降低16.3%、38.8%、

56.3%、62.5%、60.0%。而饲蚓固废显著提高土壤中有机质含量, 与CK处理相比, T1~T5处理土壤中有机质含量分别增加12.3%、27.5%、44.7%、62.2%、80.0%。土壤中铵态氮和硝态氮含量也随饲蚓固废施用量增加而增加, 变化显著, 分别较CK处理提高70.5%、64.9%、146.4%、158.6%、188.7%和24.5%、78.0%、110.2%、140.2%、175.5%。此外, 饲蚓固废显著提高土壤中有效磷含量, T1~T5各处理分别是CK处理的1.7倍、2.3倍、3.5倍、4.1倍、5.1倍。

表3 饲蚓固废对小白菜品质的影响  
Table 3 Effects of earthworm solid waste on quality of Chinese cabbage

处理	维生素C含量 (mg/100g)	可溶性糖含量 (%)	可溶性蛋白含 量(mg/g)	硝酸盐含量 (mg/g)
CK	27.44±3.01 d	0.31±0.03 c	14.27±1.29 c	3.32±0.29 a
T1	35.25±3.25 c	0.38±0.05 bc	16.09±1.46 c	2.54±0.47 b
T2	44.78±2.63 b	0.46±0.10 b	19.56±2.14 b	1.79±0.23 c
T3	53.92±6.46 a	0.62±0.06 a	23.64±2.33 a	0.87±0.34 d
T4	54.83±4.17 a	0.65±0.12 a	23.89±1.63 a	0.92±0.30 d
T5	57.05±5.42 a	0.71±0.08 a	24.52±2.45 a	0.78±0.19 d

表4 饲蚓固废对设施土壤理化性质的影响  
Table 4 Effects of earthworm solid waste on physicochemical properties of facility soil

处理	pH	EC(mS/cm)	有机质(g/kg)	铵态氮(mg/kg)	硝态氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)
CK	7.91~8.14	0.80±0.06 a	15.17±0.49 f	3.02±0.61 c	6.65±0.37 f	28.79±3.02 f
T1	7.93~8.01	0.67±0.08 b	17.04±0.60 e	5.15±0.43 b	8.28±0.69 e	47.98±5.45 e
T2	7.80~7.94	0.49±0.04 c	19.34±1.14 d	4.98±0.75 b	11.84±0.95 d	65.64±7.12 d
T3	7.73~7.83	0.35±0.06 d	21.95±0.91 c	7.44±1.01 a	13.98±0.76 c	99.71±8.43 c
T4	7.63~7.82	0.30±0.03 d	24.60±1.45 b	7.81±0.85 a	15.97±1.13 b	117.79±10.14 b
T5	7.52~7.78	0.32±0.03 d	27.31±1.24 a	8.72±0.93 a	18.32±1.08 a	146.87±12.51 a

## 2.4 饲蚓固废对设施土壤微生物生物量的影响

由表 5 可知, 饲蚓固废能够增加设施土壤微生物生物量碳含量, T1~T5 各处理是 CK 处理的 2.8 倍、4.6 倍、6.7 倍、7.5 倍、8.1 倍; 饲蚓固废促进土壤的呼吸, T1~T5 各处理相较 CK 处理增幅分别为 74.5%、119.6%、193.1%、235.3%、275.5%; 同时, 土壤微生物熵随着饲蚓固废施用量的增加而提高, T1~T5 各处理土壤微生物熵是 CK 处理的 2.5 倍、3.6 倍、4.6 倍、4.5 倍; 施用饲蚓固废降低土壤微生物代谢熵, T1~T5 各处理降幅分别为 38.6%、51.7%、56.1%、55.2%、53.6%。

**表 5 饲蚓固废对设施土壤微生物生物量的影响**  
Table 5 Effects of earthworm solid waste on microbial biomass of facility soil

处理	微生物生物量碳 ( $\mu\text{g/g}$ )	基础呼吸 ( $\mu\text{g/(g}\cdot\text{h)}$ )	微生物熵 (%)	代谢熵 ( $\mu\text{g/(mg}\cdot\text{h)}$ )
CK	67.76 ± 13.53 e	1.02 ± 0.15 f	0.77 ± 0.13 d	15.12 ± 1.05 a
T1	192.55 ± 32.09 d	1.78 ± 0.26 e	1.94 ± 0.27 c	9.28 ± 0.96 b
T2	309.13 ± 46.65 c	2.24 ± 0.21 d	2.75 ± 0.25 b	7.30 ± 0.40 c
T3	451.39 ± 43.54 b	2.99 ± 0.27 c	3.54 ± 0.22 a	6.64 ± 0.50 c
T4	509.02 ± 57.65 ab	3.42 ± 0.23 b	3.56 ± 0.30 a	6.77 ± 0.66 c
T5	548.30 ± 48.92 a	3.83 ± 0.16 a	3.46 ± 0.32 a	7.01 ± 0.45 c

## 2.5 饲蚓固废对设施土壤酶活性的影响

由表 6 可知, 施用饲蚓固废能够增强设施土壤蔗糖酶、脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶活性。与 CK 处理相比, T1~T5 各处理蔗糖酶活性分别显著提高 24.7%、45.2%、76.7%、98.6%、113.7%, 脲酶活性分别显著提高 52.2%、131.0%、203.8%、252.5%、291.5%, 磷酸酶活性分别显著提高 38.3%、66.7%、135.2%、165.6%、191.0%, 过氧化氢酶活性分别显著提高 28.5%、80.4%、131.9%、152.3%、167.1%, 且各处理间大多差异显著。

**表 6 饲蚓固废对设施土壤酶活性的影响**  
Table 6 Effects of earthworm solid waste on enzyme activities of facility soil

处理	蔗糖酶 ( $\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$ )	脲酶 ( $\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ )	磷酸酶 ( $\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ )	过氧化氢酶 ( $\text{mL}/(\text{g}\cdot\text{h})$ )
CK	0.73 ± 0.04 e	14.07 ± 2.10 f	24.57 ± 2.28 f	4.80 ± 0.32 e
T1	0.91 ± 0.06 d	21.42 ± 3.23 e	33.98 ± 4.31 e	6.17 ± 0.53 d
T2	1.06 ± 0.09 c	32.50 ± 2.82 d	40.95 ± 2.65 d	8.66 ± 0.89 c
T3	1.29 ± 0.07 b	42.74 ± 3.88 c	57.80 ± 4.52 c	11.13 ± 0.74 b
T4	1.45 ± 0.12 a	49.60 ± 2.53 b	65.26 ± 3.57 b	12.11 ± 0.63 ab
T5	1.56 ± 0.10 a	55.09 ± 3.48 a	71.50 ± 2.96 a	12.82 ± 0.84 a

## 3 讨论

饲蚓固废(蚯蚓粪)中微生物含量丰富, 而且含有

能够促进植物生长的其他成分, 可以提升植物的农艺性状<sup>[23]</sup>。赵永鑫等<sup>[24]</sup>研究表明, 配施 50% 饲蚓固废可以显著提高小白菜产量。路迎奇等<sup>[13]</sup>研究表明, 番茄株高、茎粗随饲蚓固废用量的增加而增加, 适宜的饲蚓固废用量可以提高番茄单株产量达 23.1%, 番茄商品性也有所提升。李婉茹等<sup>[11]</sup>研究表明, 合适的饲蚓固废施用量能够显著增加薄皮甜瓜茎粗、根蔓鲜重及干重, 显著提高果型指数、单瓜质量和产量。王恩煜等<sup>[10]</sup>研究表明, 适宜用量的饲蚓固废与化肥配施在不影响西瓜产量的基础上显著提高西瓜商品性。本研究结果也表明, 饲蚓固废能够促进小白菜生长, 增加叶片数, 地上部和地下部鲜重均增加, 提高小白菜产量, 相较对照, T5 处理叶片数增加 43.8%、株高最高增幅 39.8%、地上部鲜重增幅达 101.0%。饲蚓固废之所以能够提高小白菜产量, 根据李婉茹等<sup>[11]</sup>和王恩煜等<sup>[10]</sup>的研究结果推测, 饲蚓固废含有充足的营养能够促进植物合成足够的叶绿素进而促进光合作用, 促进作物生长。此外, 饲蚓固废含有丰富的微生物, 也能够激发土壤酶活性和植株根系活力, 进而促进植物对养分的吸收利用; 且饲蚓固废养分利用率相比化肥更高, 具有不易挥发、难淋洗、肥效周期长的优良特性。

蔬菜中的维生素 C、可溶性糖、硝酸盐含量是评价其品质的重要指标, 较高的维生素 C、可溶性糖和可溶性蛋白提升蔬菜的营养价值, 硝酸盐含量越低则对人体更有益。赵永鑫等<sup>[24]</sup>研究表明, 饲蚓固废配施比例为 50% 可以显著提高小白菜可溶性糖、维生素 C 含量, 显著降低硝酸盐含量。王恩煜等<sup>[10]</sup>研究表明, 优化施肥配施饲蚓固废可以促进西瓜可溶性固形物的积累以及糖酸比的提高, 可显著提高西瓜维生素 C、可溶性蛋白含量, 其中以每  $667 \text{ m}^2$  施用饲蚓固废 500 kg 处理西瓜风味品质最佳。在大棚连作黄瓜试验中得到了类似结果, 冯腾腾等<sup>[16]</sup>研究结果表明, 施用饲蚓固废对连作黄瓜的品质有显著影响, 与不添加饲蚓固废处理相比, 可以显著提高可溶性固形物、可溶性糖、可溶性蛋白、有机酸、维生素 C 等品质指标。饲蚓固废与无机肥以质量比 1:30 配施与单施无机复混肥相比, 可以显著提高温室大棚黄瓜的糖酸比及维生素 C、可溶性蛋白、可溶性糖及可溶性固形物含量, 降低黄瓜硝酸盐含量<sup>[17]</sup>。根据上述研究结果可知, 饲蚓固废配施可以提高多数经济作物的产量和品质。本研究得到了类似的结果, 施用饲蚓固废可显著提高小白菜维生素 C、可溶性糖、可溶性蛋白含量, 显著降低硝酸盐含量。推测这几类物质含

量的提高与小白菜较强的光合作用有关,说明饲蚓固废能够促进小白菜体内合成叶绿素进而提高光合作用,为合成转化维生素C、可溶性糖、可溶性蛋白提供物质基础。维生素C的提高显著提升小白菜的营养价值和商品价值。可溶性糖是植物重要的能量来源,参与植物的生长调节和基因表达,可溶性蛋白也为植物体内重要的营养物质和渗透调节物质,其含量的提高能够增强植物的保水能力。可溶性糖及可溶性蛋白含量的提高为抵御环境胁迫打下基础,因而饲蚓固废能够促进设施小白菜生长、提高产量、改善品质。本试验结果显示,各个处理小白菜硝酸盐含量普遍偏高,其中对照含量最高,这可能与设施土壤氮含量过高有关,这也是设施栽培中存在的突出问题,种植户为了高产施用过量化肥,而肥效往往不能很好利用,从而导致土壤出现次生盐渍化、作物中硝酸盐含量过高的现象。饲蚓固废的施用可以很好地改善这种现象,次生盐渍化得到抑制,作物中硝酸盐含量大幅度降低。

现有研究表明,饲蚓固废、鸡粪等有机肥能够改善土壤理化性质<sup>[25-27]</sup>,提高土壤微生物生物量以及土壤酶活性<sup>[17,28]</sup>。本研究取得了一致结果,饲蚓固废显著提高了设施土壤中有机质、铵态氮、硝态氮、有效磷含量。土壤中微生物量生物碳的变化趋势与土壤有机质、硝态氮、有效磷等含量的变化趋势一致。推测饲蚓固废显著提高土壤养分,土壤有机质为微生物提供丰富的物质基础,铵态氮、硝态氮和有效磷是微生物直接吸收利用的养分形态<sup>[29]</sup>,加之饲蚓固废本身含大量活性物质包括微生物、生长激素、各种酶等,促进微生物自身合成和代谢<sup>[30]</sup>。同时,饲蚓固废质地疏松、表面积大,具有较好的团粒结构,能够增加土壤孔隙度、减小容重,利于微生物繁衍生息<sup>[31]</sup>、种群扩展。微生物生物量的增加促进有机物质分解、矿化和各种酶的产出,这为植物根系吸收土壤养分提供良好条件,进而促进植物生长发育,改善作物品质,提高产量。本试验结果与之吻合,随饲蚓固废施用量的增加,土壤微生物生物量碳含量增加,土壤酶活性增强,小白菜生物量增大,维生素C、可溶性糖和可溶性蛋白含量提高。孙萍等<sup>[32]</sup>和袁九香等<sup>[33]</sup>研究表明,饲蚓固废能够降低土壤的EC值,pH趋于中性,有效缓解和治理土壤次生盐渍化。高莹等<sup>[34]</sup>发现饲蚓固废能够改良土壤,降低土壤EC值和盐分总量。本研究得到同样结果,饲蚓固废能够改善设施土壤状况,pH趋于中性,水溶性盐总量(EC值)显著下降,说明饲蚓固废具有较强的缓冲性。推测这与饲蚓固废

含有种类丰富的有机物有关,其一,有机物在微生物的分解下产生有机酸,土壤中的阴离子在酸性介质条件下加速分解<sup>[35]</sup>,促进土壤脱盐;其二,有机质分解产生的腐殖酸和饲蚓固废中的烃类、酯类等与土壤中的可溶性盐发生可逆反应或者吸附到这些大分子上<sup>[33,36]</sup>;再者,植物吸收利用盐分中的营养元素(如钾、钠、钙等),饲蚓固废中的有机质促进微生物繁殖代谢过程中消耗部分盐分,进一步减少盐分含量。

## 4 结论

饲蚓固废可以改善设施土壤状况,提高作物产量,改善其品质。随着饲蚓固废添加量增多,土壤养分含量逐渐提高,土壤微生物生物量逐渐增加、呼吸增强,表明饲蚓固废具有较好的供肥保肥性和生态友好性,本试验条件下推荐饲蚓固废配比占6%作为设施小白菜生产使用量。生产实践中,建议在每茬小白菜种植时施入饲蚓固废,少量多次,逐步改良盐渍化设施土壤。

## 参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴: 2023[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- [2] 付文杰. 不同施肥处理对小白菜生长、产量和品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- [3] 董金龙, 徐烨红, 全智, 等. 中国设施种植土壤可持续利用的难点与应对策略[J]. 土壤学报, 2024, 61(6): 1467-1480.
- [4] 杨倩倩, 江解增, 吴恒锐, 等. 不同基肥、不同追肥施用量对设施叶菜产量和土壤盐渍化的影响试验初报[J]. 上海农业科技, 2023(3): 120-127.
- [5] 吕望, 张敬晓, 王艳华, 等. 日光温室土壤次生盐渍化研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2021(8): 112-116.
- [6] 蔡红明, 王仁杰, 王俊英, 等. 寿光设施蔬菜施肥及土壤养分现状分析[J]. 中国果菜, 2022, 42(6): 80-84.
- [7] 陈宝书, 陈本建, 张惠霞, 等. 蚯蚓粪营养成分的研究[J]. 四川草原, 1998(3): 22-24.
- [8] Edwards C A, Arancon N Q. Biology and ecology of earthworms[M]. Cham: Springer US, 2022.
- [9] Zhao H T, Li T P, Zhang Y, et al. Effects of vermicompost amendment as a basal fertilizer on soil properties and cucumber yield and quality under continuous cropping conditions in a greenhouse[J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(12): 2718-2730.
- [10] 王恩煜, 鄂森, 李婉茹, 等. 优化施肥配施蚯蚓粪有机肥对嫁接西瓜产量和品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2021, 34(5): 30-35.
- [11] 李婉茹, 郭延亮, 王恩煜, 等. 优化施肥配施蚯蚓粪有机肥对薄皮甜瓜产量和品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2021, 34(10): 67-73.

- [12] 郑世英, 郑建峰, 王宝泉, 等. 蚯蚓粪对草莓土壤肥力及产量和品质的影响[J]. 北方园艺, 2017(10): 16–20.
- [13] 路迎奇, 杨丽娟, 史津玮, 等. 蚯粪用量对温室番茄生长发育与产量和品质的调节[J]. 北方园艺, 2019(6): 77–82.
- [14] 刘学才, 陈玲, 李胜奇, 等. 施蚯蚓粪对日光温室土壤及番茄产量与品质的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(2): 549–556.
- [15] 丁守鹏, 张国新, 姚玉涛, 等. 蚯蚓粪生物炭配施对盐碱地设施番茄生长及光合作用的影响[J]. 北方园艺, 2021(18): 60–67.
- [16] 冯腾腾, 黄怀成, 陈飞, 等. 不同蚯蚓粪施用量对连作黄瓜农艺性状、产量和品质的影响[J]. 南方农业学报, 2018, 49(8): 1575–1580.
- [17] 赵海涛, 罗娟, 单玉华, 等. 蚯粪有机无机复混肥对黄瓜产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1288–1293.
- [18] 崔保伟. 蚯蚓粪混配基质的优化及其对黄瓜幼苗的影响[J]. 河南农业科学, 2020, 49(7): 75–81.
- [19] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 1 版. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [22] 姚槐应, 黄昌勇. 土壤微生物生态学及其实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [23] Zaller J G. Vermicompost as a substitute for peat in potting media: Effects on germination, biomass allocation, yields and fruit quality of three tomato varieties[J]. Scientia Horticulturae, 2007, 112(2): 191–199.
- [24] 赵永鑫, 赵吉霞, 范茂攀, 等. 不同比例蚯蚓粪替代化肥对土壤化学性状及小白菜产量和品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2022, 35(6): 62–68.
- [25] 卢云, 秦天扬, 陈玮峰, 等. 施用蚯粪对滨海盐碱地土壤有机碳库及其稳定性的影响[J]. 土壤, 2024, 56(4): 817–825.
- [26] 甘泉峰, 黄婷, 李媛, 等. 有机无机肥配施对滨海脱盐土栽培菊芋及其养分吸收的影响[J]. 土壤, 2023, 55(2): 262–271.
- [27] 明润廷, 万方, 那立萍, 等. 改良剂施用下的土壤降酸培肥效果——基于中国酸性土壤改良研究的 Meta 分析[J]. 土壤学报, 2025, 62(2): 400–410.
- [28] 周东兴, 宁玉翠, 徐明明, 等. 蚯蚓粪对温室黑土土壤酶活性及细菌多样性的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(4): 835–840.
- [29] 李香真, 曲秋皓. 蒙古高原草原土壤微生物量碳氮特征[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 91–98.
- [30] 王云霞, 马军. 不同林龄华北落叶松白桦混交林土壤微生物量碳氮含量研究[J]. 林业资源管理, 2018(4): 55–60.
- [31] 文都日乐, 李刚, 张静妮, 等. 呼伦贝尔不同草地类型土壤微生物量及土壤酶活性研究[J]. 草业学报, 2010, 19(5): 94–102.
- [32] 孙萍, 林贤锐, 鲍慧, 等. 有机肥对设施草莓土壤盐渍化及草莓生长的影响[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(8): 1298–1300.
- [33] 袁九香, 李晓鹏, 吴富松, 等. 蚯蚓粪有机肥对葡萄园土壤理化性状的影响[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(2): 169–171, 191.
- [34] 高莹, 孙喜军, 吕爽, 等. 不同改良剂对塑料大棚土壤理化性质及甜瓜品质的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(11): 51–58.
- [35] 郭丽琢, 陈文涛, 高玉红, 等. 不同改良剂对土壤盐渍化特性及燕麦生物排盐作用的影响[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(12): 1619–1629.
- [36] 王旋. 指纹图谱在蚯蚓粪化学成分研究中的应用[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.