

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

赵永鑫¹, 赵吉霞², 范茂攀², 王自林², 徐昆龙², 李永梅²

(1. 云南农业大学资源与环境学院 昆明 650201; 2. 云南农业大学 昆明 650201)

摘要: 为探究不同比例蚯蚓粪替代化肥对山原红壤土壤化学性状及小白菜产量和品质的影响, 在相同施氮量的条件下, 设置 4 个不同比例蚯蚓粪处理: 70% 化肥和 30% 蚯蚓粪(T30)、50% 化肥和 50% 蚯蚓粪(T50)、30% 化肥和 70% 蚯蚓粪(T70)、100% 蚯蚓粪(T100), 以常规施肥(CK)为对照, 测定小白菜收获后土壤肥力变化以及小白菜产量和品质指标。结果表明, 相较 CK, 不同比例蚯蚓粪替代化肥改善了土壤化学性状, 土壤全氮、速效磷、速效钾及有机质含量显著增加; 土壤 pH 除 T50 较 CK 无显著差异外, 其他处理土壤 pH 均较 CK 显著降低; T50 可在显著提高小白菜产量的同时增加可溶性糖和维生素 C 含量, 降低硝酸盐含量。综上所述, 50% 蚯蚓粪替代化肥可在云南地区小白菜生产中推广应用。

关键词: 小白菜; 土壤肥力; 产量; 品质

中图分类号: S634.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2022)06-062-07

Different proportion of vermicompost replacing chemical fertilizer affects soil chemical properties and yield and quality of Chinese cabbage

ZHAO Yongxin¹, ZHAO Jixia², FAN Maopan², WANG Zilin², XU Kunlong², LI Yongmei²

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, Yunnan, China; 2. Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, Yunnan, China)

Abstract: This experiment was conducted to explore the effects of different proportion of vermicompost replacing chemical fertilizer on soil chemical character and yield and quality of Chinese cabbage in montane red soil. Under the same amount of nitrogen four different proportion of vermicompost were tested, 70% chemical fertilizer and 30% vermicompost (T30), 50% chemical fertilizer and 50% vermicompost (T50), 30% chemical fertilizer and 70% vermicompost (T70), 100% vermicompost (T100). Changes of soil fertility and yield and quality indexes of Chinese cabbage after harvest were determined. The results showed that different proportions of vermicompost replacing chemical fertilizer improved soil chemical properties, and the contents of total nitrogen, available phosphorus, available potassium and organic matter in the soil were significantly increased. Soil pH was significantly lower than CK except T50. Compared with CK the yield of Chinese cabbage in T30, T50 and T70 treatments was increased by 90.06%, 190.64%, 129.90%, respectively. 50% vermicompost treatment significantly increased the yield of Chinese cabbage, increased soluble sugar content and vitamin C content, and decreased nitrate content. Therefore, the T50 treatment (N 15 kg·hm⁻², P₂O₅ 30 kg·hm⁻², K₂O 45 kg·hm⁻², vermicompost organic fertilizer 1 111.11 kg·hm⁻²) can be used to replace chemical fertilizer in Chinese cabbage production in Yunnan.

Key words: Chinese cabbage; Soil fertility; Yield; Quality

我国是世界上最大的蔬菜生产和消费国。2020 年, 我国蔬菜总产量超过 7 亿 t, 超过全球蔬菜产量的 50%^[1]。目前蔬菜生产仍然多以高产为目标, 而施用化肥作为提升蔬菜产量的主要途径, 在我国的农业生产中发挥着举足轻重的作用。但过

量施用化肥导致土壤次生盐渍化严重, 破坏耕地质量。此外, 长期施用化肥会导致土壤板结, 土壤结构被破坏, 作物生长严重受阻等问题^[2-4], 影响蔬菜的产量和品质, 进而破坏整个农田生态系统。而有机肥作为一种广泛应用的土壤改良剂, 具有提升农

收稿日期: 2022-01-04; 修回日期: 2022-05-02

基金项目: 云南省外专引智项目(YNS2019008); 云南省重点研发专项课题(2018BB015-04)

作者简介: 赵永鑫, 男, 在读硕士研究生, 主要从事土壤培肥研究。E-mail: 1975107023@qq.com

通信作者: 李永梅, 女, 教授, 主要从事坡耕地水土保持研究。E-mail: youngmaylee@126.com

作物产量、品质和改善土壤质量等方面的优势^[5]。因此,有机肥替代对维持土壤养分平衡,实现农业可持续发展具有重要意义。

蚯蚓粪作为蚯蚓堆肥化过程中产生的一种绿色生物有机肥,与常规有机肥在堆肥方式、场所等方面存在着诸多不同,这也导致蚯蚓粪在性质、构成及作用方面与常规有机肥存在差异。首先,蚯蚓堆肥化过程在蚯蚓的肠道内进行,不会经历高温,而普通有机肥则多在空旷场所经高温过程堆制产生,这也决定了蚯蚓粪中比普通有机肥更具有相对稳定的微生物群落结构。蚯蚓粪是一种具有自然泥土清香的细碎类物质,堆肥过程不像普通有机肥会产生气体污染、水体污染等问题^[6]。蚯蚓粪具有均一、多孔结构,且比表面积大,有很好的孔性、通气性、排水性和高持水量,富含多糖,对土壤团聚体的形成和保持具有积极作用^[7]。蚯蚓粪与土壤混合后可增进土壤与空气接触,改善土壤板结状况。蚯蚓粪多为中性偏碱性,研究表明,将蚯蚓粪施于酸性土壤或碱性土壤,最终土壤 pH 值会趋近于中性,适宜作物生长^[8]。此外,蚯蚓粪中含有大量的微生物,施入土壤可以降低作物根际真菌及病原菌丰度,增加细菌种群和丰度,保障土壤微生物群落结构的稳定性^[9]。

蚯蚓粪作为一种绿色生物有机肥,在提升作物产量和品质方面成效显著。有研究表明,将不同比例的蚯蚓粪施用于果园土和菜园土,能显著增加玉米株高、干物质量,其中以 20%比例蚯蚓粪的综合特征最优^[10]。在等氮量的前提下,30%~50%蚯蚓粪氮占比可以显著提高盆栽油麦菜产量^[11]。50%蚯蚓粪与 50%化肥配施可以显著改善桑树根际微域环境,桑叶产量得以大幅提升^[12]。蚯蚓粪和无机肥以质量比 1:30 复混较无机复混肥相比,能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^[13]。冯腾腾等^[14]在连作黄瓜大棚试验中也得到了类似结果。与单施化肥相比,蚯蚓粪替代 40%化肥显著增加了白菜和西蓝花的可溶性蛋白和维生素 C 含量,改善其品质^[15]。总的来讲,蚯蚓粪配施比例在 20%~50%之间时,多数经济作物可获得较好的产量和品质。

叶菜作为我国广泛种植的经济作物,约占蔬菜需求总量的 25%^[16]。小白菜具有生育期短,较耐低温和高温等特点,适应性强,在云南一年四季均可种植。红壤作为云南主要的耕作土壤,是我国重点

改良和研究的土壤^[17]。目前,关于蚯蚓粪不同比例替代化肥对云南红壤区土壤化学性状及叶菜产量和品质的效应尚不清楚。因此,笔者通过设置不同比例的蚯蚓粪替代化肥试验,研究对山原红壤土壤化学性状及小白菜产量、品质的影响,以期对云南山原红壤区优化田间管理、科学施用蚯蚓粪肥提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2021 年 4—6 月在云南省昆明市盘龙区云南农业大学大棚内进行。供试土壤为山原红壤,取自云南农业大学试验基地 0~20 cm 耕作土层;供试小白菜品种为农夫皇冠(河南欧兰德种业),类型为速生杂交小白菜,比较耐热耐湿,供试蚯蚓粪为蚯蚓消解牛粪得到。土壤及蚯蚓粪理化性质见表 1。

表 1 供试土壤和蚯蚓粪基本理化性质

项目	w(有机质)/ (g·kg ⁻¹)	w(全氮)/ (g·kg ⁻¹)	w(碱解氮)/ (mg·kg ⁻¹)	w(速效磷)/ (mg·kg ⁻¹)	w(速效钾)/ (mg·kg ⁻¹)	pH
山原红壤	28.00	1.81	151.00	14.40	359.00	7.24
蚯蚓粪	322.60	13.50	625.00	510.00	2 095.00	8.21

1.2 试验设计

盆栽试验采用完全随机设计,共设置 5 个处理,3 次重复,共 15 盆,大棚面积 10 m²,试验选用上口径 25 cm 育苗盆进行,每盆定植 5 株小白菜,株间距 5 cm,共计 75 株。在优化施肥的前提下,分别设置 CK:100%化肥;T30:70%化肥+30%蚯蚓粪;T50:50%化肥+50%蚯蚓粪;T70:30%化肥+70%蚯蚓粪;T100:100%蚯蚓粪。

每个处理的氮水平保持一致,化肥种类分别为尿素(N 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 12%)和硫酸钾(K₂O 50%),施肥量分别为每 kg 土施纯氮(N)0.2 g、纯磷(P₂O₅)0.2 g、纯钾(K₂O)0.3 g,其中,氮肥分为基肥和追肥各 50%共分 2 次施入,磷钾肥以及蚯蚓粪均做基肥一次性施入。各处理具体施肥情况见表 2。

表 2 施肥处理及具体施肥情况 (kg·hm⁻²)

处理	化肥			蚯蚓粪
	N	P	K	
CK	30.00	30.00	45.00	0.00
T30	21.00	30.00	45.00	666.67
T50	15.00	30.00	45.00	1 111.11
T70	9.00	30.00	45.00	1 555.56
T100	0.00	30.00	45.00	2 222.22

1.3 栽培管理

用育苗盆每盆装土 3 kg, 并与肥料混匀(蚯蚓粪和与风干后土壤均过 2 mm 筛孔)。常温催芽, 种子 50%露白时播种, 每盆播种 10 粒种子, 待发芽后幼苗长出 3~4 片叶时进行间苗, 每盆留苗 5 株。小白菜于 2021 年 4 月 25 日种植, 6 月 3 日收获。

1.4 样品采集及测定

各处理于 2021 年 6 月 3 日采集小白菜成熟期植株样品和土壤样品。每盆采集小白菜 5 株进行鲜样测产, 用试验室千分之一天平称质量后计算平均小白菜单株质量, 然后按每 667 m² 8889 株折算每 667 m² 产量。测产后立即进行植株可溶性糖、维生素 C 和硝酸盐含量测定。土壤样品从小白菜植株根系位置自上而下采 300 g 土壤样品, 带回实验室自然风干, 备用。土壤化学性状测定参考《土壤农化分析》^[18], 采用雷磁 PHS-3C 型酸度计测定土壤 pH($V_{水}:m_{土}=2.5:1$); 采用油浴加热重铬酸钾容量法测定土壤有机质含量; 采用海能 K9860 全自动凯氏定氮仪测定土壤全氮含量; 采用碱解扩散法测定碱解氮含量; 采用 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定速效磷含量; 采用 NH₄Ac 浸提-火焰光度法测定速效钾含量; 采用蒽酮比色法^[19]测定可溶性糖含量; 采用 2,6-二氯喹酚法^[20]测定维生素 C 含量; 采用水杨酸比色法^[21]测定硝酸盐含量。

1.5 统计分析

试验数据采用 Excel 2007 进行统计和作图。采用 SPSS 20.0 软件进行统计分析, 利用单因素方差分析(ANOVA)进行差异显著性分析, 采用 Canoco 5.0 软件进行冗余分析, 并用 R 4.0.2 进行置换多元方差分析(PERMANOVA)。

2 结果与分析

2.1 不同比例蚯蚓粪替代化肥对土壤化学性状的影响

2.1.1 不同比例蚯蚓粪替代化肥对土壤氮、磷、钾养分含量的影响 由表 3 可以看出, 随着蚯蚓粪替代比例的增加, 土壤全氮和碱解氮含量均呈逐渐上升趋势。T50、T70、T100 处理全氮含量分别较 CK 增加了 11.73%、12.35%、14.81%, 且差异显著。除 T100 外, 所有蚯蚓粪替代化肥处理的碱解氮含量均较 CK 处理无显著差异。土壤速效磷含量随着蚯蚓粪替代比例的增加呈先升高后降低趋势, 速效钾含量随蚯蚓粪替代比例的增加呈先升高后降低随后升高趋势。土壤速效磷含量在 T50 处理时达到最

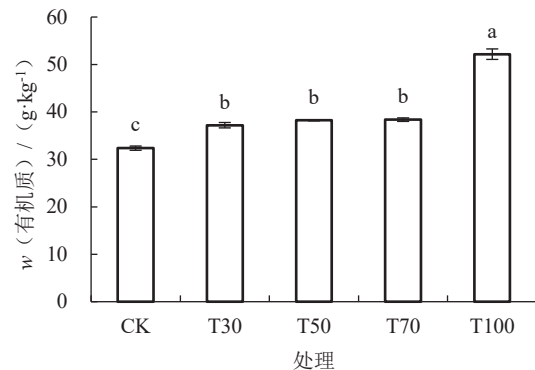
大, 为 26.86 mg·kg⁻¹。与 CK 处理相比, T50、T70 处理速效磷含量显著增加, 而 T30、T100 处理则与 CK 无显著差异。所有蚯蚓粪处理土壤速效钾含量均较 CK 处理显著增加, 其含量在 T30 时达到最大, 为 452.47 mg·kg⁻¹。

表 3 不同比例蚯蚓粪处理对小白菜收获期土壤养分含量的影响

处理	w(全氮)/ (g·kg ⁻¹)	w(碱解氮)/ (mg·kg ⁻¹)	w(速效磷)/ (mg·kg ⁻¹)	w(速效钾)/ (mg·kg ⁻¹)
CK	1.62±0.07 b	130.27±1.08 b	18.46±1.68 c	385.40±2.49 e
T30	1.63±0.08 b	133.00±2.04 ab	18.65±0.21 c	452.47±3.31 a
T50	1.81±0.01 a	133.00±3.49 ab	26.86±2.09 a	402.00±3.02 d
T70	1.82±0.08 a	135.80±2.25 ab	22.27±0.37 b	426.23±0.90 c
T100	1.86±0.06 a	136.50±2.45 a	21.41±0.91 bc	441.43±1.80 b

注: 表中数据为 3 次重复的平均值±标准差, 同列不同数字后小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。

2.1.2 不同比例蚯蚓粪替代化肥对土壤有机质含量的影响 由图 1 可以看出, 在小白菜成熟后土壤有机质含量呈现出随蚯蚓粪替代比例的增加而增加的趋势, T30、T50、T70、T100 处理土壤有机质含量均显著高于 CK 处理, 分别较 CK 处理增加 14.92%、18.10%、18.54%、61.17%, 而 T30、T50、T70 各处理间无显著差异。土壤有机质含量以 T100 处理达到最大, 为 52.17 g·kg⁻¹。



注: 不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。下同。

图 1 不同蚯蚓粪处理对土壤有机质含量的影响

2.1.3 不同比例蚯蚓粪替代化肥对土壤 pH 的影响 由图 2 可以看出, 各处理间土壤 pH 表现为 T50=CK>T100>T70>T30。土壤的 pH 以 CK、T50 为最高, T30、T70、T100 处理 pH 均较 CK 处理显著降低, 且 T30 与 T70、T70 与 T100 处理之间无显著差异。在所有蚯蚓粪替代化肥处理中, 蚯蚓粪替代比例为 50%时, 土壤 pH 值最高, 为 6.82。

2.2 不同比例蚯蚓粪替代化肥对小白菜产量的影响

由图 3 可以看出, 各处理间小白菜产量表现为

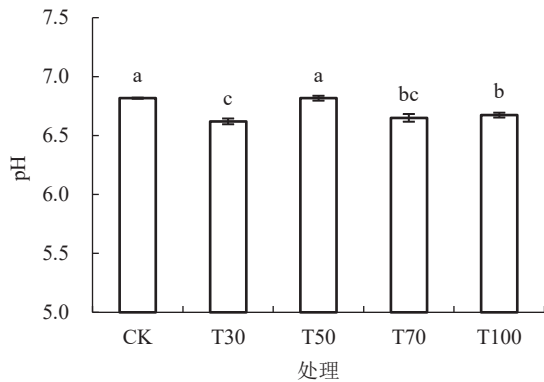


图2 不同蚯蚓粪处理对土壤 pH 的影响

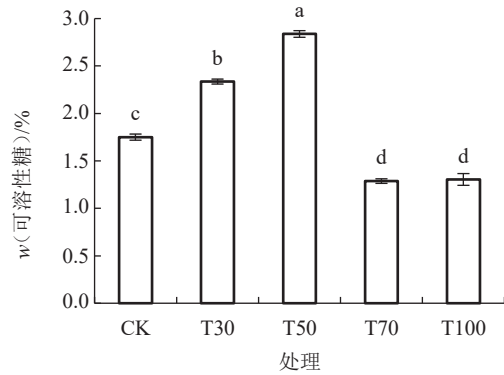


图4 不同蚯蚓粪处理对小白菜可溶性糖含量的影响

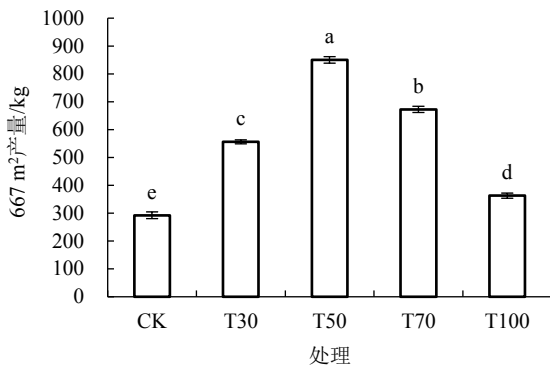


图3 不同蚯蚓粪处理对小白菜产量的影响

T50>T70>T30>T100>CK,小白菜产量呈现出随着蚯蚓粪替代比例的增加先升高后降低趋势。蚯蚓粪替代比例为0%~50%时,小白菜产量迅速增加,在施用50%蚯蚓粪时,小白菜产量达到最大,667 m²产量为850.23 kg。自此随着蚯蚓粪替代比例增加,小白菜产量开始下降。T30、T50、T70、T100处理小白菜产量均显著高于CK处理。其中T30、T50、T70处理小白菜产量分别较CK处理显著增加了90.08%、190.65%、129.91%。综上所述,一定比例的蚯蚓粪替代化肥可以显著提高小白菜产量,其中以T50处理效果为最佳。

2.3 不同比例蚯蚓粪替代化肥对小白菜品质的影响

2.3.1 不同比例蚯蚓粪替代化肥对小白菜可溶性糖含量的影响 由图4可以看出,随着蚯蚓粪替代比例的增加,小白菜可溶性糖含量呈先升高后降低趋势。各处理间的小白菜可溶性糖含量表现为:T50>T30>CK>T100>T70,其中T30、T50处理小白菜可溶性糖含量分别较CK处理显著增加33.71%和62.29%。T50处理小白菜可溶性糖含量达到最大,为2.84%。当蚯蚓粪替代比例超过50%时,可溶性糖含量开始显著降低。相较于CK处理,30%和50%蚯蚓粪替代量可显著提高小白菜可溶性

糖含量。而当蚯蚓粪替代量达到70%和100%时,小白菜可溶性糖含量则较CK处理显著降低。综上所述,30%和50%比例蚯蚓粪替代化肥可以显著提高小白菜可溶性糖含量,但当蚯蚓粪比例过高时则可能降低其含量。

2.3.2 不同比例蚯蚓粪替代化肥对小白菜维生素C含量的影响 由图5可以看出,各处理间小白菜维生素C含量为T50>T70>T100>T30>CK,且呈现出随着蚯蚓粪替代比例的增加先升高后降低趋势。T30、T50、T70、T100处理小白菜维生素C含量较CK处理均有所增加,其中T50、T70处理较CK处理显著增加67.40%、29.28%,T30、T100处理则与CK处理之间无显著差异。小白菜维生素C含量以T50处理为最高,为24.24 mg·100 g⁻¹。总体来讲,施用50%、70%比例蚯蚓粪替代化肥,可以显著提高小白菜中维生素C含量,使其营养价值得到改善,其中,以施用50%蚯蚓粪效果最佳。

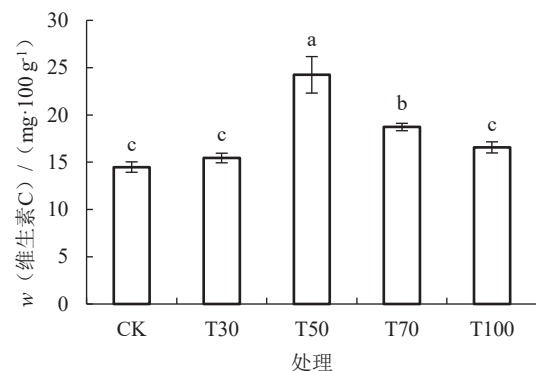


图5 不同蚯蚓粪处理对小白菜维生素C含量的影响

2.3.3 不同比例蚯蚓粪替代化肥对小白菜硝酸盐含量的影响 由图6可以看出,各处理间小白菜硝酸盐含量表现为CK>T30>T70>T100>T50,且小白菜硝酸盐含量随着蚯蚓粪替代比例的增加呈现出先降低后升高再降低的趋势,在蚯蚓粪替代比

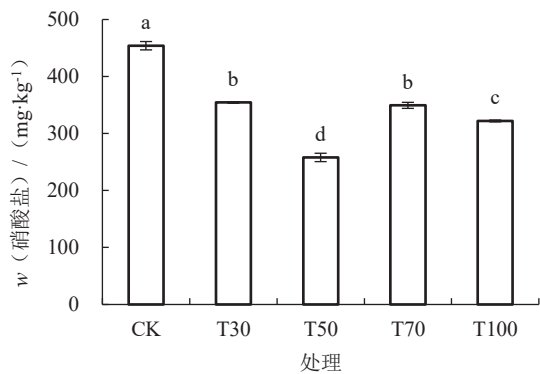


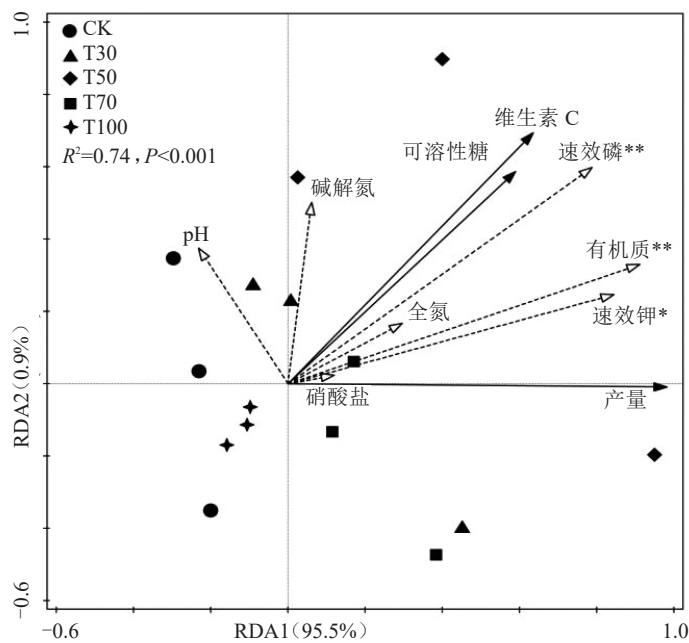
图6 不同蚯蚓粪处理对小白菜硝酸盐含量的影响

例为50%时达到最低值。与CK处理相比,T30、T50、T70、T100处理硝酸盐含量均有所降低,且差异显著。CK处理小白菜硝酸盐含量最高,达到454 mg·kg⁻¹,含量高于国际粮农组织关于蔬菜

中硝酸盐一级限量标准的432 mg·kg⁻¹,随着蚯蚓粪施入,小白菜硝酸盐含量下降,T30、T50、T70、T100处理小白菜硝酸盐含量分别为354.33、258、349.33、322 mg·kg⁻¹,均低于国际限量标准。由此可见,一定比例蚯蚓粪替代化肥可以显著降低小白菜硝酸盐含量,进而改善其品质。

2.4 土壤环境因子与小白菜产量和品质的关系

由图7冗余分析表明,土壤环境因子解释了两轴总变异的96.4%。通过蒙特卡罗置换检验来评估环境因子对小白菜产量和品质变化的贡献度,结果表明,土壤有机质(82.5%)、速效磷(10.4%)和速效钾(2.4%)含量是影响小白菜产量和品质的主要环境因子($P<0.05$)。多元置换方差分析的结果表明,不同施肥处理下的土壤性状和小白菜产量和品质存在极显著的差异。



注:*表示土壤理化性状与小白菜产量和品质显著相关,其中,*表示 $p<0.05$,**表示 $p<0.01$ 。

图7 土壤环境因子与小白菜产量和品质的冗余分析

3 讨论与结论

有研究表明,大量长期单施化肥甚至会带来土壤有机质含量降低的负面影响^[22]。本试验结果表明,与CK相比,蚯蚓粪替代化肥均可以显著提升土壤有机质含量,且随着蚯蚓粪替代化肥比例的增加,土壤有机质含量随之增加。葛立傲等^[23]研究表明,与常规施肥相比,蚯蚓粪与化肥减量配施显著提高了设施青菜土壤中的有机质含量,这与本研究结果一致。蚯蚓粪能提高土壤中有机质含量,究其

原因一方面是因为蚯蚓粪本身有机质含量丰富,另一方面可能是蚯蚓粪分解产生有机酸,进一步通过酸溶作用促进矿物分解以及养分释放,并通过螯合作用使矿质养分有效性得到提高^[24]。除T50处理土壤pH较CK处理无显著差异外,T30、T70、T100处理pH值均显著降低,土壤的pH值有所下降但总体趋于中性。有研究表明,蚯蚓粪有较大的酸碱缓冲容量^[25],使碱性土壤pH值下降,使酸性土壤pH值上升,最终使土壤pH值趋于中性,为作物生长提供更好的微域环境。本试验中,碱性蚯蚓粪施入中性

偏碱性土壤后土壤 pH 有所降低,导致这种现象的原因可能是有机改良剂分解过程中产生的有机酸的酸溶作用或者是加剧了盐分的渗透和淋失^[26]。然而,土壤 pH 在 6~7 之间似乎促进了养分对植物的有效性,因此蚯蚓粪是一种合适的土壤改良剂。此外,本试验中土壤全氮、碱解氮、速效磷、速效钾养分含量提升可能也得益于蚯蚓粪在土壤中的分解过程。蚯蚓粪施入土壤在增加土壤养分含量的同时也可以增加土壤中微生物及活性进而提高养分分解释放^[27]。但蚯蚓粪替代比例偏高则不能满足小白菜前期对养分的需求,这也是为何随着蚯蚓粪替代比例的增加土壤的速效磷、钾含量并不随之提高的原因,这是由肥料特性所决定的,化肥可以快速增加作物生长所需的各种速效养分含量,而蚯蚓粪有机肥中养分释放过程则比较缓慢^[28]。综上所述,30%~50%蚯蚓粪替代化肥能有效平衡化肥和蚯蚓粪的优缺点,化肥能保证作物前期的速效养分供应、减少淋溶,蚯蚓粪又能缓慢释放养分,保障小白菜后期的养分供应。

蚯蚓粪富含大量的有益微生物和植物生长调节物质,可以改善作物的农艺性状^[29]。王恩煜等^[30]研究表明,每 667 m² 西瓜配施蚯蚓粪 500 kg,可以保证在不降低产量的基础上显著提升西瓜维生素 C 含量、可溶性蛋白含量、还原糖含量等品质属性,进而改善西瓜品质。与单施化肥或单施蚯蚓粪相比,蚯蚓粪和化肥按体积比 1:1 混施后洋葱的鳞茎大小、鳞茎总数及所有鳞茎鲜质量均有增加,同时混合处理洋葱叶片中总叶绿素、类胡萝卜素等含量也显著增加,并且蚯蚓粪和化肥混施处理也使土壤有更好的土壤肥力以及生物活性,在降低洋葱栽培成本的同时维持了土壤健康^[31]。本研究表明,蚯蚓粪替代化肥能在增加小白菜产量的同时在一定程度上提高小白菜维生素 C 和可溶性糖含量,并降低硝酸盐含量。在各处理中,T50 处理小白菜产量品质最优。有研究表明,50%有机肥替代化肥在辣椒产量品质方面要优于单施有机肥^[32],这与本试验结果相似。造成这种结果的原因可能是作物生长前期对氮肥的需求较旺盛,而蚯蚓粪养分释放具有缓释性。T70 和 T100 处理前期养分无法得到有效供应,而 T50 处理既能保证小白菜前期的养分供应,蚯蚓粪的缓释性又能为小白菜生长后期提供保障,故而产量更高、品质更优。有研究表明,蚯蚓粪中富含各类氨基酸,氨基酸态氮的投入可通过对硝酸还原酶的抑制作用使作物中硝酸盐含量明显下降,

配施化肥后使氮素的供应形态发生变化,这可能是导致小白菜硝酸盐含量下降的原因^[31]。此外,蚯蚓粪中富含谷氨酸、甘氨酸等必需氨基酸,可通过作物根部参与到可溶性糖代谢过程,促进作物茎、叶可溶性糖含量提升^[33]。此外,可能是蚯蚓粪的施入提高了土壤氮循环酶的活性,提高了作物对氮素的利用率,从而促进了作物的产量、品质的提高^[15]。

综上所述,不同比例蚯蚓粪替代化肥对云南高原红壤区土壤化学性状及小白菜产量和品质的影响存在剂量效应,其中,50%蚯蚓粪替代化肥可有效改善土壤化学性状,而不会对土壤 pH 产生显著影响,同时可以在提高小白菜产量的情况下增加其植株可溶性糖含量及维生素 C 含量,降低硝酸盐含量,改善小白菜的品质。土壤有机质、速效磷及速效钾是小白菜产量和品质综合影响因子。本试验为盆栽试验,试验结果具有一定的局限性,还需开展田间试验进一步探究蚯蚓粪替代在小白菜种植中的最适比例,并对影响小白菜产量、品质的关键因子及其机制开展深入研究。

参考文献

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴(2021)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [2] 付浩然, 李婷玉, 曹寒冰, 等. 我国化肥减量增效的驱动因素探究[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(3): 561-580.
- [3] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327 (5968): 1008-1010.
- [4] 刘钦普. 中国化肥施用强度及环境安全阈值时空变化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 214-221.
- [5] 荀卫兵, 王伯仁, 冉炜, 等. 不同施肥制度对南方旱地红壤微生物组结构和功能影响研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(4): 537-544.
- [6] 庞博文, 李永梅, 徐昆龙, 等. 蚯蚓堆肥影响土壤健康和作物生长的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(12): 29-35.
- [7] 李彦霁, 邵明安, 王娇. 蚯蚓粪施用量对黄土区典型土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(3): 90-98.
- [8] MA VALDEZ-PÉREZ, FERNANDEZ-LUQUENO F, FRANCO-HERNAN-DEZ O, et al. Cultivation of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) in limed or unlimed wastewater sludge, vermicompost or inorganic amended soil[J]. Scientia Horticulturae, 2011, 128(4): 380-387.
- [9] 单颖, 赵凤亮, 邹刚华, 等. 施用不同配比蚯蚓粪对海南耕地砖红壤肥力特性的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(S1): 338-342.
- [10] 张聪俐, 戴军, 周波, 等. 不同比例蚯蚓粪对玉米生长以及土壤肥力特性的影响[J]. 华南农业大学学报, 2013, 34(2): 137-143.
- [11] 刘鸣达, 王秋凝, 魏佳伦, 等. 羊粪-菇渣蚯蚓粪与化肥配施对油菜产量及品质的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(6):

- 1760-1766.
- [12] 张志林,秦和生,何梦秀,等. 蚯蚓粪配施化肥对桑树根际土壤生物学特征及桑叶产量和品质的影响[J]. 西南农业学报, 2020,33(2):357-362.
- [13] 赵海涛,罗娟,单玉华,等. 蚓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.
- [14] 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.
- [15] 杨凯,董青君,李其胜,等. 餐厨蚓粪替代化肥对白菜和西兰花光合、抗氧化性及品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021,40(5):934-942.
- [16] 王庆彬,刘治国,聂振田,等. 宛氏拟青霉提取物(ZNC)提高小白菜抗盐碱胁迫能力[J]. 植物生理学报, 2021,57(6):1291-1299.
- [17] 黄国勤,赵其国. 红壤生态学[J]. 生态学报, 2014,34(18):5173-5181.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2008.
- [19] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业出版社,2003.
- [20] 阎树刚,韩涛. 果蔬及其制品中维生素C测定方法的评价[J]. 中国农学通报, 2002,18(4):110-112.
- [21] 赵倩,石晓勇,陈月红,等. 水杨酸浓硫酸比色法测定浒苔中硝酸盐含量[J]. 海洋学报, 2017,39(2):112-119.
- [22] CUI X W, ZHANG Y Z, GAO J S, et al. Long-term combined application of manure and chemical fertilizer sustained higher nutrient status and rhizospheric bacterial diversity in reddish paddy soil of Central South China[J]. Scientific Reports, 2018,8:16554.
- [23] 葛立傲,刘小英,罗杰,等. 蘑菇渣和蚯蚓粪对大棚土壤理化性质和青菜生长的影响[J]. 中国瓜菜, 2020,33(9):54-56.
- [24] LIM S L, WU T Y, LIM P N, et al. The use of vermicompost in organic farming: overview, effects on soil and economics[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015,95(6):1143-1156.
- [25] FERNÁNDEZ-BAYO J D, NOGALES R, ROMERO E. Assessment of three vermicomposts as organic amendments used to enhance diuron sorption in soils with low organic carbon content [J]. European Journal of Soil Science, 2009,60(6):935-944.
- [26] MANIVANNAN S, BALAMURUGAN M, PARTHASARATHI K, et al. Effect of vermicompost on soil fertility and crop productivity--beans (*Phaseolus vulgaris*) [J]. Journal of Environmental Biology, 2009,30(2):275-281.
- [27] 周星,陈骋,常海娜,等. 蚓堆肥热干扰后对土壤质量和作物生长的影响[J]. 土壤学报, 2020,57(1):142-152.
- [28] 马宜林,吴广海,申洪涛,等. 羊粪有机肥与化肥配施对烤烟生长及土壤肥力特性的影响[J]. 核农学报, 2021,35(10):2423-2430.
- [29] 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.
- [30] 王恩煜,郜森,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.
- [31] SRIVASTAVA P K, GUPTA M, UPADHYAY R K, et al. Effects of combined application of vermicompost and mineral fertilizer on the growth of *Allium cepa* L. and soil fertility[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2012,175(1):101-107.
- [32] 余高,陈芬,谢英荷,等. 化肥减施、有机肥配施对辣椒产量及品质的影响[J]. 北方园艺, 2020(4):47-53.
- [33] 张舒玄,聂欣,常江杰,等. 牛粪蚯蚓堆肥基质对草莓生长的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(3):61-68.