

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.04.008

任立军, 李金, 邹洪涛, 等. 生物有机肥配施化肥对设施土壤养分含量及团聚体分布的影响. 土壤, 2023, 55(4): 756–763.

生物有机肥配施化肥对设施土壤养分含量及团聚体分布的影响^①

任立军^{1,2,3}, 李金^{1,2,3}, 邹洪涛^{1,2,3*}, 韩艳玉^{1,2,3}, 范庆锋^{1,2,3}, 张玉玲^{1,2,3}, 虞娜^{1,2,3}, 张玉龙^{1,2,3}

(1 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866; 2 农业农村部东北耕地保育重点实验室, 沈阳 110866; 3 土肥高效利用国家工程研究中心, 沈阳 110866)

摘要: 本研究以番茄–黄瓜轮作下的设施土壤为研究对象, 共设 4 个处理(1/2 化肥氮+1/2 生物有机肥氮, COF; 全部施用生物有机肥氮, OF; 全部施用化肥氮, CF; 不施肥处理, CK), 探讨生物有机肥配施化肥对设施土壤养分含量及团聚体分布和稳定性的影响。研究表明, 相较于单施化肥处理, 施用生物有机肥均提高了土壤有机碳、全氮、全磷、全钾、有效磷、速效钾养分含量和土壤 pH, 分别提高了 9.61%~54.28%、7.38%~35.45%、31.86%~98.53%、40.88%~96.40%、3.02%~15.99%、0.96%~18.23% 和 0.73%~7.03%; 单施生物有机肥或与化肥配施均可使土壤大团聚体(>0.25 mm)比例上升, 微团聚体(<0.25 mm)比例下降, 显著提高了土壤团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和>0.25 mm 团聚体含量($R_{0.25}$)($P<0.05$), 且土壤团聚体稳定性随着施入生物有机肥年限的增加而增加; 相关分析表明, MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 均与 >2 mm 和 0.25~2 mm 团聚体质量分数呈显著正相关($P<0.05$), 与<0.053 mm 团聚体组成呈极显著负相关($P<0.01$), 与 0.053~0.25 mm 团聚体组成呈显著负相关($P<0.05$)。生物有机肥替代化肥更有利于提高土壤养分含量、大团聚体的数量及团聚体的稳定性。

关键词: 生物有机肥; 养分; 团聚体; 团聚体稳定性

中图分类号: S147.35; S513 **文献标志码:** A

Effect of Bio-organic Fertilizer Combined with Chemical Fertilizer on Nutrient Contents and Soil Aggregate Distribution in Greenhouse Soil

REN Lijun^{1,2,3}, LI Jin^{1,2,3}, ZOU Hongtao^{1,2,3*}, HAN Yanyu^{1,2,3}, FAN Qingfeng^{1,2,3}, ZHANG Yuling^{1,2,3}, YU Na^{1,2,3}, ZHANG Yulong^{1,2,3}

(1 College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2 Key Laboratory of Arable Land Conservation (Northeast China), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shenyang 110866, China; 3 National Engineering Research Center for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Shenyang 110866, China)

Abstract: In this study, the greenhouse soils under tomato-cucumber rotation with four treatments (1/2 chemical fertilizer N+1/2 bio-organic fertilizer N, COF; all bio-organic fertilizer N, OF; all chemical fertilizer N, CF; no fertilizer treatment, CK) were taken as the research objects to explore the effect of bio-organic fertilizer combined with chemical fertilizer on nutrient content, aggregate distribution and stability of greenhouse soil. The results showed that compared with CF, the application of bio-organic fertilizer increased soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, available phosphorus, available potassium contents and soil pH by 9.61%–54.28%, 7.38%–35.45%, 31.86%–98.53%, 40.88%–96.40%, 3.02%–15.99%, 0.96%–18.23% and 0.73%–7.03%, respectively. The application of bio-organic fertilizer alone or in combination with chemical fertilizer increased the proportion of soil macroaggregate (>0.25 mm) while decreased the proportion of soil microaggregate (<0.25 mm), significantly increased ($P<0.05$) the mean mass diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD) and aggregate content >0.25 mm ($R_{0.25}$) of soil aggregates, and the stability of soil aggregates was increased with the year increase of application of bio-organic fertilizer. MWD, GMD and $R_{0.25}$ were significantly positively correlated with the mass fractions of aggregates >2 mm and 0.25–2 mm ($P<0.01$), while negatively correlated with that of aggregates <0.053 mm ($P<0.01$) and 0.053–0.25 mm

①基金项目: 辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1905010)、辽宁省教育厅重点项目(LSNZD202001)和辽宁省重点研发计划项目(2019JH2/10200004)资助。

* 通讯作者(zouhongtao2001@163.com)

作者简介: 任立军(1996—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士研究生, 主要从事设施土壤改良研究。E-mail: renlj1996@163.com

($P < 0.05$). In conclusion, bio-organic fertilizer is more beneficial to improve soil nutrient contents, the number of large aggregates and the stability of aggregates than chemical fertilizer.

Key words: Bio-organic fertilizer; Nutrients; Aggregates; Aggregate stability

近年来,我国设施蔬菜种植行业飞速发展,到2021年设施蔬菜栽培面积已超过400万 hm^2 ^[1],占蔬菜总产值的50%以上,具有良好的社会和经济效益^[2]。当前,由于在设施蔬菜生产过程中普遍存在盲目施肥(施肥量大、施肥结构不合理)的问题,导致土壤退化问题日益加剧^[3]。土壤退化与土壤有机碳含量下降和土壤结构破坏密切相关^[4],在一定程度上制约了设施蔬菜的可持续发展^[5]。因此,合理的施肥措施对于改善设施土壤结构状况和提高设施土壤肥力具有十分重要的意义。

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,是由土壤颗粒和各种有机质(微生物、植物、动物残渣及其分泌物)胶结而成,不同粒级团聚体的分布影响着土壤养分的储存、土壤生物学特性和土壤结构^[6]。土壤有机碳作为土壤团聚体形成的重要胶结物质,对土壤团聚体的组成及其稳定性有着重要的意义^[7]。生物有机肥本身含有活的微生物及较高含量的有机物质,可以补充土壤养分和改善理化性质,同时也可作为微生物生长的基质,增强土壤微生物数量、活性及微生物群落结构,促进土壤矿质土粒的胶结,进而影响土壤中各粒级水稳性团聚体的数量、分配及其稳定性^[8]。朱利霞等^[9]采用室内培养试验表明,生物有机肥的应用可以显著增加砂姜黑土大团聚体数量(0.5 ~ 5 mm)和土壤有机碳含量,其中20%生物有机肥替代化肥可显著增加团聚体稳定性和降低团聚体分形维数;朱琳等^[10]通过大田试验表明,施用生物有机肥可以显著提高黄褐土有机质和速效养分含量及团聚体稳定性;曲成闯等^[11]通过田间小区试验证实了生物有机肥可以提高潮土大团聚体含量、稳定性和土壤微生物生物量碳含量。目前,生物有机肥的应用主要集中在大田试验,而对于高温高湿、复种指数高、肥料投入量大的设施土壤^[12]研究还不多见,尤其是生物有机肥与化肥配施对设施土壤养分及团聚体分布的影响还缺乏系统性的研究。

目前,海城市已成为辽宁省重要的设施蔬菜产地,这里主要以黄瓜和番茄种植为主^[13]。因此,本研究以长期连续番茄-黄瓜轮作栽培定位施肥田间试验为依托,探讨生物有机肥与化肥配施对设施土壤养分含量及团聚体稳定性的影响,为提高设施土壤质量

和减量施用化肥提供合理施肥依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验地概况

试验地位于辽宁省海城市耿庄镇沈阳农业大学海城科研试验基地(40°98'N, 122°72'E)。在2020年和2021年进行了为期两年的生物有机肥应用效果的田间试验。试验地土壤类型为草甸土,2020年土壤基本理化性质:pH 6.90,有机碳、全氮、有效磷、速效钾含量分别为11.25 g/kg、1.24 g/kg、50.21 mg/kg、177.56 mg/kg。供试番茄品种为番茄409,供试黄瓜品种为黄瓜805#。

1.2 试验设计

定位试验采用单因素随机区组设计,设4个处理:①对照(CK),不施肥处理;②全部施用化肥氮(CF);③全部施用生物有机肥氮(OF);④1/2化肥氮+1/2生物有机肥氮(COF)。秋冬茬番茄施用的肥料总量分别为:氮肥375 kg/hm²(N)、磷肥150 kg/hm²(P₂O₅)和钾肥525 kg/hm²(K₂O);冬春茬黄瓜施用的肥料总量分别为:氮肥450 kg/hm²(N)、磷肥225 kg/hm²(P₂O₅)和钾肥450 kg/hm²(K₂O)。使用化肥补齐各处理所需氮肥投入量,使各处理含氮量相等。每个处理设置3次重复。小区面积为9.6 m²(1.2 m×8.0 m)。每个小区种植番茄/黄瓜2行,每行25株。小区间用塑料薄膜隔开,埋深60 cm,防止养分和水分在小区之间相互迁移的影响。

在设施蔬菜定植前,各处理的全部生物有机肥、20%氮肥、60%磷肥、40%钾肥均匀撒施后通过耕作(耕作0~20 cm)与土壤充分混合。秋冬茬番茄季,剩余肥料分别在1~3穗果膨大期,分3次进行滴管追肥,每次追肥量相同。冬春茬黄瓜季,根据土壤肥力、黄瓜长势、棚内湿度等情况,调节滴灌追肥用量,每7~10 d一次,共计10次。田间其他管理同当地管理大致相同。

定位试验所施用氮肥为尿素(N 46%),磷肥为磷酸二铵(N 18%、P₂O₅ 46%),钾肥为硫酸钾(K₂O 51%)。所用的生物有机肥是由沈阳九利生物肥料科技有限公司生产的微生物菌肥,含氮量为2.01%、有机质含量为40.00%。

1.3 土壤样品采集

土壤样品于作物拉秧后进行采集,各小区随机布设 3 点,将取得的土样混合为一个样品,取样深度为 0~20 cm,为了尽量减少对土壤结构的破坏,新鲜土壤样品在运送到实验室期间被储存在硬塑料容器中。新鲜的土壤样品在黑暗、通风的地方干燥至“适宜”含水量(约 15% 的重量土壤含水量),并剔除所有可见的石头以及其他碎屑。将风干土壤样品分为两部分,一部分土壤样品进行土壤养分测定,另一部分通过筛分程序进行团聚体粒级测定。

1.4 测定方法

采用 pH 计测定土壤 pH;土壤有效磷、速效钾、全磷和全钾采用土壤农化分析方法测定^[14];土壤全氮和有机碳采用元素分析仪(Vario EL III, Elementar, Germany)测定。采用湿筛法^[15]测定土壤水稳性团聚体,具体方法如下:首先在团聚体分析仪(DIK-2012, 日本)套筛顶部放置 50 g 风干的土壤样品,然后将 2、0.25 和 0.053 mm 3 种孔径的套筛自上而下依次排列,之后沿分析仪桶壁加去离子水至水没过土样,对土样进行浸泡 5 min 后垂直振荡 30 min,振荡频率为每分钟 25 次,振幅为 8 cm,并保证上下筛动时套筛不能露出水面。然后将留在筛子上的各级团聚体用细水流通过漏斗冲洗到铝盆中,60 °C 烘干称重。采用平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)以及 >0.25 mm 团聚体含量($R_{0.25}$)来表征土壤团聚体的稳定性^[16],分别采用以下公式计算:

$$MWD = \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i w_i) \quad (1)$$

$$GMD = \text{Exp} \left[\frac{\sum_{i=1}^n m_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \right] \quad (2)$$

$$R_{0.25} = \frac{m_{T>0.25}}{m_T} \quad (3)$$

式中: \bar{x}_i 表示粒级团聚体的平均直径(mm), w_i 表示粒级团聚体质量所占样品总质量的百分比(%), m_i 表示土壤不同粒级的团聚体质量(g), m_T 为团聚体总质量(g)。

1.5 数据处理

利用 Excel 2020 软件进行数据计算与整理;应用 SPSS 25.0 软件进行单因素方差分析,并用 Duncan 法比较各种指标不同处理之间的差异;用 Pearson 法进行团聚体 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 的相关性分析;相

关数据制图采用 Origin 2017 软件进行。

2 结果与分析

2.1 不同施肥方式对设施土壤养分及 pH 的影响

2.1.1 土壤有机碳和全氮 由表 1 可知,施用生物有机肥 OF 和 COF 处理的有机碳和全氮含量均显著高于单施化肥和不施肥处理($P<0.05$),且均为 COF 处理最大。2020 年各施肥处理的有机碳含量比 CK 处理高 12.08%~30.72%,2021 年高 57.18%~142.48%。与 2020 年相比,2021 年 CK 处理的有机碳含量呈下降趋势,下降幅度为 11.58%;而各施肥处理均呈上升趋势,升高幅度为 23.99%~64.02%。试验 2 年的土壤全氮含量均表现为 COF>OF>CF>CK,其中,2020 年的 CF、OF 和 COF 处理的全氮含量较 CK 分别提高 20.88%、47.25% 和 63.74%;2021 年各施肥处理的全氮含量较 CK 分别提高 83.95%、97.53% 和 127.16%。

2.1.2 土壤全磷和全钾 由表 1 可得,2020 年和 2021 年各施肥处理的土壤全磷和全钾含量均高于不施肥处理。2020 年 CF、OF 和 COF 处理的全磷含量较 CK 分别提高 28.38%、78.38% 和 155.41%;2021 年各施肥处理的全磷含量较 CK 分别提高 75.90%、130.25% 和 190.35%。各处理全钾含量为 7.86~17.99 g/kg,2020 年和 2021 年各处理顺序均为 COF>OF>CF>CK,施用生物有机肥处理较单施化肥处理增幅为 62.21%~119.72%。2020 年各施肥处理全磷和全钾含量分别比 2021 年高 1.22%~28.16% 和 170.04%~225.47%。施用生物有机肥的 OF 和 COF 处理的全磷和全钾含量均显著高于单施化肥处理($P<0.05$),这表明生物有机肥的连续施用有利于土壤全量养分的累积,有利于提高土壤地力。

2.1.3 土壤速效养分 由表 1 可以看出,施用生物有机肥的 OF 和 COF 处理的速效养分含量均高于单施化肥和不施肥处理,且均为 COF 处理最大。由表 1 可知,2020 年各施肥处理的有效磷含量比 CK 处理高 11.57%~29.41%,2021 年高 8.14%~13.46%。与 2020 年相比,2021 年各处理有效磷含量均呈下降趋势,下降幅度为 16.86%~27.10%。2020 年和 2021 年土壤速效钾含量均表现为 COF 处理最高,为 199.61 mg/kg 和 154.64 mg/kg,较 CK、CF 和 OF 处理分别提高了 62.95%、5.62%、4.62% 和 47.80%、18.23%、15.52%。与 2020 年相比,2021 年各处理速效钾含量均呈下降趋势,下降幅度为 14.59%~

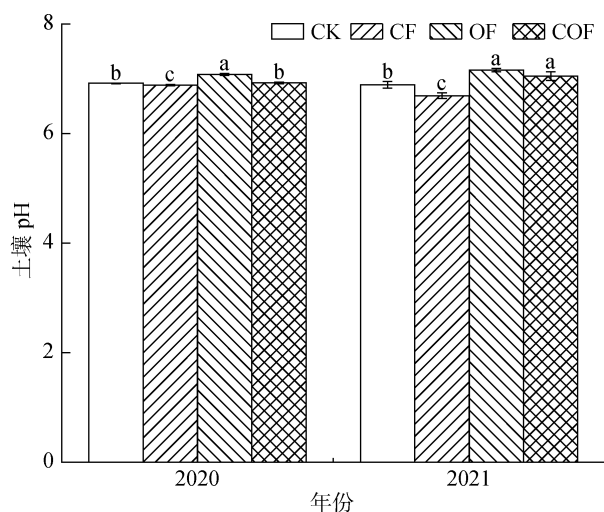
表 1 不同施肥方式对设施土壤养分含量的影响
Table 1 Soil nutrient contents under different fertilization methods

年份	处理	有机碳(g/kg)	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	全钾(g/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)
2020	CK	9.93 ± 0.06 d	0.91 ± 0.05 d	0.74 ± 0.14 c	8.29 ± 0.47 d	42.71 ± 1.74 d	122.50 ± 3.47 c
	CF	11.13 ± 0.07 c	1.10 ± 0.01 c	0.95 ± 0.03 c	9.16 ± 0.15 c	47.65 ± 0.27 c	188.98 ± 0.99 b
	OF	12.20 ± 0.25 b	1.34 ± 0.01 b	1.32 ± 0.17 b	16.34 ± 0.27 b	51.32 ± 0.94 b	190.80 ± 0.41 b
	COF	12.98 ± 0.10 a	1.49 ± 0.03 a	1.89 ± 0.10 a	17.99 ± 0.62 a	55.27 ± 1.86 a	199.61 ± 0.63 a
2021	CK	8.78 ± 0.18 d	0.81 ± 0.07 d	0.20 ± 0.01 d	7.86 ± 0.15 d	35.51 ± 1.57 c	104.63 ± 1.67 d
	CF	13.80 ± 0.29 c	1.49 ± 0.04 c	0.35 ± 0.03 c	9.05 ± 0.12 c	38.40 ± 0.25 b	130.80 ± 0.66 c
	OF	18.20 ± 0.17 b	1.60 ± 0.01 b	0.46 ± 0.02 b	12.75 ± 0.23 b	39.56 ± 0.41 ab	133.87 ± 1.05 b
	COF	21.29 ± 0.50 a	1.84 ± 0.04 a	0.58 ± 0.01 a	17.27 ± 0.01 a	40.29 ± 0.18 a	154.64 ± 0.46 a

注：表中同列数据小写字母不同表示同一年份不同处理间差异显著($P < 0.05$)，下同。

30.79%。施用生物有机肥的处理速效养分含量显著高于单施化肥处理，可见，生物有机肥可以提高土壤速效养分含量。

2.1.4 土壤 pH 由图 1 可得，随着施肥年限的增加，单施化肥处理和不施肥处理的土壤 pH 呈下降的趋势，而施用生物有机肥的 OF 和 COF 处理土壤 pH 呈上升的趋势。2020 年不同施肥处理土壤 pH 为 6.88 ~ 7.08，其中单施化肥处理土壤 pH 最低，与其他处理间存在显著差异。2021 年不同施肥方式下土壤 pH 变化趋势与 2020 年基本相同，单施化肥处理的土壤 pH 显著低于其他各处理，为 6.69；施用生物有机肥的 OF 和 COF 处理与不施肥处理相比显著提高了土壤 pH，分别提高了 2.87% 和 2.41%。说明施用生物有机肥可以抑制设施土壤 pH 下降的趋势，对预防土壤质量和土壤肥力下降有着重要的意义，同时施用生物有机肥处理对改善设施土壤 pH 具有长期的有效性。



(图中小写字母不同表示同一年份不同处理间差异显著($P < 0.05$))

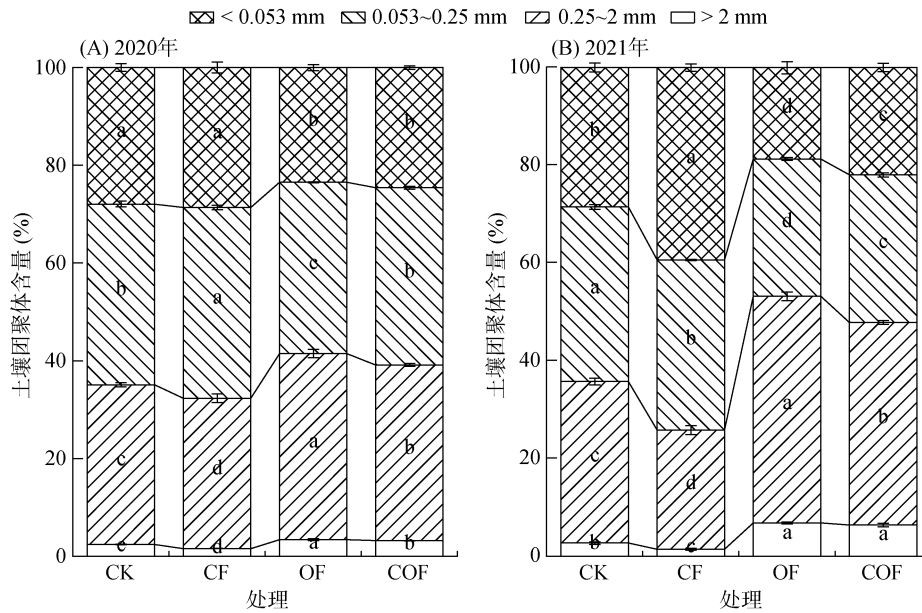
图 1 不同施肥方式对土壤 pH 的影响

Fig. 1 Soil pH under different fertilization methods

2.2 不同施肥方式对设施土壤团聚体组成与稳定性的影响

2.2.1 土壤团聚体组成 图 2A 为 2020 年土壤团聚体的变化趋势，不同施肥处理 4 个粒级团聚体(>2、0.25 ~ 2、0.053 ~ 0.25 和 <0.053 mm)组成依次为 1.56% ~ 3.37%、30.78% ~ 38.08%、35.09% ~ 39.02% 和 23.45% ~ 28.64%。与单施化肥处理相比，OF 和 COF 处理分别使 >2 mm 和 0.25 ~ 2 mm 团聚体组成增加了 116.24%、102.56% 和 16.57%、10.08%，使 0.053 ~ 0.25 mm 和 <0.053 mm 团聚体组成下降了 10.07%、6.97% 和 18.11%、14.18%。图 2B 为 2021 年土壤团聚体变化趋势，相较于单施化肥处理，OF 和 COF 处理分别使 >2 mm 和 0.25 ~ 2 mm 团聚体组成增加了 390.17%、359.23% 和 90.08%、69.95%，使 0.053 ~ 0.25 mm 和 <0.053 mm 团聚体组成下降了 19.36%、13.46% 和 52.52%、44.17%。总体上，不同施肥处理土壤团聚体的优势粒级主要以 0.25 ~ 2 mm 和 0.053 ~ 0.25 mm 为主，而 >2 mm 粒级团聚体处于较低水平。与 2020 年相比，2021 年的 CK、OF 和 COF 处理均提高了 >2 mm 和 0.25 ~ 2 mm 团聚体组成，分别增加了 12.17%、101.98%、102.00% 和 1.25%、21.79%、15.30%，这说明生物有机肥的应用有利于土壤大团聚体的形成。而单施化肥处理则降低了 >0.053 mm 粒级团聚体含量，增加了 <0.053 mm 粒级团聚体含量，相较于 2020 年，增加幅度为 37.43%。这说明单施化肥会破坏土壤结构，使得土壤大团聚体转变为微团聚体。

2.2.2 土壤团聚体稳定性 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 是用来表征土壤团聚体稳定性的指标，其数值越大，土壤团聚体稳定性越强^[17]。由表 2 可知，2 年中，生物有机肥的施入均显著提高了 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 。2020 年 CK、OF 和 COF 处理的 MWD 较 CF 处理分



(土壤团聚体含量为质量分数; 图中小写字母不同表示同一年份同一粒级不同处理间差异显著($P < 0.05$))

图 2 不同施肥方式对土壤团聚体组成的影响

Fig. 2 Soil aggregate compositions under different fertilization methods

表 2 不同施肥方式对土壤团聚体 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 的影响

Table 2 MWD, GMD and $R_{0.25}$ of soil aggregates under different fertilization methods

年份	处理	MWD(mm)	GMD(mm)	$R_{0.25}$ (%)
2020	CK	0.560 ± 0.006 c	0.231 ± 0.003 c	35.058 ± 0.390 c
	CF	0.545 ± 0.010 d	0.216 ± 0.006 d	32.334 ± 0.902 d
	OF	0.614 ± 0.009 a	0.277 ± 0.005 a	41.459 ± 0.695 a
	COF	0.594 ± 0.003 b	0.261 ± 0.002 b	39.123 ± 0.225 b
2021	CK	0.561 ± 0.007 c	0.234 ± 0.006 c	35.757 ± 0.833 c
	CF	0.463 ± 0.010 d	0.169 ± 0.004 d	25.797 ± 0.768 d
	OF	0.685 ± 0.010 a	0.376 ± 0.013 a	53.193 ± 1.025 a
	COF	0.636 ± 0.005 b	0.326 ± 0.006 b	47.850 ± 0.462 b

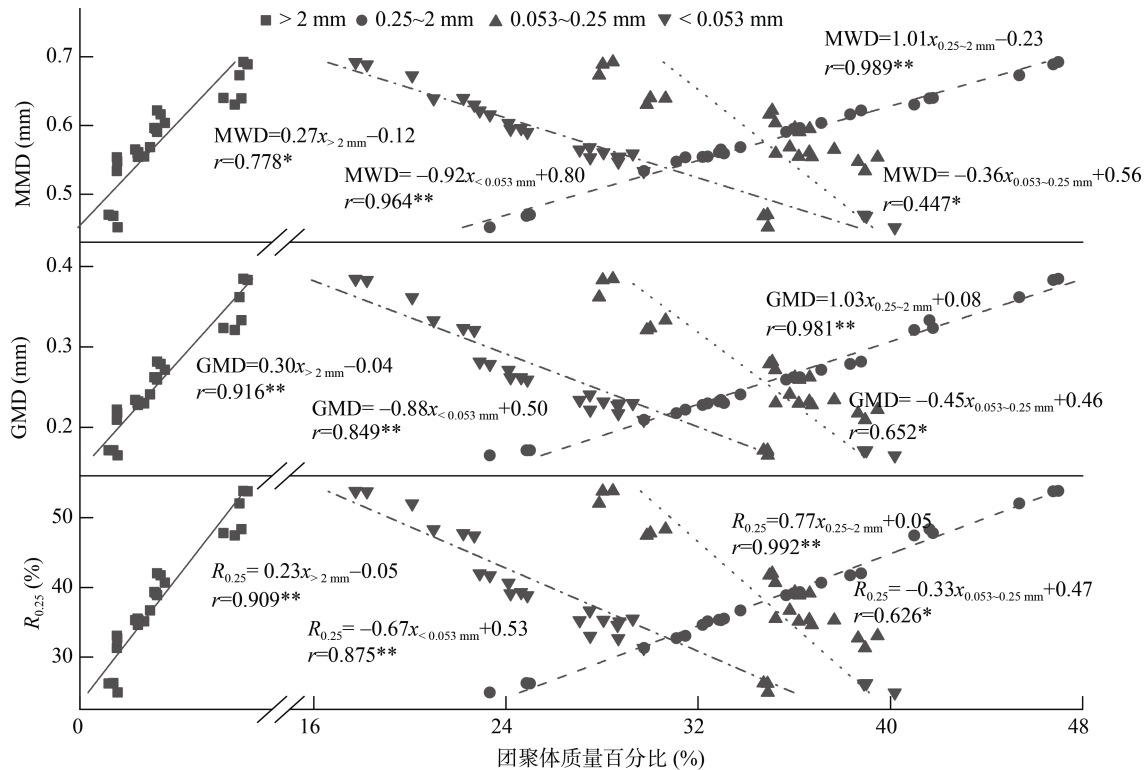
别提高了 2.75%、12.66% 和 8.99%，GMD 较 CF 处理分别提高了 6.94%、28.24% 和 20.83%， $R_{0.25}$ 分别提高了 8.54%、28.35% 和 21.12%。2021 年 OF 和 COF 处理 MWD 较 CK 处理分别提高了 22.10% 和 13.37%；GMD 较 CK 处理分别提高了 60.68% 和 39.32%； $R_{0.25}$ 较 CK 处理分别提高了 48.58% 和 33.66%，而 CF 处理的 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 相较于 CK 处理则分别下降了 17.47%、27.78% 和 27.93%。总体上，除 CF 处理外，CK、OF 和 COF 处理 2021 年 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 均高于 2020 年，其中，MWD 提高 0.18%、11.56% 和 7.07%；GMD 分别提高 1.30%、35.74% 和 24.90%； $R_{0.25}$ 分别提高 1.99%、28.30% 和 22.31%，这说明生物有机肥的施用，有助于提高土壤团聚体的稳定性。

2.2.3 土壤团聚体 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 与团聚体组成的关系 相关分析表明(图 3)，土壤团聚体 MWD 与 0.25 ~ 2 mm 团聚体组成呈极显著线性正相关 ($P < 0.01$)，与 > 2 mm 团聚体组成呈显著线性正相关 ($P < 0.05$)；土壤团聚体 GMD 和 $R_{0.25}$ 与 > 2 mm 和 0.25 ~ 2 mm 团聚体组成呈极显著线性正相关 ($P < 0.01$)；且它们三者均与 < 0.053 mm 团聚体组成呈极显著线性负相关 ($P < 0.01$)，与 0.053 ~ 0.25 mm 团聚体组成呈显著线性负相关 ($P < 0.05$)。由此可见，生物有机肥促进了 < 0.053 mm 团聚体向微团聚体和大团聚体转化是提升土壤团聚体稳定性的关键因素。

3 讨论

3.1 生物有机肥配施化肥对设施土壤养分及 pH 的影响

本研究发现单施生物有机肥或与化肥配施均显著提高土壤有机碳和全氮含量，这与王含瑞等^[18]研究结果一致，一方面是因为生物有机肥本身含有丰富的微生物和有机质，有利于土壤有机碳和全氮含量的增加^[19]；另一方面生物有机肥可以使土壤 pH 趋于中性，这有利于提高土壤微生物活性，而土壤微生物能促进土壤有机碳和全氮的积累^[20]。石纹焄等^[19]研究表明，连续 2 a 施用猪粪有机肥，能够提高潮土速效钾和有效磷的含量。本文连续施用两年生物有机肥的试验结果与此不一致，研究表明，2021 年各处理的速效钾和有效磷含量均低于 2020 年，这可能是



(* 表示相关性达 $P < 0.05$ 显著水平, **表示相关性达 $P < 0.01$ 显著水平)

图3 土壤团聚体 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 与团聚体组成的相关性

Fig. 3 Relationship between MWD, GMD, $R_{0.25}$ and aggregate composition

因为本研究是在番茄-黄瓜轮作条件下,与单一作物相比对土壤养分需求不一样;其次,石纹碓等研究的是短期的盆栽作物生菜,而本文研究是在田间条件下,栽培时间更长,相比较于盆栽有更为复杂的环境条件,如随水分的迁移造成养分损失等。这些原因导致2021年黄瓜茬各处理速效养分含量下降,而全磷和全钾也得出同样结果。通过两年田间试验研究发现,施用生物有机肥的两个处理相较于单施化肥处理或不施肥处理均可以显著提高土壤有效磷和速效钾的含量,这可能是因为生物有机肥兼具传统有机肥和功能微生物的双重作用,生物有机肥的施用为土壤微生物提供充足的能源,利于土壤中微生物的生长和繁殖,进而促进微生物将土壤中难溶性养分转化为速效养分^[21];同时,生物有机肥含有一定量的速效养分,这也在一定程度上增加土壤速效养分含量^[22]。刘多^[23]在玉米-大豆长周期轮作条件下,研究发现相较于单施化肥,有机肥的施用能够提高土壤全磷和全钾的含量,本研究结果与此相一致。

毛妍婷等^[24]研究发现,长期过量或单独施用氮肥会显著降低菜田耕层土壤 pH,而有机肥的施用会对土壤 pH 降低产生一定的缓解作用。本研究结果与此一致,单施化肥处理的土壤 pH 呈下降趋势,而施

用生物有机肥的处理土壤 pH 呈上升趋势。这可能是因为化学氮肥在土壤中会转化成硝酸盐,硝酸盐在土壤中流失的时候又会把土壤中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 等碱性物质带走,从而导致土壤 pH 下降^[25];而生物有机肥能够对 H^{+} 和 Al^{3+} 产生吸附作用,使得土壤 pH 升高^[26]。

3.2 生物有机肥配施化肥对设施土壤团聚体组成与稳定性的影响

土壤团聚体的组成及其水稳性作为表征土壤结构的重要指标,是作物高产稳产的必要条件^[27]。生物有机肥本身所含的有机质和腐植酸对于土壤中的团粒胶结有积极作用,以及生物有机肥可以提供除化肥养分之外的其他养分,供土壤中微生物和酶使用,进一步促进土壤大团聚体的形成^[7]。相关研究^[9, 28]表明,生物有机肥可以增加土壤大团聚体含量,尤其是 1~5 mm 和 0.5~1 mm 团聚体含量。本研究结果表明,连续两年施用生物有机肥,显著增加了土壤有机碳的含量,且与不施肥处理或单施化肥处理相比,显著增加了 >2 mm 和 0.25~2 mm 粒级团聚体含量,降低了 <0.25 mm 的土壤团聚体含量,表明生物有机肥能够促进土壤中小团聚体向大团聚体的转化,有利于土壤形成稳定的结构。

相关研究表明^[29], 单施化肥会破坏团聚体稳定性, 并随着施肥年限的增加, 土壤 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 呈下降趋势, 本研究结果与此一致。同时, 本研究中施用生物有机肥相较于单施化肥或不施肥, 均可以显著提高 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$, 可见生物有机肥有利于团聚体的稳定性, 这与 Zhu 等^[28]的研究结果一致。这可能是由于生物有机肥的施用增加了土壤有机碳的含量, 而有机碳产生的胶结物质有利于团聚体的稳定性^[30]。土壤 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 与 >2 mm、 $0.25 \sim 2$ mm 团聚体组成均呈显著线性正相关, 与 $0.053 \sim 0.25$ mm 和 <0.053 mm 团聚体组成呈显著线性负相关。这说明设施栽培条件下, 连续施用生物有机肥对于促进土壤大团聚体的形成和改善设施土壤团聚结构、提高设施土壤团聚体稳定性具有重要作用。

4 结论

1) 生物有机肥替代化肥可以显著提高土壤有机碳和全氮含量, 且随着生物有机肥施入年限的增长而增加; 相较于单施化肥, 生物有机肥的施入可以显著提高土壤全磷、全钾、有效磷、速效钾养分含量和土壤 pH。

2) 施用生物有机肥增加了土壤中 >0.25 mm 水稳性团聚体的含量, 减少了 <0.25 mm 水稳性团聚体的含量; 结合土壤团聚体平均重量直径、几何平均直径和 >0.25 mm 团聚体含量等稳定性参数发现, 施用生物有机肥有利于提高土壤水稳定性团聚体结构水平, 增加土壤稳定性, 改善土壤结构状况。

参考文献:

- [1] 于泓, 卢维宏, 张乃明. 我国设施栽培土壤退化特征及修复技术研究进展[J]. 蔬菜, 2021(11): 35–42.
- [2] 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.
- [3] 武星魁, 施卫明, 徐永辉, 等. 长期不同化肥氮用量对设施菜地土壤氮素矿化和硝化作用的影响[J]. 土壤, 2021, 53(6): 1160–1166.
- [4] 任卫东. 长期不同施肥和管理措施对壤土有机碳及其组分的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- [5] 卢维宏, 张乃明, 包立, 等. 我国设施栽培连作障碍特征与成因及防治措施的研究进展[J]. 土壤, 2020, 52(4): 651–658.
- [6] Wang Y, Zhang J H, Zhang Z H. Influences of intensive tillage on water-stable aggregate distribution on a steep hillslope[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 151: 82–92.
- [7] 廖超林, 黎丽娜, 谢丽华, 等. 增减施有机肥对红壤性水稻土团聚体稳定性及胶结物的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(4): 978–988.
- [8] Singh S, Tripathi A, Maji D, et al. Evaluating the potential of combined inoculation of *Trichoderma harzianum* and *Brevibacterium halotolerans* for increased growth and oil yield in *Mentha arvensis* under greenhouse and field conditions[J]. Industrial Crops and Products, 2019, 131: 173–181.
- [9] 朱利霞, 徐思薇, 陈如冰, 等. 生物有机肥替代化肥对砂姜黑土团聚体及其有机碳变化特征的影响[J]. 山东农业科学, 2021, 53(11): 75–81.
- [10] 朱琳, 安立超, 戴昕, 等. 餐厨垃圾生物有机肥对贫瘠黄褐土改良的研究[J]. 环境科学研究, 2020, 33(8): 1954–1963.
- [11] 曲成闯, 陈效民, 韩召强, 等. 生物有机肥对潮土物理性状及微生物量碳、氮的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 70–76.
- [12] Iqbal J, Hu R G, Feng M L, et al. Microbial biomass, and dissolved organic carbon and nitrogen strongly affect soil respiration in different land uses: A case study at Three Gorges Reservoir Area, South China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, 137(3/4): 294–307.
- [13] 王登元. 海城市设施农业发展存在的问题及对策[J]. 现代农业科技, 2010(11): 246–247.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(3): 627–633.
- [16] Mazurak A P. Effect of gaseous phase on water-stable synthetic aggregates[J]. Soil Science, 1950, 69(2): 135–148.
- [17] Rooij G D. Methods of soil analysis. part 4. physical methods[J]. Vadose Zone Journal, 2004, 3: 722–723.
- [18] 王含瑞, 徐得雨, 肖雯丽, 等. 生物有机肥替代化肥对旱地玉米土壤养分和产量的影响[J]. 山西农业科学, 2022, 50(8): 1105–1110.
- [19] 石纹璋, 刘世亮, 赵颖, 等. 猪粪有机肥施用对潮土速效养分含量及团聚体分布的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(5): 431–438.
- [20] 朱利霞, 曹萌萌, 桑成琛, 等. 生物有机肥替代化肥对玉米土壤肥力及酶活性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2022, 40(1): 67–72.
- [21] Sun L W, Yan N H. Effects of bioorganic fertilizer on soil nutrients and microbial biomass of dryland Oats[J]. Ekoloji, 2019, 28: 3541–3550.
- [22] Dhakal Y, Meena R S, Kumar S. Effect of INM on nodulation, yield, quality and available nutrient status in soil after harvest of greengram[J]. Legume Research - an International Journal, 2016, 39(4): 590–594.
- [23] 刘多. 轮作条件下施用有机肥对土壤养分及根际微生物的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.

- [24] 毛妍婷, 刘宏斌, 陈安强, 等. 长期施用有机肥对减缓菜田耕层土壤酸化的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(9): 1784–1791.
- [25] 陈智坤. 陕西省设施农业土壤环境质量与退化成因研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [26] 曾希柏. 红壤酸化及其防治[J]. 土壤通报, 2000, 31(3): 111–113, 145.
- [27] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. Geoderma, 2005, 124(1/2): 3–22.
- [28] Zhu L X, Zhang F L, Li L L, et al. Soil C and aggregate stability were promoted by bio-fertilizer on the North China plain[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2021, 21(3): 2355–2363.
- [29] 孙雪, 张玉铭, 张丽娟, 等. 长期添加外源有机物料对华北农田土壤团聚体有机碳组分的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(8): 1384–1396.
- [30] Chai Y J, Zeng X B, E S Z, et al. The stability mechanism for organic carbon of aggregate fractions in the irrigated desert soil based on the long-term fertilizer experiment of China[J]. Catena, 2019, 173: 312–320.