

DOI: 10.11766/trxb201909270245

苏兰茜, 白亭玉, 鱼欢, 赵青云, 吴刚, 谭乐和. 有机肥无机肥配施对菠萝蜜种植土壤线虫群落的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(6): 1504–1513.

SU Lanxi, BAI Tingyu, YU Huan, ZHAO Qingyun, WU Gang, TAN Lehe. Effects of Inorganic Fertilizer Combined with Organic Manure on Soil Nematode Community under Jackfruit Trees[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(6): 1504–1513.

有机无机肥配施对菠萝蜜种植土壤线虫群落的影响*

苏兰茜, 白亭玉, 鱼欢, 赵青云, 吴刚, 谭乐和[†]

(中国热带农业科学院香料饮料研究所, 海南万宁 571533)

摘要: 为探究有机肥施用对菠萝蜜种植土壤线虫群落结构的影响, 以马来西亚 1 号菠萝蜜嫁接苗为试验材料, 设置 CK(不施肥)、100CF(100%化肥)、30OM(30%有机肥+70%化肥)、50OM(50%有机肥+50%化肥)、70OM(70%有机肥+30%化肥)、100OM(100%有机肥) 6 个处理, 比较不同施肥方式下菠萝蜜幼苗生长及土壤线虫群落的差异。结果表明: 与不施肥和纯施化肥相比, 有机-无机配施显著促进菠萝蜜幼苗生物量积累, 增加土壤 pH、有机质含量。其中食微线虫和杂食/捕食线虫的占比随着有机肥用量的增加呈增长趋势, 而植食性线虫占比呈下降趋势。增施有机肥能显著提高土壤线虫多样性指数(H')和均匀度指数(J'), 土壤食物网以细菌主导的分解途径占更大比例。 β 多样性分析结果表明, 除 50OM 和 100CF 处理构建的线虫群落结构相似外, 其他处理的线虫群落结构差异显著。菠萝蜜幼苗地上部干重与土壤食细菌线虫丰度、有机质和 pH 呈显著正相关, 而植食性线虫丰度与土壤 pH、有机质、碱解氮含量和食微线虫丰度呈显著负相关。食细菌线虫丰度与土壤有机质和 pH 呈显著正相关。有机-无机配施能够提高土壤线虫多样性和均匀度, 平衡不同食性线虫的占比, 改善土壤养分, 使土壤环境趋于健康, 从而促进菠萝蜜生长。

关键词: 菠萝蜜; 有机肥; 土壤化学性质; 线虫群落

中图分类号: S158.3 文献标志码: A

Effects of Inorganic Fertilizer Combined with Organic Manure on Soil Nematode Community under Jackfruit Trees

SU Lanxi, BAI Tingyu, YU Huan, ZHAO Qingyun, WU Gang, TAN Lehe[†]

(Spice and Beverage Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Wanning, Hainan 571533, China)

Abstract: [Objective] In order to investigate effects of organic manure on soil nematode community under jackfruit trees, a comparison study was conducted using grafted Malaysian No.1 saplings. [Method] The experiment in the study was designed to have six treatments, i.e., CK (no fertilizer), 100CF (100% chemical fertilizer), 30OM (30% organic manure plus 70%

* 国家自然科学基金项目(41907092)、海南省自然科学基金项目(319QN314)和中国热带农业科学院基本科研业务费专项资金(1630142020008)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41907092), the Natural Science Foundation of Hainan (No. 319QN314), and the Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund for Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences (No. 1630142020008)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: tlh3687@163.com

作者简介: 苏兰茜(1988—), 女, 湖南邵东人, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤与植物营养研究。E-mail: sulanxi1988@163.com

收稿日期: 2019-09-27; 收到修改稿日期: 2019-12-24; 网络首发日期(www.cnki.net): 2020-03-10

chemical fertilizer), 50OM (50% organic manure plus 50% chemical fertilizer), 70OM (70% organic manure plus 30% chemical fertilizer), 100OM (100% organic manure). 【 Result 】 Results show that compared with CK and Treatment 100CF, all the other four treatments had varying significant effects of promoting biomass accumulation of the jackfruit saplings and increasing soil pH and organic matter in the soils. With increasing organic manure replacement rate, microbivorous nematodes and omnivores/predators increased in proportion, while plant-parasites decreased, the soil nematodes as a whole increased in diversity (H') and evenness (J') significantly, and the bacteria-dominated decomposition pathways in the soil food web did in proportion, too. β diversity analysis shows that the treatments varied significantly in nematode community structure, except for Treatments 50OM and 100CF, which were quite similar in that field. Dry weight of the shoot of the jackfruit saplings was significantly and positively related to abundance of bacterivores, organic matter and soil pH, while abundance of plant-parasites was negatively related to soil pH, organic matter, alkalyzable nitrogen and abundance of microbivorous ones, and abundance of bacterivores was significantly and positively related to soil organic matter and pH. 【 Conclusion 】 Combined application of chemical fertilizers and organic manure can improve soil nematodes in diversity and evenness, balance the nematodes different in feeding habit in proportion, improve soil fertility and make the soil environment healthier and hence promote growth of the jackfruit saplings.

Key words: Jackfruit; Organic manure; Soil chemical properties; Nematode community

长期施用化肥导致土壤结构退化、有机质含量下降、土壤生物多样性降低^[1], 不利于农业可持续发展。有机物料(如畜禽粪便、作物残茬、堆肥等)不仅能够回收利用废弃资源, 还能够在保证作物产量和品质的同时改善土壤理化性质、优化土壤生物群落和活性, 从而培肥土壤地力^[2]。线虫作为土壤生物区系的重要组成部分之一, 因其易鉴别、世代周期短、结构与功能对应关系好等特点, 常被作为指示生物用于指示土壤生态系统受干扰的程度^[3], 对土壤微生物的调节、土壤理化性质的改变发挥重要作用^[4]。

过去关于有机肥影响土壤线虫群落结构方面的研究多集中在温带地区, 在热带地区的研究较少。海南省气候湿热、砂壤土居多, 适宜土壤线虫繁殖^[5], 因此线虫在热带地区土壤生态系统中占据重要地位。线虫群落结构的变化与土壤养分含量变化密切相关^[6]。大量研究表明有机肥的施用能够增加土壤线虫总数, 提高土壤食微线虫和杂食/捕食性线虫的数量, 降低植食性线虫的数量^[7-9]。Sothearen 等^[10]对菠萝蜜的施肥研究表明, 施用蝙蝠粪肥显著增加了菠萝蜜的生长量, 但仅概述了有机肥对菠萝蜜生长的作用, 并未深入研究增施有机肥如何改变土壤养分和微生态系统从而促进菠萝蜜生长。因此, 探究有机肥与化肥配施对菠萝蜜种植土壤的线虫群落结构及养分变化的影响具有重要指导作用。

菠萝蜜 (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) 是我国

热带及亚热带地区广泛种植的特色果树^[11]。而关于菠萝蜜园土壤养分方面的研究相当匮乏, 很多果园疏于管理, 主要依靠经验施肥^[12], 导致土壤养分有效性普遍较差、有机质含量低, 种植的菠萝蜜极易表现树体长势弱, 产量和品质受限。田间实践发现施用牛粪肥的菠萝蜜园树体长势良好, 但牛粪肥对菠萝蜜生长的调控机制尚不明确。本研究在盆栽条件下, 研究有机肥部分替代化肥对土壤线虫群落结构的影响, 比较不同施肥方式对菠萝蜜幼苗生物量积累及土壤肥力的调控差异, 旨在为菠萝蜜种植土壤生态系统健康管理、地力提升以及作物增产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自中国热带农业科学院香料饮料研究所(18°44'8"N, 110°11'34"E)幼龄菠萝蜜种植基地, 该地区属典型的热带季风气候。年均气温 24.6℃, 年降雨量 1 990~2 400 mm, 年日照时数 1 800~2 300 h。土壤类型为花岗岩发育的砖红壤, 质地为砂壤土, pH 5.04, 土壤有机质 17.3 g·kg⁻¹, 碱解氮 91.79 mg·kg⁻¹, 有效磷 73.67 mg·kg⁻¹, 速效钾 37.88 mg·kg⁻¹。

供试牛粪有机肥(有机质, 50.8%; N, 15.6 g·kg⁻¹; P₂O₅, 47.2 g·kg⁻¹; K₂O, 12.9 g·kg⁻¹), 购自江苏禾喜生物科技有限公司。氮肥为尿素(N含量 46%),

磷肥为过磷酸钙 (P_2O_5 含量为 12%), 钾肥为硫酸钾 (K_2O 含量为 45%)。供试菠萝蜜苗为马来西亚 1 号嫁接苗, 由中国热带农业科学院香料饮料研究所提供。

1.2 试验设计

盆栽试验于 2018 年 9 月至 2018 年 12 月在中国热带农业科学院香料饮料研究所温室进行。试验用土经过筛 (2 mm) 后装入塑料盆 (直径 18 cm, 高 30 cm) 中, 每盆装土 8 kg, 试验共设置 6 个施肥处理: CK (不施肥)、100CF (100% 化肥)、30OM (30% 有机肥+70% 化肥)、50OM (50% 有机肥+50% 化肥)、70OM (70% 有机肥+30% 化肥)、100OM (100% 有机肥)。100% 有机肥施用量参考覃杰凤等^[12]给出的幼龄树施肥量范围测算而得 (4 个月用量: N 5 g·株⁻¹, P_2O_5 2.5 g·株⁻¹, K_2O 5 g·株⁻¹)。减少的有机肥用化肥等养分补齐 (每月肥料用量见表 1), 磷肥和有机肥作基肥一次性施入, 氮、钾肥分 4 次等量作追肥

施用。移栽一株三叶一心的供试菠萝蜜苗, 常规管理。采用完全随机设计, 每个处理设置 3 个重复, 每个重复 6 株, 总计 108 株。整个试验培养 120 d 后测定相关指标。

1.3 项目测定与方法

每个处理随机选取 9 株长势一致的菠萝蜜苗进行样品采集, 每株菠萝蜜苗及其根围土壤作为一个测试样品, 每个处理和对照采集 9 个测试样。植物样品收获后, 用去离子水将植株冲洗 3 次, 分成地上部和地下部, 采用烘干称重法测定干物质量。根冠比=根干重/地上部干重。将所有根围土壤样品带回实验室混匀分为两份, 一份用于线虫群落分析, 一份用于测定土壤理化性质^[13]。土壤 pH 采用复合电极法测定, 土水比为 1:5 (w/v)。有机质采用重铬酸钾外加热法测定; 碱解氮采用碱解扩散法测定; 土壤有效磷采用 $NaHCO_3$ 溶液浸提—钼锑抗比色法测定; 土壤速效钾采用 NH_4OAc 浸提—火焰光度法测定。

表 1 不同处理的肥料用量

Table 1 Fertilizer and organic manure application rate relative to treatment

处理	牛粪有机肥	尿素	过磷酸钙	硫酸钾
Treatment	Cow manure/ (g·plant ⁻¹)	Urea/ (g·plant ⁻¹)	Calcium superphosphate/ (g·plant ⁻¹)	Potassium sulfate/ (g·plant ⁻¹)
CK	0.00	0.00	0.00	0.00
100CF	0.00	3.39	39.33	2.87
30OM	30.00	2.37	27.53	2.01
50OM	50.00	1.70	19.67	1.43
70OM	70.00	1.02	11.80	0.86
100OM	100.00	0.00	0.00	0.00

1.4 线虫收集与形态鉴定

称取 100 g 土壤通过浅盘法进行土壤线虫的分离收集^[14], 线虫总数通过体视显微镜直接计数, 根据土壤含水量换算为每 100 g 干土中的数量。计数后, 随机挑取 100 条以上线虫置于载玻片, 用透明指甲油密封盖玻片的四周避免水分蒸发影响线虫的鉴定, 于 Olympus BX51 光学显微镜 100× 和 400× 下观察线虫形态, 根据其形态和食性进行分类鉴定^[15-18]。根据线虫的口针、食道及尾部形态等特征, 将线虫分为四个营养类群: 食细菌线虫 (Bacterivores)、食真菌线虫 (Fungivores)、植食性线虫 (Plant-parasites) 和杂食/捕食性线虫 (Omnivores/predators)^[19]。

在分析营养类群比例的基础上进一步计算土壤线虫群落指数:

自由生活线虫成熟度指数 (MI):

$$MI = \sum c-p_i \times p_i,$$

式中, $c-p_i$ 为分类单元 i 被赋予的 cp 值, p_i 为第 i 个分类单元中个体占线虫总个体数量的比例。

香农多样性指数 (H'):

$$H' = - \sum p_i \times \ln p_i。$$

均匀度指数

$$(J') = H'/\ln S,$$

式中, S 为线虫分类单元数。

线虫通道指数

$$(NCR) = BF / (BF + FF),$$

式中, BF 和 FF 分别代表食细菌和食真菌的线虫数量。

富集指数 (EI) = $100 \times (e / (e + b))$, 结构指数 (SI) = $100 \times (s / (s + b))$ 。式中, b (basal) 代表食物网中的基础成分, 通常指 Ba_2 和 Fu_2 两个类群; e (enrichment) 代表食物网中的富集成分, 指 Ba_1 和 Fu_2 两个类群; s (structure) 代表食物网中的结构成分, 包括 Ba_3 - Ba_5 、 Fu_3 - Fu_5 、 Om_3 - Om_5 和 Ca_2 - Ca_5 类群。 b 、 e 和 s 值的计算方式分别为 $\sum k_b n_b$ 、 $\sum k_e n_e$ 和 $\sum k_s n_s$, 其中 k_b 、 k_e 和 k_s 为各类群所对应的加权值 (其值在 0.8 到 5.0 之间), n_b 、 n_e 和 n_s 则为各类群的丰度。

1.5 数据处理

在 SPSS 19.0 中, 使用 Kolmogorov-Smirnov 检

验和 Levene's 检验对所有数据进行正态分析和方差齐性检验。采用单因素方法分析 (ANOVA) 进行数据比较, 利用 Duncan 新复极差法检验处理间差异的显著性水平 ($P < 0.05$)。使用 R 软件 (3.3.2) 里的 Vegan 程序包进行 β 多样性分析, 使用 corrplot 程序包进行相关性分析。

2 结果

2.1 施肥方式对菠萝蜜幼苗生物量的影响

从表 2 可以看出, 100OM 处理菠萝蜜幼苗的地上部干重、地下部干重和总干重显著高于对照, 增加的比例分别为 46.00%、31.25% 和 42.54%, 根冠比与对照差异不显著。50OM 处理地上部干重、地下部干重、总干重和根冠比均显著高于对照, 增长的比例分别为 23.99%、56.80%、31.68% 和 30.00%; 与 100CF 处理相比, 菠萝蜜幼苗的地上部干重、地下部干重和总干重显著增加, 增加的比例分别为 14.81%、37.80% 和 20.37%。

表 2 不同施肥方式菠萝蜜幼苗生物量变化

Table 2 Biomass of jackfruit saplings relative to treatment

处理	地上部干重	地下部干重	总干重	根冠比
Treatment	Dry weight of shoot/g	Dry weight of root/g	Total dry weight/g	Ratio of root/shoot/%
CK	17.76±1.63d	5.44±1.20cd	23.20±2.80c	0.30±0.05b
100CF	19.18±2.53cd	6.19±0.78bc	25.38±1.76c	0.33±0.09ab
30OM	18.55±0.89cd	6.77±0.94b	25.33±0.85c	0.37±0.06a
50OM	22.02±2.77b	8.53±1.20a	30.55±3.27b	0.39±0.07a
70OM	19.86±0.91c	4.82±0.76d	24.68±1.44c	0.24±0.04c
100OM	25.93±0.69a	7.14±0.99b	33.07±1.65a	0.27±0.03bc

注: 同列不同字母表示各处理差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Note: Different letters in the same column represent significant difference ($P < 0.05$) between treatments. The same below.

2.2 施肥方式对菠萝蜜种植土壤化学性质的影响

增施有机肥较对照显著增加土壤 pH、有机质、碱解氮和速效钾含量, 其中 100OM 处理增加的比例分别为 34.75%、48.86%、46.71% 和 431.66% (表 3)。增施有机肥较 100CF 处理显著增加土壤 pH 和有机质含量, 减少有效磷和速效钾含量。随着有机肥施用比例增加, 土壤 pH、有机质、碱解氮含量呈增长趋势, 土壤有效磷和速效钾含量呈降低趋势。

2.3 施肥方式对土壤线虫群落组成的影响

各处理土壤中共鉴定出线虫 13 个属 (表 4)。将个体数占群落个体总数 10% 以上的属划定为土壤线虫优势属, 由表 3 可以看出肾形属 *Rotylenchulus* 在所有处理中均为优势属; CK 处理的优势属主要集中在植食性线虫, 分别为根结属 *Meloidogyne*、螺旋属 *Helicotylenchus* 和矮化属 *Tylenchorhynchus*; 随着有机肥施用比例的增加, 优势属主要为食微线

表 3 不同施肥方式菠萝蜜种植土壤化学性质

Table 3 Chemical properties of the soil relative to treatment

处理 Treatment	pH	有机质 Organic matter/ g·kg ⁻¹	碱解氮 Alkalyzable nitrogen/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available phosphorus/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Readily available potassium/ (mg·kg ⁻¹)
CK	5.18±0.06d	20.61±0.48e	68.02±2.84d	117.2±8.1e	50.16±2.61e
100CF	4.46±0.05f	20.31±0.69e	102.1±3.15a	1 226±313a	554.0±36.8a
300M	4.62±0.07e	22.30±0.46d	87.24±6.15c	777.0±113.5b	424.7±26.5b
500M	5.26±0.05c	24.02±0.68c	83.50±4.11c	563.3±15.6c	409.1±9.9bc
700M	6.00±0.08b	27.78±0.62b	93.19±1.91b	389.0±44.1d	392.5±25.9c
1000M	6.98±0.07a	30.68±0.93a	99.79±4.53a	109.4±10.3e	266.7±22.3d

表 4 不同施肥处理土壤线虫属的相对丰度

Table 4 Mean relative abundance of nematodes relative to genus and treatment/%

属名 Genus	功能团 ¹⁾ Guild	CK	100CF	300M	500M	700M	1000M
梭咽属 <i>Prismatolaimus</i>	Ba2	1.85	0.00	0.22	0.31	0.00	0.55
拟丽突属 <i>Acrobeloides</i>	Ba2	0.24	7.85	2.58	7.44	5.35	10.43
中杆属 <i>Mesorhabditis</i>	Ba1	2.14	2.32	1.38	3.78	14.50	15.75
地单宫属 <i>Geomonhystera</i>	Ba2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.96
头叶属 <i>Cephalobus</i>	Ba2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.36
垫咽属 <i>Tylencholaimus</i>	Fu4	4.42	7.59	1.21	1.03	7.25	15.76
矮化属 <i>Tylenchorhynchus</i>	Pp3	15.01	4.63	12.84	4.73	6.26	3.41
肾形属 <i>Rotylenchulus</i>	Pp3	10.25	46.71	23.72	47.73	30.57	33.68
短体属 <i>Pratylenchus</i>	Pp3	7.69	26.20	33.99	27.70	19.48	2.13
螺旋属 <i>Helicotylenchus</i>	Pp3	20.76	1.23	6.03	3.64	8.73	5.36
环属 <i>Criconea</i>	Pp3	1.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
根结属 <i>Meloidogyne</i>	Pp3	28.74	3.31	17.78	3.23	3.28	2.41
丝尾属 <i>Oxydirus</i>	Op5	7.72	0.17	0.25	0.42	4.59	4.21

1) Ba: 食细菌线虫, Bacterivores; Fu: 食真菌线虫, Fungivores; Pp: 植食性线虫, Plant-parasites; Op: 杂食/捕食性线虫, Omnivores/predators。Bax、Fux、Ppx、Opx, x 指 c-p 值, x stands for c-p value.

虫, 有些属如地单宫属 *Geomonhystera* 和头叶属 *Cephalobus* 仅在 1000M 处理中存在。

2.4 施肥方式对土壤线虫营养结构的影响

不同施肥方式下土壤线虫营养结构存在一定差异(图 1)。对照和 100CF 处理中植食性线虫的数量最多, 分别占个体总数的 83.18%和 81.83%。随着有机肥施用比例增加, 植食性线虫的占比逐渐减少。食细菌线虫在对照和 100CF 处理中分别占比 4.12%和 10.40%。随着有机肥施用比例增加, 食细菌线虫

的占比逐渐增加。食真菌线虫占个体总数的比例变化趋势与食细菌线虫相似。杂食/捕食性线虫在对照中占比最大, 为 8.14%, 其次为 700M 和 1000M 处理, 在其他处理中占比均小于 0.5%。

2.5 施肥方式对土壤线虫群落多样性的影响

表 5 结果显示, 1000M 处理的自由生活线虫成熟度指数 MI 值最高, 较对照增加的比例为 112.7% ($P<0.05$), 其次是 700M 处理, 与对照无显著性差异, 两处理的 MI 值均显著高于 100CF 处理。100CF

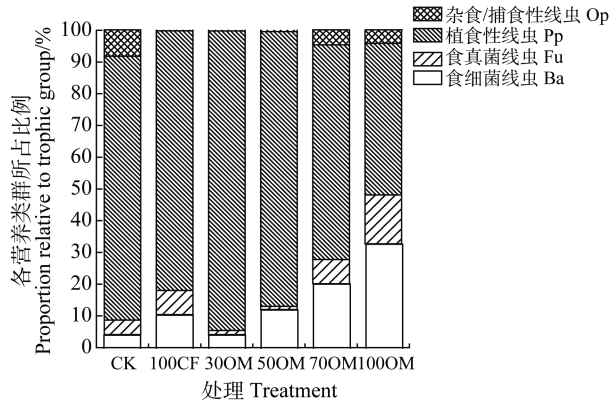


图 1 土壤线虫营养类群的相对丰度

Fig. 1 Relative abundance of soil nematode relative to trophic groups

处理的 MI 值与对照差异不显著。70OM 处理的富集指数 EI 值显著高于 100CF 处理，增加的比例为 50.92% ($P < 0.05$)，与对照和 100OM 处理无显著性

差异。结构指数 SI 和多样性指数 H' 值在对照、70OM 和 100OM 之间无显著性差异。100CF 和 50OM 处理的 H' 值显著低于对照，减少的比例均为 25.54% ($P < 0.05$)。对照的均匀度指数 J' 值最高，与 30OM、70OM、100OM 处理无显著性差异。50OM 处理中的通道指数 NCR 值最高，与 30OM、50OM 处理无显著性差异，对照的 NCR 值最低。

采用非度量多维尺度 (NMDS) 指数对线虫属水平相对丰度作 β 多样性分析。克鲁斯卡尔应力值 (stress value) 为 0.113 (图 2)，表明模型拟合效果较好。NMDS 指数显示 CK、30OM、70OM 和 100OM 处理和其他处理线虫群落区分开。ANOSIM 分析结果显示处理间的群落结构差异达显著水平 ($R = 0.7876$, $P = 0.001$)。

2.6 土壤线虫与菠萝蜜生长及土壤化学性质的关系

图 3 表明，土壤食细菌线虫丰度与食真菌线虫

表 5 不同施肥方式对土壤线虫生态指数的影响

Table 5 Soil nematode community ecological indices relative to treatment

处理 Treatment	指数 Index					
	MI	EI	SI	H'	J'	NCR
CK	0.63±0.33bc	77.03±13.70ab	94.84±5.77a	1.84±0.14a	0.82±0.06ab	0.53±0.18c
100CF	0.49±0.23c	58.25±19.84c	73.46±22.80b	1.37±0.13c	0.73±0.07cd	0.61±0.29bc
30OM	0.13±0.03d	66.75±9.54bc	69.89±16.05b	1.56±0.15b	0.77±0.05bc	0.77±0.17ab
50OM	0.25±0.09d	61.02±24.61c	52.26±21.07c	1.37±0.18c	0.69±0.07d	0.91±0.09a
70OM	0.77±0.25b	87.91±11.54a	89.14±10.38a	1.82±0.16a	0.87±0.04a	0.77±0.21ab
100OM	1.34±0.35a	79.09±8.62ab	83.26±10.29ab	1.83±0.10a	0.82±0.05ab	0.68±0.11bc

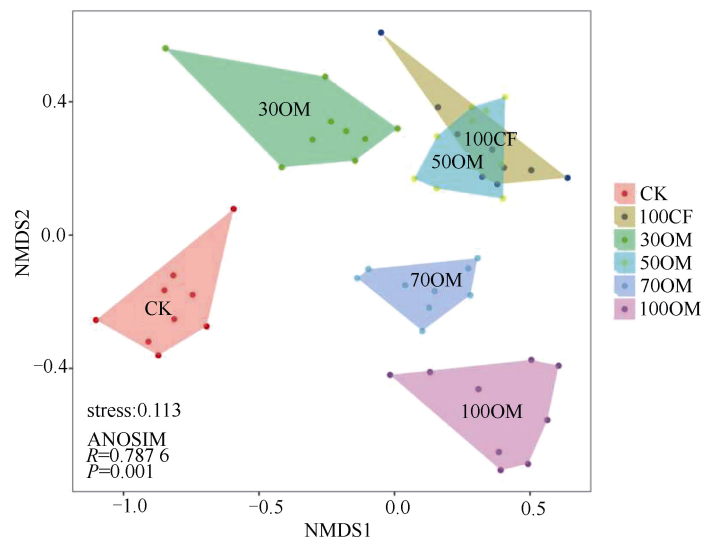
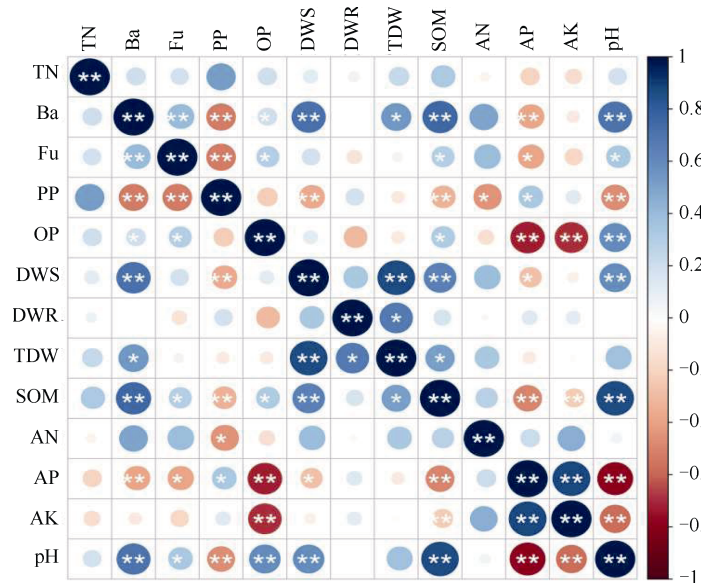


图 2 基于土壤线虫相对丰度的 NMDS 双序图

Fig. 2 The NMDS biplot based on the relative abundance of soil nematodes



注: TN, 土壤总线虫; Ba, 食细菌线虫; Fu, 食真菌线虫; PP, 植食性线虫; OP, 杂食/捕食性线虫; DWS, 地上部干重; DWR, 地下部干重; TDW, 总干重; SOM, 有机质; AN, 碱解氮; AP, 有效磷; AK, 速效钾。“*”表示不同处理间的差异显著性检验达 0.05 水平; “**”表示不同处理间的差异显著性检验达 0.01 水平。蓝色表示正相关, 红色表示负相关, 圆形的大小说明相关性的大小。Note: TN, total soil nematode; Ba, Bacterivores; Fu, Fungivores; PP, Plant-parasites; OP, Omnivores/predators; DWS, dry weight of shoot; DWR, dry weight of root; TDW, total dry weight; SOM, organic matter; AN, alkalyzablenitrogen; AP, available phosphorus; AK, readily available potassium. “*” indicates significant difference at 0.05 level and “**” significant difference at 0.01 level. Blue indicates positive correlation and red negative correlation. Size of the circle indicates magnitude of the correlation.

图3 土壤线虫丰度与菠萝蜜幼苗生长及土壤化学性质相关性

Fig. 3 Correlation analysis of nematode abundance, jackfruit sapling growth and soil chemical properties

丰度、杂食/捕食性线虫丰度两两呈显著正相关, 与植食性线虫丰度呈显著负相关。地上部干重与食细菌线虫丰度、有机质和 pH 呈显著正相关, 与植食性线虫丰度和有效磷含量呈显著负相关。总干重与食细菌线虫丰度、有机质含量呈显著正相关。有机质与食细菌线虫、食真菌线虫、杂食/捕食性线虫丰度和 pH 呈显著正相关。碱解氮含量与植食性线虫丰度呈显著负相关。有效钾含量与杂食/捕食性线虫丰度和 pH 呈显著负相关。土壤 pH 值与食微线虫、杂食/捕食性线虫丰度呈显著正相关, 与植食性线虫丰度呈显著负相关。

3 讨论

3.1 菠萝蜜幼苗生物量对施肥方式的响应

施肥可以促进作物的生长, 不同施肥方式对作物的促进作用各有不同。本研究结果显示, 与不施肥和施用纯化肥相比, 施用有机肥显著促进了菠萝蜜苗生物量的积累, 这与杜少平等^[20]在西瓜上的研

究结果类似, 但并不遵循有机肥比例越高促生效果越显著的趋势, 如 100OM 处理中地上部干重最高, 而地下部干重次于 50OM。从根冠比数值可以看出植物的生物量分配策略, 本研究中有有机肥比例越高, 根冠比值越小, 可见施用有机肥比例高的菠萝蜜生物量更多地分配到地上部, 这可能与有机肥驱动下的光合产物以及根系吸收的养分分配策略有关。

3.2 土壤化学性质对施肥方式的响应

增施有机肥较对照能显著增加土壤 pH、有机质、碱解氮和速效钾含量, 对土壤 pH 和有机质含量的提升效果也明显优于单施化肥, 这对于改善菠萝蜜种植土壤质量, 提高地力和产量具有重要作用。研究表明, 施用有机物料能显著提高部分土壤养分含量^[21-23]。本研究中, 增施有机肥能够提供更丰富的微生物生长所需的碳源种类, 通过微生物分解转化释放更多的养分, 从而提高土壤速效养分含量。

3.3 土壤线虫营养结构对施肥方式的响应

土壤线虫作为比较敏感的指示生物, 与土壤理化指标相比, 对环境变化的反应更加迅速, 能更有

效地指示环境变化产生的生态效应^[24]。土壤动物与土壤肥力/土壤质量的变动之间关系密切^[25]。大量研究表明,土壤线虫总数对有机肥有积极响应,施用有机肥能够增加土壤线虫总数^[26],提高土壤食细菌线虫、食真菌线虫^[7, 27]和杂食/捕食性线虫的数量,对植食性线虫数量有一定的抑制作用^[9, 21]。本研究中,食微线虫数量和种类随着有机肥用量的增加呈增长趋势,在线虫总量中所占的比例有所提高,说明食微线虫更倾向于 C/N 较高的有机肥处理。土壤线虫通过取食行为刺激微生物的活性,进而提升土壤微生物量和微生物的生长速度^[28],从而也促进了食微线虫数量的增长,这与本研究结果较为一致。除 100OM 处理外,其他处理的植食性线虫占比均超过 50%,随着有机肥用量的增加,土壤植食性线虫数量呈下降趋势。这可能是缘于土壤生物的间接作用^[5],可见,有机肥对植食性线虫的抑制作用与其施用量有关。然而这些设想仍需后续的控制试验验证。增施有机肥对平衡土壤中不同食性线虫的比例作用明显,如增加食微线虫和杂食/捕食性线虫占线虫总量的比例,减少植食性线虫占比。这与江春^[26]和蔡冰杰^[29]等不同有机物料对土壤线虫群落组成、结构及多样性均产生一定影响的结论一致。增施有机肥能够提高杂食/捕食性线虫占比,这主要是肥料的添加一方面为杂食/捕食性线虫提供了更多的食物来源^[30],同时杂食/捕食性线虫还以土壤微小型动物为食,较易受到干扰,在成熟稳定的生态系统中数量较多。因此与施化肥相比,增施有机肥其生态系统环境相对受到的干扰较小^[24]。

3.4 土壤线虫群落多样性对施肥方式的响应

线虫生态指数可以反映不同管理措施条件下土壤线虫多样性和群落结构的差异^[31]。成熟度指数 (MI) 常用于评价土壤受干扰的程度^[32]。大量研究结果表明,有机肥能够提高线虫群落的成熟度,降低土壤环境受干扰程度^[7, 26],与本研究结果相似。结构指数 SI 和富集指数 EI 两者结合可以更好地反映土壤环境和食物网的变化^[33]。不同施肥方式下的线虫群落富集指数和结构指数均大于 50,表明各处理在采样时期受到的干扰小,食物网逐渐成熟。而不施肥、700M 和 1000M 处理的 SI 和 EI 值均较高,表明在采样时期受到的干扰最小,养分状况较好,食物网更成熟。其他处理在采样时期土壤养分状况较差(低 pH 和低有机质),受干扰程度较高,食物

网结构有所退化。本研究结果显示,与纯化肥相比,700M 和 1000M 处理均能提高 H' 值,这与江春等^[26]在玉米的研究结果相似,表明增施有机肥使少数属的线虫快速增加,成为优势属,从而增加了物种的多样性。但其与对照无显著性差异,其他处理的 H' 值甚至较 CK 低,这可能是由于肥料的投入影响了部分偏好有机物分解的土壤线虫类群增加,导致种间竞争增强,从而改变了土壤动物群落组成。本研究中,不施肥和增施有机肥的土壤线虫分布比较均匀 (J' 值高),土壤线虫群落结构比较稳定^[34]。NCR 值常被用来探测土壤有机质的分解途径^[31]。300M、500M 和 700M 处理的 NCR 值较高,说明这些处理的土壤食物网以细菌主导的分解途径占更大比例,这与叶成龙等^[35]在麦地上的研究结果一致。由于食细菌线虫对细菌的捕食的作用,通过调节土壤细菌的数量及活性间接促进了养分转化,以细菌分解为主的分解路径能够加速养分的周转^[36]。因此,从线虫通道指数上看,以细菌路径分解占优势的有机肥与化肥配施处理能更好、更持久的供应养分。

3.5 土壤线虫与菠萝蜜生长及土壤化学性质的关系

地上部分与地下部分是相互联系的,作物良好的长势,意味着土壤生态环境良好,生物多样性丰富,养分周转速率快,而作物本身根茎叶等返还给土壤的植物残体也较多^[37-38],良好的土壤环境与充足的食物来源使土壤动物个体数量和多样性增加^[39],这可能是解释菠萝蜜幼苗地上部干重与土壤食细菌线虫丰度和土壤有机质呈正相关的主要原因之一。而土壤植食性线虫丰度与食微线虫丰度呈显著负相关,这不仅与土壤生物的间接作用有关,也可能由于植物与根际微生物以及食微线虫之间形成的稳定互作关系,占据有利生态位,进而抑制了植食性线虫的数量。前人的研究报道了食微线虫可通过捕食作用影响微生物对土壤养分的转化^[40],高养分含量的环境条件(如高 pH 和高有机质)更适合较高 cp 值的线虫类群^[14],这可能解释土壤有机质含量与食微线虫和杂食/捕食性线虫丰度呈显著正相关关系。

4 结 论

有机-无机配施显著促进菠萝蜜幼苗生物量积累,提高土壤线虫总量和食微线虫数量,减少植食性线虫数量,对土壤养分(有机质含量和 pH)有一

定的改善作用。增施有机肥通过控制土壤中不同食性线虫在线虫总量的占比,保持土壤中各营养类群的比例平衡,提高土壤线虫多样性和均匀度。菠萝蜜幼苗生物量积累与土壤化学性质和食微线虫丰度密切相关。因此,研究不同施肥方式对菠萝蜜种植土壤线虫群落和养分有效性的影响可为菠萝蜜根际生态过程和养分利用的科学调控提供理论参考。

参考文献 (References)

- [1] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327 (5968): 1008—1010.
- [2] Turmel M S, Speratti A, Baudron F, et al. Crop residue management and soil health: A systems analysis[J]. *Agricultural Systems*, 2015, 134: 6—16.
- [3] Hu C, Qi Y C. Effect of compost and chemical fertilizer on soil nematode community in a Chinese maize field[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2010, 46 (3/4): 230—236.
- [4] Fu S L, Ferris H, Brown D, et al. Does the positive feedback effect of nematodes on the biomass and activity of their bacteria prey vary with nematode species and population size?[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37 (11): 1979—1987.
- [5] Su L X, Shen Z Z, Ou Y N, et al. Novel soil fumigation strategy suppressed plant-parasitic nematodes associated with soil nematode community alterations in the field[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 121: 135—142.
- [6] Jangid K, Whitman W B, Condron L M, et al. Progressive and retrogressive ecosystem development coincide with soil bacterial community change in a dune system under lowland temperate rainforest in New Zealand[J]. *Plant and Soil*, 2013, 367 (1/2): 235—247.
- [7] Liang W J, Lou Y L, Li Q, et al. Nematode faunal response to long-term application of nitrogen fertilizer and organic manure in Northeast China[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41 (5): 883—890.
- [8] Nahar M S, Grewal P S, Miller S A, et al. Differential effects of raw and composted manure on nematode community, and its indicative value for soil microbial, physical and chemical properties[J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, 34 (2/3): 140—151.
- [9] Trivedi P, Rochester I J, Trivedi C, et al. Soil aggregate size mediates the impacts of cropping regimes on soil carbon and microbial communities[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 91: 169—181.
- [10] Sothearen T, Furey N M, Jurgens J A. Effect of bat guano on the growth of five economically important plant species[J]. *Journal of Tropical Agriculture*, 2014, 52 (2): 169—173.
- [11] Wu G, Chen H P, Sang L W, et al. Status of jackfruit industry in China and development countermeasures[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2013, 33 (2): 91—97. [吴刚, 陈海平, 桑利伟, 等. 中国菠萝蜜产业发展现状及对策[J]. *热带农业科学*, 2013, 33 (2): 91—97.]
- [12] Qin J F, Luo L F, Yang Y H. High-quality and high-yield cultivation techniques of jackfruit. *Southern Horticulture*, 2012, 23 (2): 21—22. [覃杰凤, 罗莲凤, 阳艳华. 菠萝蜜优质丰产栽培技术[J]. *南方园艺*, 2012, 23 (2): 21—22.]
- [13] Bao S D. *Soil and agricultural chemistry analysis*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [14] Verschoor B C, De Goede R G M. The nematode extraction efficiency of the Oostenbrink elutriator-cottonwool filter method with special reference to nematode body size and life strategy[J]. *Nematology*, 2000, 2 (3): 325—342.
- [15] Bongers T, Bongers M. Functional diversity of nematodes [J]. *Applied Soil Ecology*, 1998, 10 (3): 239—251.
- [16] Yin W Y. *Pictorial keys to soil animals of China*[M]. Beijing: Science Press, 1998. [尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [17] Liu W Z. *Description of the species of plant parasitic nematodes*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2004. [刘维志. 植物线虫志[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004.]
- [18] Xie H. *Taxonomy of plant nematodes*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005. [谢辉. 植物线虫分类学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.]
- [19] Yeates G W, Bongers T, De Goede R G, et al. Feeding habits in soil nematode families and genera—an outline for soil ecologists[J]. *Journal of Nematology*, 1993, 25 (3): 315—331.
- [20] Du S P, Ma Z M, Xue L. Effects of different kinds of organic fertilizer on fruit yield, quality and nutrient uptake of watermelon in gravel-mulched field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30 (4): 1269—1277. [杜少平, 马忠明, 薛亮. 不同有机肥对砂田西瓜产量、品质和养分吸收的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30 (4): 1269—1277.]
- [21] Wang D C, Wu J G, Li J M. Effect of organic manure on nematodes in rhizosphere soil of soybean under continuous cropping[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (2): 490—502. [王笃超, 吴景贵, 李建明. 不同有机物料对连作大豆根际土壤线虫的影响[J]. *土壤学报*, 2018, 55 (2): 490—502.]
- [22] Song M Y, Li Z P, Liu M, et al. Effects of mixtures of different organic materials on soil nutrient content and soil biochemical characteristics[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46 (17): 3594—3603. [宋蒙亚, 李忠佩, 刘明, 等. 不同有机物料组合对土壤养分和生化性状的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46 (17): 3594—3603.]

- [23] Wang F, Zhang J S, Gao P C, et al. Effects of application of different organic materials on soil microbiological properties and soil fertility in Weibei rainfed highland[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17 (3) : 702—709. [王芳, 张金水, 高鹏程, 等. 不同有机物料培肥对渭北旱塬土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17 (3) : 702—709.]
- [24] Cheng Y Y, Sun T, Wang Q K, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on temperate forest soil nematode communities and their metabolic footprints[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38 (2) : 475—484. [程云云, 孙涛, 王清奎, 等. 模拟氮沉降对温带森林土壤线虫群落组成和代谢足迹的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38 (2) : 475—484.]
- [25] Yan S K, Singh A N, Fu S L, et al. A soil fauna index for assessing soil quality[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 47: 158—165.
- [26] Jiang C, Huang J H, Li X Q, et al. Responses of soil nematode community to long-term application of organic manure in upland red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (6) : 1235—1241. [江春, 黄菁华, 李修强, 等. 长期施用有机肥对红壤旱地土壤线虫群落的影响[J]. *土壤学报*, 2011, 48 (6) : 1235—1241.]
- [27] Villenave C, Saj S, Pablo A L, et al. Influence of long-term organic and mineral fertilization on soil nematofauna when growing *Sorghum bicolor* in Burkina Faso[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, 46 (7) : 659—670.
- [28] Djigal D, Brauman A, Diop T A, et al. Influence of bacterial-feeding nematodes (Cephalobidae) on soil microbial communities during maize growth[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36 (2) : 323—331.
- [29] Cai B J, Fan W Q, Wang H, et al. Effects of organic materials on soil protozoa and nematodes in microzones[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (3) : 713—721. [蔡冰杰, 范文卿, 王慧, 等. 不同有机物料对微域内土壤原生动物和线虫的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54 (3) : 713—721.]
- [30] Ferris H, Bongers T, de Goede R G M. A framework for soil food web diagnostics: Extension of the nematode faunal analysis concept[J]. *Applied Soil Ecology*, 2001, 18 (1) : 13—29.
- [31] Yeates G W. Nematodes as soil indicators: Functional and biodiversity aspects[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 37 (4) : 199—210.
- [32] Neher D A, Darby B J. General community indices that can be used for analysis of nematode assemblages[M]// Wilson M J, Kakouli-Duarte T. *Nematodes as environmental indicators*. Wallingford: CAB International, 2009: 107—123.
- [33] Li Y J, Wu J H, Chen H L, et al. Nematodes as bioindicator of soil health: Methods and applications[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16 (8) : 1541—1546. [李玉娟, 吴纪华, 陈慧丽, 等. 线虫作为土壤健康指示生物的方法及应用[J]. *应用生态学报*, 2005, 16 (8) : 1541—1546.]
- [34] Mou W Y, Jia Y F, Chen X Y, et al. Effects of corn stover cultivation on the population dynamics and genus composition of soil nematode community[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37 (3) : 877—886. [牟文雅, 贾艺凡, 陈小云, 等. 玉米秸秆还田对土壤线虫数量动态与群落结构的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37 (3) : 877—886.]
- [35] Ye C L, Liu T, Zhang Y L, et al. Response of soil nematode community to application of organic manure and incorporation of straw in wheat field[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (5) : 997—1005. [叶成龙, 刘婷, 张运龙, 等. 麦地土壤线虫群落结构对有机肥和秸秆还田的响应[J]. *土壤学报*, 2013, 50 (5) : 997—1005.]
- [36] Okada H, Ferris H. Effect of temperature on growth and nitrogen mineralization of fungi and fungal-feeding nematodes[J]. *Plant and Soil*, 2001, 234 (2) : 253—262.
- [37] Chen H, Li W, Zhang C L, et al. A research on response of enzyme activities to long-term fertilization in lime concretion black soil[J]. *China Agricultura Sinica*, 2014, 47 (3) : 495—502. [陈欢, 李玮, 张存岭, 等. 淮北砂姜黑土酶活性对长期不同施肥模式的响应[J]. *中国农业科学*, 2014, 47 (3) : 495—502.]
- [38] Maraun M, Alpehi J, Beste P, et al. Indirect effects of carbon and nutrient amendments on the soil meso- and microfauna of a beechwood[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 34 (4) : 222—229.
- [39] Fonte S J, Barrios E, Six J. Earthworms, soil fertility and aggregate-associated soil organic matter dynamics in the Quesungual agroforestry system[J]. *Geoderma*, 2010, 155 (3/4) : 320—328.
- [40] Ferris H. Form and function: Metabolic footprints of nematodes in the soil food web[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2010, 46 (2) : 97—104.

(责任编辑: 卢 萍)