

朱楠, 仇美华, 范新会, 等. 有机肥部分替代化肥对设施菜地蔬菜产量及土壤质量的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(6): 1004-1011.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2024.06.006

有机肥部分替代化肥对设施菜地蔬菜产量及土壤质量的影响

朱楠¹, 仇美华², 范新会², 颜士敏², 周园园³, 李云龙¹, 梁永红², 柏彦超¹
(1.扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225127; 2.江苏省耕地质量与农业环境保护站, 江苏 南京 210029; 3.昆山市
优来谷成科创中心, 江苏 昆山 215300)

摘要: 为探明有机肥部分替代化肥对设施菜地蔬菜产量及土壤质量的影响, 明确最佳有机肥替代化肥比例, 依托昆山设施蔬菜长期施肥试验, 设置 7 个处理: 不施肥对照(CK)、有机肥替代化肥比例 0(T1)、20%(T2)、30%(T3)、40%(T4)、50%(T5) 和 60%(T6), 研究不同施肥处理对设施不结球白菜及下茬芹菜株高、产量、种植后土壤理化性质及经济效益的影响。结果表明: (1) 有机肥部分替代化肥对设施不结球白菜、芹菜的生长及产量提升均表现出明显的促进作用(T6 处理除外); 相较于 CK, T3 处理设施不结球白菜及芹菜的 1 hm² 平均产量分别增加 37.1% 及 30.4%, 显著高于其他处理。(2) 与单施化肥处理(T1) 相比, T6 处理土壤 pH 显著升高, 而电导率显著降低; 土壤养分方面, T3 处理对设施菜地土壤养分(有机质、总氮、总磷) 含量的提升效果最为明显; 主成分分析结果显示, 有机肥部分替代化肥处理, T3 处理土壤理化性质明显区别于其他处理, 且电导率、有机质含量、总氮含量可能是影响有机肥部分替代化肥处理设施菜地土壤质量的关键因素; 方差分解分析结果显示, 土壤 pH 及电导率对不结球白菜产量的解释度为 26.3%, 是有机肥部分替代化肥处理影响设施不结球白菜产量的主效应因素; 土壤养分(有机质、总氮、总磷) 含量是影响下茬芹菜产量的主要因子, 其对有机肥部分替代化肥处理设施芹菜产量变化的解释度达 22.6%。(3) 有机肥部分替代化肥处理对设施蔬菜净收益提升效果明显, 其中 T3 处理设施不结球白菜及芹菜净收益最高, 较 CK 分别增加 36.8% 及 29.0%。综上所述, 有机肥部分替代化肥是一项具有缓解设施菜地土壤酸化及次生盐渍化, 培肥改良土壤, 促进设施蔬菜增产、增收潜力的农业措施。其中, 有机肥替代化肥比例 30% 对设施蔬菜产量及土壤质量提升的综合效果最佳, 可能是保障昆山地区设施蔬菜丰产, 并有效降低化肥施用量的最佳有机肥-化肥配施比例。

关键词: 有机肥; 化肥; 设施蔬菜; 产量; 土壤质量

中图分类号: S365 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2024)06-1004-08

Effects of partial substitution of chemical fertilizers with organic fertilizers on vegetable yield and soil quality in greenhouse vegetable fields

ZHU Nan¹, QIU Meihua², FAN Xinhui², YAN Shimin², ZHOU Yuanyuan³, LI Yunlong¹,
LIANG Yonghong², BAI Yanchao¹

收稿日期: 2023-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977089); 江苏现代农业(蔬菜)产业技术体系废弃资源利用项目[JATS(2020)311、JATS(2021)348、JATS(2022)352]; 扬州市“绿扬金凤计划”项目(YZLYJFJH2021YXBS134)

作者简介: 朱楠(1999-), 女, 江苏扬州人, 硕士研究生, 研究方向为土壤改良与利用。(E-mail) zZN0603@163.com

通讯作者: 柏彦超, (E-mail) ycbai@yzu.edu.cn

(1. College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2. Jiangsu Farmland Quality and Agricultural Environmental Protection Station, Nanjing 210029, China; 3. Kunshan Youlai Gucheng Science and Technology Innovation Center, Kunshan 215300, China)

Abstract: In order to explore the effects of partial replacement of chemical fertilizers by organic fertilizers on vegetable yield and soil quality in facility vegetable fields,

and to determine the optimal proportion of organic fertilizers replacing chemical fertilizers, this study relied on the long-term fertilization experiment of facility vegetables in Kunshan, and set up seven treatments: no fertilization control (CK), organic fertilizers replacing chemical fertilizers at proportions of 0 (T1), 20% (T2), 30% (T3), 40% (T4), 50% (T5) and 60% (T6). The effects of different fertilization treatments on plant height and yield of non-heading Chinese cabbage and celery, soil physical and chemical properties and economic benefits were studied. The results showed that the partial replacement of chemical fertilizer by organic fertilizer significantly promoted the growth and yield of non-heading Chinese cabbage and celery (except T6 treatment). Compared with CK, the average yield per hectare of non-heading Chinese cabbage and celery in T3 treatment increased by 37.1% and 30.4%, respectively, and was significantly higher than that in other treatments. Compared with T1 treatment, the soil pH of T6 treatment increased significantly, while EC decreased significantly. In terms of soil nutrients, T3 treatment had the most obvious effect on the improvement of soil nutrients (organic matter, total nitrogen, total phosphorus) in greenhouse vegetable fields. The results of principal component analysis showed that the soil physical and chemical properties of T3 treatment were significantly different from those of other treatments, and the electrical conductivity, organic matter content and total nitrogen content might be the key factors affecting the soil quality of greenhouse vegetable field under the treatments of partial replacement of chemical fertilizers by organic fertilizers. The results of variance decomposition analysis showed that soil pH and electrical conductivity explained 26.3% of the yield of non-heading Chinese cabbage. Soil pH and electrical conductivity were the main factors affecting the yield of non-heading Chinese cabbage under the treatments of partial replacement of chemical fertilizers by organic fertilizers. The content of soil nutrients (organic matter, total nitrogen, total phosphorus) was the main factor affecting the yield of celery, and its explanation for the change of celery yield under the treatments of partial replacement of chemical fertilizers by organic fertilizers was 22.6%. The treatments of partial replacement of chemical fertilizers by organic fertilizers had a significant effect on the net income of facility vegetables. The net income of non-heading Chinese cabbage and celery in T3 treatment was the highest, which was 36.8% and 29.0% higher than that in CK, respectively. In summary, the partial replacement of chemical fertilizers by organic fertilizers was an agricultural measure that had the potential to alleviate soil acidification and secondary salinization in greenhouse vegetable fields, improve soil fertility, and promote the yield and income of greenhouse vegetables. The treatment of replacing 30% chemical fertilizers with organic fertilizers had the best comprehensive effect on the improvement of facility vegetables yield and soil quality. It might be the best combination of organic fertilizers and chemical fertilizers to ensure the high yield of facility vegetables in Kunshan area and effectively reduce the amount of chemical fertilizers.

Key words: organic fertilizer; chemical fertilizer; facility vegetable; yield; soil quality

中国是世界上最大的蔬菜生产国和消费国^[1]。为提高蔬菜生产效率,化肥施用逐渐成为生产上缓解蔬菜供需矛盾、保障农户增产增收的重要技术手段。然而,长期过量施用化肥极易引起土壤养分失调,土壤酸化、次生盐渍化加剧,进而导致土壤肥力和生产力水平大幅下降,成为制约设施蔬菜产业可持续发展的重要瓶颈^[2]。因此,开展化肥减量增效,推进蔬菜高产肥料运筹是设施蔬菜产业可持续发展的重要课题。

有机肥部分替代化肥可以有效缓解化肥过量施用诱发的土壤障碍和农业面源污染问题,是实现资源绿色循环利用、蔬菜产业可持续发展的重要农业实践^[3]。相关研究结果表明,有机肥部分替代化肥可以有效改善土壤理化性状,提升土壤肥力水平,保障土壤养分供应,从而提高作物品质和产量^[4-6]。然

而,多茬种植条件下,有机肥部分替代化肥对设施蔬菜的供肥时效及其对设施菜地土壤质量的影响程度等尚不清楚。鉴于此,本研究依托设施蔬菜长期施肥试验,研究在等氮量条件下,不同的有机肥替代化肥比例对设施蔬菜(不结球白菜及下茬芹菜)产量及土壤质量的影响,以期探明最佳的有机肥替代化肥比例,为设施蔬菜的化肥减量增效及设施菜地土壤质量提升提供理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点为江苏省昆山市玉叶智慧农业产业园(120°51'E, 31°20'N),该地属北亚热带南部季风气候区。年平均气温 17.6℃,年平均降水量 1 200.4 mm,全年无霜期 239 d。本研究有机肥部分替代化

肥小区试验于产业园 A9 号新建大棚内进行。

1.2 试验材料

供试化肥购自昆山农业生产资料有限公司(N 含量 15%, P_2O_5 含量 15%, K_2O 含量 15%); 供试有机肥购自南通尔康生物有机肥有限公司(有机质含量 42.35%, N 含量 2.00%, P_2O_5 含量 1.43%, K_2O 含量 1.61%)。供试作物: 不结球白菜, 品种为金品 28; 芹菜, 品种为玉香 1 号。供试不结球白菜和芹菜种子供种单位均为昆山市优来谷成科创中心。

1.3 试验设计

在等氮量条件下, 开展不同比例的有机肥替代

化肥试验。试验设置 3 组共 7 个处理, 分别为: (1) 不施肥空白对照 (CK); (2) 单施化肥处理 (T1); (3) 有机肥部分替代化肥处理组: 替代比例分别为 20% (T2)、30% (T3)、40% (T4)、50% (T5) 和 60% (T6)。各处理分别设置 3 个生物学重复区, 各小区面积为 8 m^2 ($2\text{ m} \times 4\text{ m}$), 完全随机区组排列。各小区间设置隔离行, 防止窜水窜肥。有机肥和化肥分别按照试验设计用量以基施和追施方式一次性施入土壤(表 1)。分别于 2021 年 4 月和 2021 年 7 月进行不结球白菜和芹菜种子撒播, 其他管理措施执行当地农户的高产设施蔬菜技术规范。

表 1 试验设计

Table 1 Test design

处理	化肥				有机肥			
	施用量 (kg/hm^2)	纯养分用量 (kg/hm^2)			施用量 (kg/hm^2)	纯养分用量 (kg/hm^2)		
		N	P_2O_5	K_2O		N	P_2O_5	K_2O
CK	0	0	0	0	0	0	0	0
T1	300	45.00	45.00	45.00	0	0	0	0
T2	240	36.00	36.00	36.00	450	9.00	6.44	7.25
T3	210	31.50	31.50	31.50	675	13.50	9.65	10.87
T4	180	27.00	27.00	27.00	900	18.00	12.87	14.49
T5	150	22.50	22.50	22.50	1 125	22.50	16.09	18.11
T6	120	18.00	18.00	18.00	1 350	27.00	19.31	21.74

CK: 不施肥空白对照; T1: 单施化肥; T2~T6: 有机肥替代化肥比例分别为 20%、30%、40%、50%、60%。

1.4 样品采集及测定

1.4.1 植株样品采集及测定 不结球白菜和芹菜成熟后, 采集代表性植株样品测定株高; 各小区实收测产, 并根据小区面积和小区产量折算每公顷产量 (t/hm^2)。

1.4.2 土壤样品采集及测定 待作物收获后, 按照“五点取样法”分别采集各小区耕层土壤。土壤样品过 2 mm 筛混匀后测定其 pH、电导率 (EC) 及有机质 (SOM)、全氮 (TN)、全磷 (TP) 含量。分别采用电极法和电导法对土壤 pH (土水比 1.0 : 2.5, 重量比) 和 EC (土水比 1 : 5, 重量比) 进行测定, 采用 H_2SO_4 - $K_2Cr_2O_7$ 湿烧法、凯氏定氮法、钼蓝比色法对土壤 SOM、TN、TP 含量进行测定。试验前棚内耕层 (0~20 cm) 土壤基本理化性质: pH 5.93; EC 358 $\mu\text{S}/\text{cm}$; SOM 含量 23.97 g/kg; TN 含量及 TP 含量分别为 1.24 g/kg 和 1.84 g/kg。

1.5 数据分析

采用 Excel 2016 和 SPSS 19.0 进行数据整理及统计分析; 本研究为单因素试验, 采用单因素方差 (One-way ANOVA) 结合邓肯氏多重比较检验 (Duncan's) 对不同处理组间土壤理化性质、设施蔬菜株高、产量及收益情况进行差异显著性分析 ($P < 0.05$); 采用主成分分析 (PCA) 方法对不同处理的土壤理化性质差异进行可视化分析, 并利用置换多元方差分析 (PERMANOVA) 对 PCA 分析结果进行统计检验。采用方差分解分析 (VPA) 解析有机肥部分替代化肥处理后设施不结球白菜及芹菜产量变化的主效应因素。

2 结果与分析

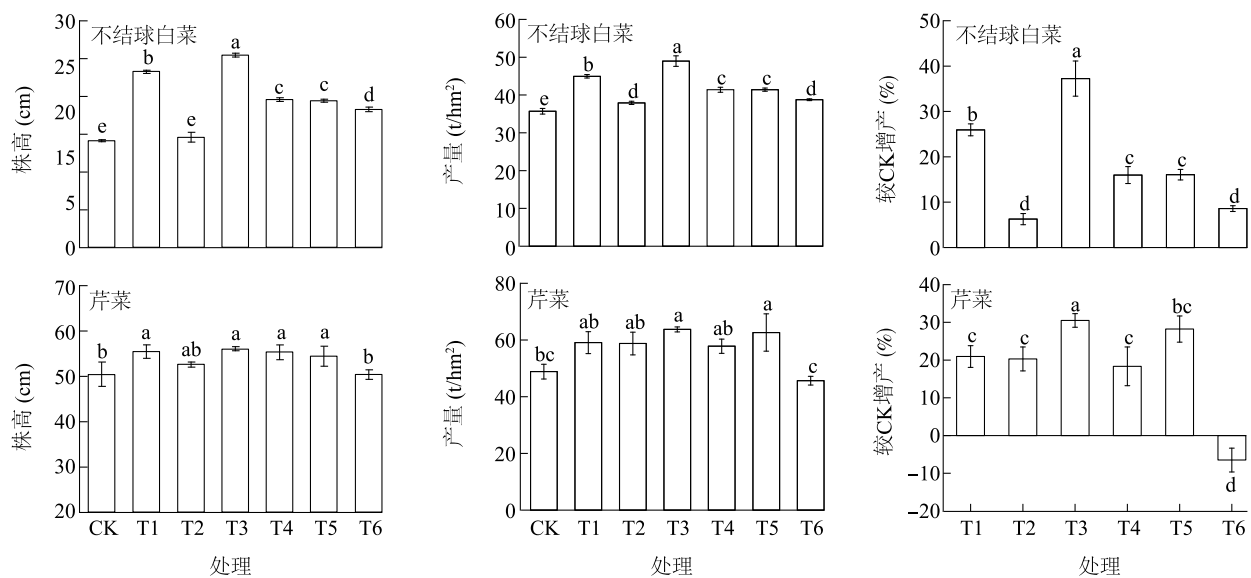
2.1 不同施肥处理对设施蔬菜生长及产量的影响

由图 1 可知, 有机肥部分替代化肥显著影响了

设施蔬菜(不结球白菜、芹菜)的株高和产量。设施不结球白菜:株高方面,相较于不施肥对照(CK, 14.14 cm),施肥处理对设施不结球白菜株高提升效果明显。其中,T3处理(有机肥替代比例30%)不结球白菜平均株高达到25.43 cm,显著($P<0.05$)高于其他处理。产量方面,相较于CK(37.5 t/hm²),施肥处理不结球白菜产量均有显著($P<0.05$)提升,而有机肥部分替代化肥处理不结球白菜产量随有机肥替代比例升高呈先升高后降低趋势。其中,T3处理不结球白菜产量显著($P<0.05$)高于其他处理,达到51.4 t/hm²,较CK增产

37.1%。

设施芹菜:株高方面,相较于不施肥对照(CK),有机肥部分替代化肥对设施芹菜生长同样表现出明显的促进作用,不同施肥处理芹菜平均株高表现为T3>T1>T4>T5>T2>T6>CK,其中T3、T1、T4和T5对芹菜株高的促进作用达到显著水平。产量方面,相较于不施肥对照(CK, 51.3 t/hm²),T1~T5处理芹菜产量均明显提升,其中T3处理芹菜产量最高,达到66.9 t/hm²,较CK增产30.4%,且增产幅度显著高于其他施肥处理。



CK、T1~T6 见表1注。图中不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

图1 不同施肥处理对设施蔬菜生长及产量的影响

Fig.1 Effects of different fertilization treatments on growth and yield of vegetables in greenhouse

2.2 不同施肥处理对设施菜地土壤理化性质的影响

总体而言,不同施肥处理对设施菜地土壤理化性质产生了显著影响(表2)。土壤pH方面,不结球白菜种植后,相较于CK(6.32),施肥处理土壤pH明显升高,其中T6处理土壤pH最高(7.49),显著($P<0.05$)高于其他施肥处理。土壤EC方面,与CK(200.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$)相比,单施化肥处理(T1, 208.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$)土壤EC升高($P>0.05$);而相较于T1处理,有机肥替代化肥处理土壤EC明显降低,且随有机肥替代化肥比例升高,土壤EC呈降低趋势。其中,T6处理土壤EC最低(111.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$),显著($P<0.05$)低

于不施肥对照(CK)和单施化肥处理。土壤养分方面,相较于CK,施肥处理设施菜地土壤肥力水平提升。不同施肥处理间,随有机肥替代化肥比例升高,SOM、TN、TP含量先升高后降低,其中T2、T3处理对设施菜地土壤肥力水平提升效果最为明显。

芹菜种植后,相较于CK(pH 6.62, EC 86.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$),施肥处理土壤pH降低、EC升高,表明不结球白菜种植后续种芹菜,设施菜地土壤酸化及次生盐渍化风险加剧。然而,相较于单施化肥处理(T1;pH 5.69, EC 335.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$),有的有机肥部分替代化肥处理土壤pH明显升高,而EC明显降低。土壤养分方面,芹菜种植后,施肥处理土壤肥力依然

处于较高水平,相较于 CK、T3、T6 处理设施菜地土壤中 SOM、TN、TP 含量均显著 ($P<0.05$) 提升。

表 2 不同施肥处理对土壤理化性质的影响

Table 2 Effects of different fertilization treatments on soil physicochemical properties

品种	处理	pH	电导率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	有机质 (g/kg)	总氮 (g/kg)	总磷 (g/kg)
不结球白菜	CK	6.32 \pm 0.07d	200.90 \pm 9.90a	17.69 \pm 0.35d	1.06 \pm 0.04c	1.55 \pm 0.04a
	T1	6.78 \pm 0.19b	208.00 \pm 34.50a	17.72 \pm 0.25d	1.15 \pm 0.10bc	1.64 \pm 0.10a
	T2	6.96 \pm 0.08b	197.80 \pm 17.00a	19.30 \pm 0.63abc	1.30 \pm 0.09ab	1.62 \pm 0.02a
	T3	6.35 \pm 0.13cd	193.30 \pm 18.70a	19.63 \pm 0.37ab	1.44 \pm 0.02a	1.80 \pm 0.02a
	T4	6.65 \pm 0.08bc	130.10 \pm 17.20b	18.27 \pm 0.16bcd	1.24 \pm 0.02bc	1.68 \pm 0.10a
	T5	6.84 \pm 0.07b	115.70 \pm 9.50b	20.75 \pm 0.13a	1.22 \pm 0.07bc	1.56 \pm 0.12a
	T6	7.49 \pm 0.02a	111.90 \pm 5.20b	17.85 \pm 0.88cd	1.21 \pm 0.01bc	1.54 \pm 0.08a
芹菜	CK	6.62 \pm 0.08a	86.50 \pm 1.30e	14.23 \pm 0.20c	1.22 \pm 0.02d	1.13 \pm 0.01de
	T1	5.69 \pm 0.07d	335.00 \pm 7.90a	17.77 \pm 0.91b	1.56 \pm 0.04a	1.35 \pm 0.02c
	T2	5.77 \pm 0.04cd	137.90 \pm 0.70d	14.92 \pm 0.20c	1.51 \pm 0.03abc	1.27 \pm 0.09cd
	T3	5.91 \pm 0.03c	153.30 \pm 2.82c	18.87 \pm 0.79b	1.49 \pm 0.0abc	1.77 \pm 0a
	T4	5.69 \pm 0.04d	231.00 \pm 3.80b	17.66 \pm 0.79b	1.38 \pm 0.07c	1.06 \pm 0.02e
	T5	5.93 \pm 0.04c	240.70 \pm 1.50b	19.00 \pm 0.51b	1.39 \pm 0.06bc	1.23 \pm 0.05cd
	T6	6.44 \pm 0.03b	127.20 \pm 1.20d	26.12 \pm 1.32a	1.52 \pm 0.02ab	1.54 \pm 0.02b

各处理见表 1 注。同一蔬菜种类同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.3 不同施肥处理对设施菜地土壤质量的影响

选取不同施肥处理下设施不结球白菜及芹菜种植后土壤理化性质 (pH、EC、SOM 含量、TN 含量及 TP 含量) 的生物学平行数据用于主成分分析,可视化有机肥部分替代化肥处理对设施菜地土壤质量的影响并进行综合评价 (图 2)。PCA 结果显示,有机肥部分替代化肥对设施菜地土壤质量产生了显著影响 (PERMANOVA, $P<0.05$), PC1 及 PC2 累计方差贡献率分别达到 92.4% (不结球白菜, 图 2A) 和 92.2% (芹菜, 图 2B), 且 PC1 轴方差贡献率远大于 PC2 轴, 表明 PC1 方向土样分布可反映不同施肥处理间设施菜地土壤理化性质差异的主要特征。沿 PC1 方向, T3 处理土壤样品分布距离不施肥对照 (CK) 土壤及单施化肥处理 (T1) 土壤最远, 表明 T3 处理对设施菜地土壤理化性质的影响最为明显。此外, PCA 结果显示, SOM、TN 含量在 PC1 轴上载荷较高, 而 EC 在 PC2 轴上载荷较高 (图 2), 表明 EC、SOM 含量及 TN 含量可能是有机肥部分替代化肥处理影响设施菜地土壤质量的关键因素。

2.4 有机肥部分替代化肥处理设施蔬菜产量变化主效应因素分析

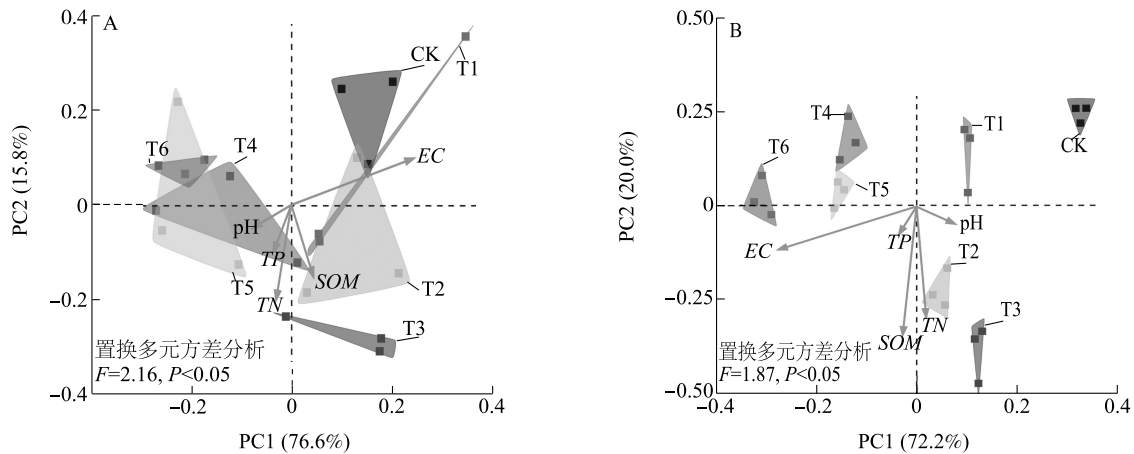
VPA 分析结果显示, pH、EC、SOM 含量、TN 含

量及 TP 含量对有机肥部分替代化肥处理设施不结球白菜产量变化的总解释度为 46.1%。其中, pH 和 EC 是设施不结球白菜产量变化的主效应因子, 二者对不结球白菜产量变化的解释度达到 26.3%, 远大于土壤养分 (SOM 含量+TN 含量+TP 含量) 对设施不结球白菜产量的影响 (12.7%) (图 3A)。

设施芹菜方面, pH、EC、SOM 含量、TN 含量及 TP 含量对有机肥部分替代化肥处理产量变化的总解释度为 39.9%。其中, 土壤 pH 及 EC 对设施芹菜产量变化的解释度为 13.1%, 而土壤养分 (SOM 含量+TN 含量+TP 含量) 对芹菜产量变化的解释度达到 22.6%, 是有机肥部分替代化肥处理设施芹菜产量变化的主效应因子 (图 3B)。

2.5 不同施肥处理对设施蔬菜经济效益的影响

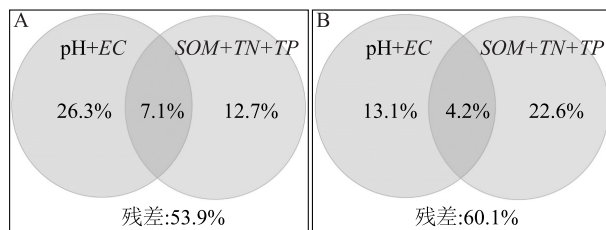
由表 3 可知, 有机肥部分替代化肥对设施不结球白菜及下茬芹菜经济效益的提升效果明显。设施不结球白菜方面, 各处理不结球白菜产值从高到低依次为 T3>T1>T5>T4>T6>T2>CK。其中, T3 处理不结球白菜产值显著 ($P<0.05$) 高于其他处理, 达到 1 hm^2 1.543 $\times 10^5$ 元, 净收入为 1 hm^2 1.334 $\times 10^5$ 元, 1 hm^2 不结球白菜净收入较 CK 增收 3.59 $\times 10^4$ 元, 净收益增幅达 36.8%。



CK、T1~T6 见表 1 注。EC:电导率;SOM:有机质含量;TN:总氮含量;TP:总磷含量。

图 2 不同施肥处理对设施不结球白菜 (A) 及芹菜 (B) 菜地土壤质量影响的主成分分析

Fig.2 Principal component analysis of the effects of different fertilization treatments on soil quality in greenhouse non-heading Chinese cabbage (A) and celery (B) fields



EC:电导率;SOM:有机质含量;TN:总氮含量;TP:总磷含量。

图 3 不同施肥处理设施不结球白菜 (A) 及芹菜 (B) 产量变化的方差分解分析结果

Fig.3 Variance decomposition analysis of the variation of yield of greenhouse non-heading Chinese cabbage (A) and celery (B) under different fertilization treatments

设施芹菜方面,相较于 CK 产值 ($1 \text{ hm}^2 1.026 \times 10^5$ 元), T1~T5 处理芹菜增收效果明显,其中 T3 处理芹菜产值最高,达到 $1 \text{ hm}^2 1.339 \times 10^5$ 元,净收入达 $1 \text{ hm}^2 1.130 \times 10^5$ 元, 1 hm^2 芹菜净收入较 CK 增收 2.54×10^4 元,净收益增幅达 29.0%; T6 处理设施芹菜产值明显降低, 1 hm^2 产值和净收入分别为 9.59×10^4 元、 7.06×10^4 元, 1 hm^2 净收益较 CK 下降 1.70×10^4 元。

3 讨论

3.1 有机肥部分替代化肥对设施蔬菜生长及产量的影响

适度减施化肥,以有机肥部分替代化肥,对蔬菜生长及产量提升具有促进作用^[7]。本研究发现,有机

肥部分替代化肥处理(T6 处理除外)均明显促进了设施不结球白菜及芹菜的生长发育,并提高了其产量,这与黎兰献等^[8]、谢育利等^[9]的研究结果一致,原因在于有机肥不仅可以为植物提供其生长所必须的 C、N、P、K 等营养成分,其富含的活性物质、微量元素及功能微生物等也是作物丰产的重要因素^[10]。值得注意的是,各有机肥替代化肥处理中不结球白菜、芹菜的株高及产量随替代比例的增加均呈现先升高后降低的趋势,这意味着与单施化肥处理(T1)相比, T3 处理(有机肥替代化肥比例 30%)设施蔬菜生长及产量提升的促进作用明显增强,而 T2 处理(有机肥替代化肥比例 20%)及 T4~T6 处理(有机肥替代化肥比例 40%~60%)的促进效果则明显减弱。上述结果表明,合理的有机肥替代化肥比例是设施蔬菜丰产的关键,过低的有机肥替代比例不足以弥补化肥减量引起的土壤养分供应亏缺,而过高的有机肥替代比例对作物的不利影响则可能与土壤中引入的大量有机物缓慢的矿化分解速率有关^[11]。

此外,本研究发现,相较于不施肥对照(CK),单施化肥处理(T1)头茬不结球白菜产量显著增加,而下茬芹菜产量增幅未达显著水平;而与单施化肥处理相比, T3 处理对不结球白菜产量的提升效果达到显著水平。一方面,这可能是由于有机肥部分替代化肥处理对不同蔬菜作物的促生作用不尽相同^[12];另一方面,无机氮肥施用后养分迅速释放,可以在作物生长前期保障其养分供应。随着前茬作物对土壤

表 3 不同施肥处理对蔬菜经济效益的影响

Table 3 Effects of different fertilization treatments on economic benefits of vegetables

品种	处理	1 hm ² 产值 (×10 ⁴ 元)	1 hm ² 肥料投入 (×10 ⁴ 元)	1 hm ² 其他投入 (×10 ⁴ 元)	1 hm ² 净收入 (×10 ⁴ 元)	1 hm ² 净收入较 CK 增收 (×10 ⁴ 元)
不结球白菜	CK	11.25±0.24e	0	1.50	9.75±0.24e	
	T1	14.16±0.15b	0.150	1.65	12.36±0.15b	2.61±0.15b
	T2	11.95±0.14d	0.143	1.80	10.00±0.14de	0.25±0.14de
	T3	15.43±0.44a	0.139	1.95	13.34±0.44a	3.59±0.44a
	T4	13.04±0.21c	0.135	2.10	10.80±0.21c	1.05±0.21c
	T5	13.05±0.13c	0.131	2.25	10.67±0.13cd	0.92±0.13cd
	T6	12.21±0.07d	0.128	2.40	9.68±0.07e	-0.07±0.07e
芹菜	CK	10.26±0.55bc	0	1.50	8.76±0.55ab	
	T1	12.41±0.81ab	0.150	1.65	10.61±0.81a	1.85±0.81a
	T2	12.34±0.84ab	0.143	1.80	10.40±0.84a	1.64±0.84a
	T3	13.39±0.18a	0.139	1.95	11.30±0.18a	2.54±0.18a
	T4	12.14±0.53ab	0.135	2.10	9.90±0.53a	1.14±0.53a
	T5	13.15±1.38a	0.131	2.25	10.77±1.38a	2.01±1.38a
	T6	9.59±0.32c	0.128	2.40	7.06±0.32b	-1.70±0.32a

CK、T1~T6 见表 1 注。同一蔬菜种类同列数据中不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。不结球白菜,1 kg 价格 3 元;芹菜,1 kg 价格 2 元;三元复合肥,1 t 价格 5 000 元;有机肥,1 t 价格 500 元;其他投入,包括场地、种苗、农药及人工投入。

中养分的不断消耗,土壤中残余养分对后茬作物生长供应乏力。而相较于化肥供肥的速效性,有机肥养分释放慢、供肥时效长,更有利于后茬作物的生长及物质积累^[13-14]。本研究发现,相比于 pH 及 EC 对有机肥部分替代化肥头茬不结球白菜产量变化的影响,土壤养分(SOM 含量+TN 含量+TP 含量)成为后茬芹菜产量变化的主效应因素,佐证了有机肥部分替代化肥相比单施化肥具有更长的养分供应时效。综上所述,合理配施有机肥与化肥,可以保障设施蔬菜生长过程中充足的养分供应并延长肥料持效期,促进设施蔬菜丰产,是一种具有实现“化肥减量增效”潜力的重要农业措施。

3.2 有机肥部分替代化肥对设施菜地土壤质量的影响

相关研究结果表明,有机肥部分替代化肥可以有效降低土壤中盐分积累,改善土壤物理结构,提高土壤酸碱缓冲能力^[15-16]。本试验中,相较于不施肥对照,单施化肥处理芹菜种植菜地土壤中电导率均显著升高,这是由于无机化肥的大量施用,导致土壤耕层可溶性盐和硝酸盐等大量积累。然而,相较于单施化肥处理,有机肥部分替代化肥处理后土壤 pH 升高趋势明显,且电导率明显降低,表明有机肥部分

替代化肥具有缓解设施菜地土壤酸化及次生盐渍化的潜力,这与唐继伟等^[17]的研究结果一致。土壤养分方面,张建军等^[18]发现有机肥配施化肥处理 11 年的耕层土壤有机质、全量氮磷钾等养分含量显著高于不施肥及单施化肥处理。本试验中,与不施肥对照相比,有机肥部分替代化肥处理土壤有机质、全氮、全磷含量均呈现明显提升,而相较于单施化肥,有机肥部分替代化肥处理对设施菜地土壤中有机质含量提升效果最为明显,该研究结果表明有机肥部分替代化肥可以保障和改善土壤养分供应水平,有效培肥土壤^[8]。

土壤质量是影响作物生长、产量、品质及经济效益的重要因素^[19-22],对高度异质的土壤中多样且复杂的物理、化学及生物等指标进行综合评价是探明有机肥部分替代化肥对土壤质量的影响,揭示最佳有机肥替代化肥比例的有效手段^[12]。李司童等^[23]通过主成分分析方法对有机肥部分替代化肥处理(30%、50%、70%)土壤质量进行了综合评价,结果显示,相较于其他施肥处理(单施化肥、有机肥替代化肥比例 30%、有机肥替代化肥比例 50%),有机肥替代化肥比例 70%对土壤质量的影响最为显著。本研究发现,有机肥替代化肥比例 30%处理设施菜

地土壤质量明显区别于其他施肥处理,这可能是由于受不同土壤类型、作物品种及施肥模式等因素影响,不同研究中有有机肥替代比例对土壤质量的影响差异明显^[17]。本试验研究结果与杨忠赞等^[16]的研究结果类似,有机肥替代30%化肥是改善土壤质量、提高肥料利用率、提升作物产量的最佳替代比例。综上,有机肥部分替代化肥是一项具有缓解土壤酸化和次生盐渍化,提升土壤养分含量,促进设施蔬菜增产、增收潜力的农业措施。

4 结 论

有机肥部分替代化肥是一种推进有效的“化肥减量增效”,保障设施蔬菜产业可持续发展的重要农业措施,具有缓解设施菜地土壤酸化及次生盐渍化,增强设施蔬菜种植过程中土壤碳、氮、磷等养分供应,延长肥料持效期,提升设施蔬菜产量及收益的潜力。在等氮量条件下,综合考虑不同施肥处理(有机肥替代化肥比例0~60%)对设施蔬菜产量、土壤质量及经济效益的影响,有机肥替代30%化肥可能是保障昆山地区设施蔬菜稳产、丰产的最佳有机肥-化肥配施比例。

参考文献:

- [1] 王志丹,石鑫岩,张慧.我国蔬菜种业发展现状、问题及政策建议[J].中国瓜菜,2021,34(9):120-123.
- [2] 王艳群,彭正萍,薛世川,等.过量施肥对设施农田土壤生态环境的影响[J].农业环境科学学报,2005(增刊1):81-84.
- [3] 黄绍文,唐继伟,李春花,等.我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策[J].植物营养与肥料学报,2017,23(6):1480-1493.
- [4] 张迎春,颜建明,李静,等.生物有机肥部分替代化肥对莴笋及土壤理化性质和微生物的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):196-205.
- [5] 武星魁,姜振萃,陆志新,等.有机肥部分替代化肥氮对叶菜产量和环境效应的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(3):349-356.
- [6] 宋永林,袁锋明,姚造华.化肥与有机物料配施对作物产量及土壤有机质的影响[J].华北农学报,2002(4):73-76.
- [7] 李奇,陈礼鹏,郭正厅.菌渣有机肥替代部分化肥对土壤肥力及玉米产量的影响[J].安徽农业科学,2022,50(1):168-170,254.
- [8] 黎兰献,张松山,赵定杰,等.肥料“一减一增”对小白菜产量·品质及土壤养分含量的影响[J].安徽农业科学,2019,47(24):167-169.
- [9] 谢育利,王吉平,苏天明,等.有机肥部分替代化肥对生菜生长及土壤环境的影响[J].西南大学学报(自然科学版),2022,44(5):41-49.
- [10] 万连杰,何满,李俊杰,等.有机肥替代部分化肥对椪柑生长、品质及土壤特性的影响[J].中国农业科学,2022,55(15):2988-3001.
- [11] 余倩倩,李文涛,邓烈,等.柑橘皮渣有机肥对特洛维塔甜橙树体营养、果实品质 and 经济效益的影响[J].西南大学学报(自然科学版),2017,39(10):20-26.
- [12] 袁奇,章欢,钟月华,等.有机肥替代化肥对设施蔬菜土壤质量提升的效果评价[J].安徽农业科学,2022,50(12):132-136.
- [13] 李岚坤,吴杰,常会庆,等.有机肥替代无机氮对菠菜生长及氮利用效率的影响[J].江苏农业科学,2023,51(8):139-144.
- [14] 万连杰.有机肥部分替代化肥对柑橘生长生理及土壤性质的影响[D/OL].重庆:西南大学,2022.
- [15] 董文,张青,罗涛,等.不同有机肥连续施用对土壤质量的影响[J].中国农学通报,2020,36(28):106-110.
- [16] 杨忠赞,迟凤琴,匡恩俊,等.有机肥替代对土壤理化性状及产量的综合评价[J].华北农学报,2019,34(S1):153-160.
- [17] 唐继伟,李娟,车升国,等.长期单施不同量化肥和有机肥后盐化潮土pH和EC的变化[J].植物营养与肥料学报,2019,25(8):1300-1307.
- [18] 张建军,樊廷录,赵刚,等.不同有机物料与部分化肥长期定位配合施用对土壤养分的调控效应[J].中国土壤与肥料,2018(3):85-91.
- [19] 任志超,穆耀辉,匡志豪,等.哈茨木霉配施高碳基肥对植烟土壤理化性质和细菌群落结构的影响[J].江苏农业科学,2023,51(8):223-231.
- [20] 何振嘉,贺伟,李刘荣,等.旱塬区新增耕地质量和粮食产能影响因素分析——以占补平衡项目为例[J].排灌机械工程学报,2022,40(11):1151-1158,1166.
- [21] 赵鹏,黄占斌,任忠秀,等.中国主要退化土壤的改良剂研究与应用进展[J].排灌机械工程学报,2022,40(6):618-625.
- [22] 张建鹏.化肥减量配施微生物菌肥及土壤调理剂对重茬马铃薯生长发育和土壤质量的影响[J].江苏农业科学,2023,51(7):205-212.
- [23] 李司童,毛凯伦,韦成才,等.蚯蚓粪肥替代部分化肥对连作烟田土壤肥力的影响及评价[J].华北农学报,2018,33(增刊1):85-91.

(责任编辑:蒋永忠)