



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

长期施用不同肥料对橘园土壤生物群落结构的影响

胡岚, 梁波, 陈云峰, 李钰飞, 张玉峰, 郑春燕, 伍玉鹏

引用本文:

胡岚, 梁波, 陈云峰, 等. 长期施用不同肥料对橘园土壤生物群落结构的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(1): 80–87.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0661>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长期有机无机肥配施对红壤性水稻土微生物生物量和有机质结构的影响

蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 吕真真, 冀建华, 冯兆滨, 刘秀梅

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 810–819 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0584>

硒对油菜根际土壤微生物的影响

程勤, 胡承孝, 明佳佳, 蔡苗苗, 刘康, 汤艳妮, 赵小虎

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 104–110 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0061>

3种耐盐植物对滨海盐土化学性质及微生物群落结构的影响

刘雅辉, 孙建平, 马佳, 姚玉涛, 吕晶晶, 张宏伟

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 28–35 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0049>

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

荀卫兵, 王伯仁, 冉炜, 沈其荣, 徐明岗, 张瑞福

农业资源与环境学报. 2021, 38(4): 537–544 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0448>

长期定位施肥和地膜覆盖对棕壤团聚体稳定性及其有机碳含量的影响

吕欣欣, 丁雪丽, 张彬, 孙海岩, 汪景宽

农业资源与环境学报. 2018, 35(1): 1–10 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0199>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

胡岚, 梁波, 陈云峰, 等. 长期施用不同肥料对橘园土壤生物群落结构的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(1): 80–87.

HU L, LIANG B, CHEN Y F, et al. Effects of long-term application of different fertilizers on soil biota community composition in citrus orchards[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(1): 80–87.



开放科学 OSID

长期施用不同肥料对橘园土壤生物群落结构的影响

胡岚¹, 梁波¹, 陈云峰², 李钰飞³, 张玉峰⁴, 郑春燕⁵, 伍玉鹏^{1*}

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部废弃物肥料化利用重点实验室, 武汉 430064; 3. 北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097; 4. 廊坊师范学院生命科学学院, 河北 廊坊 065000; 5. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 石家庄 050022)

摘要:为探讨长期施用不同肥料对橘园土壤生物群落结构的影响,于2019年7月采集连续单施化肥、厩肥+化肥和单施生物有机肥10~12年的橘园土壤,并对土壤中的微生物、线虫、螨和蚯蚓的群落结构进行分析。结果表明:与单施化肥(F)处理相比,厩肥+化肥(M)和单施生物有机肥(O)处理均提高了土壤微生物生物量碳,并提高了细菌/真菌比例,表明肥料碳主要通过快速的细菌通道在生物群落内进行周转;共鉴定得到土壤线虫664条,F、M和O处理的线虫密度分别为每100 g干土188、163条和293条。与F相比,M和O处理显著提高了食细菌线虫的数量($P<0.05$),另外,O处理显著提高了植物寄生线虫的数量($P<0.05$);共捕获土壤螨46 523只,F、M和O处理中螨的密度分别为19 548、19 195只·m⁻²和7 483只·m⁻²。与F处理相比,M和O处理的螨总数下降,但捕食性螨数量上升,表明土壤生物活性提高;共分离得到蚯蚓80条,F、M和O处理中的蚯蚓密度分别为11、37条·m⁻²和33条·m⁻²。M和O处理中的蚯蚓数量及群落多样性显著高于F处理($P<0.05$),蚯蚓数量和多样性的提高有利于促进物质分解和维持生态系统的稳定。研究表明,与单施化肥相比,长期施用有机肥改变了橘园土壤生物群落结构,总体上促使土壤生物群落结构向有利于土壤养分循环和生态系统稳定的方向发展。

关键词:橘园;有机替代;长期施肥;土壤生物;群落结构

中图分类号:S666;S154

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)01-0080-08

doi: 10.13254/j.jare.2020.0661

Effects of long-term application of different fertilizers on soil biota community composition in citrus orchards

HU Lan¹, LIANG Bo¹, CHEN Yunfeng², LI Yufei³, ZHANG Yufeng⁴, ZHENG Chunyan⁵, WU Yupeng^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Key Laboratory of Fertilization from Agricultural Wastes, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430064, China; 3. Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 4. College of Life Sciences, Langfang Normal University, Langfang 065000, China; 5. Center for Agricultural Resources Research, IGDB, CAS, Shijiazhuang 050022, China)

Abstract: To study the effects of long-term application of different fertilizers on soil biota community, soil samples were collected in July 2019 from three citrus orchards, which were subjected to chemical fertilizer (F), animal manure + chemical fertilizer (M), or biological organic fertilizer (O) for 10~12 years, respectively. The community composition of soil microbes, nematodes, mites, and earthworms was analyzed. In comparison to treatment F, treatments M and O increased soil microbial biomass carbon and increased the ratio of bacteria/fungi, which indicated that the turnover of fertilizer-derived carbon in the biological community was dominated by rapid bacterial channels. In total, 664 soil nematodes were identified in this study. The density of nematodes for F, M, and O treatments was 188, 163, and 293 per 100 g dry soil, respectively. The numbers of bacterial feeding nematodes in the two organic treatments significantly increased compared

收稿日期:2020-11-12 录用日期:2021-01-11

作者简介:胡岚(1994—),男,湖北仙桃人,硕士研究生,从事土壤生态学研究。E-mail:1575960125@qq.com

*通信作者:伍玉鹏 E-mail:wyp19851205@126.com

基金项目:农业农村部废弃物肥料化利用重点实验室开放课题(KLFAW201902);国家重点研发计划项目(2017YFD0202001)

Project supported: Open Research Fund of Key Laboratory of Fertilization from Agricultural Wastes, Ministry of Agriculture and Rural Affairs (KLFAW201902); National Key Research and Development Program of China(2017YFD0202001)

with the chemical fertilizer treatment. Additionally, the number of plant parasitic nematodes in treatment O significantly increased ($P < 0.05$). In total, 46,523 soil mites were collected during the research. The density of mites for F, M, and O treatments was 19 548, 19 195, and 7 483 per square meter, respectively. Treatments M and O showed lower number of mites, but higher number of predatory mites than treatment F. The increase in predatory mites reflected enhanced biological activity. In this study, 80 earthworms were isolated. The density of earthworms for F, M, and O treatments was 11, 37, and 33 per square meter, respectively. Treatments M and O showed a significant higher number and community diversity of earthworms than treatment F ($P < 0.05$). Increase in earthworm density and diversity not only promotes the decomposition of organic matter, but also maintains the stability of the ecosystem. Our results indicated that long-term application of organic fertilizers changed the community composition of soil biota in citrus orchards, which enhanced the effect of soil biota on promoting a healthy soil nutrient cycle and maintaining the ecosystem stability.

Keywords: citrus orchard; organic substitution; long-term fertilization; soil biota; community composition

我国是柑橘生产大国,柑橘产量和种植面积多年处于世界领先地位。2018年我国柑橘年产量为4 138.1万t,种植面积达248.6万 hm^2 ,均排在世界首位^[1],柑橘产业已成为我国南方各省市重要的支柱性产业之一。但我国柑橘产业普遍面临着化肥施用量、有机肥投入严重不足的问题。调查显示,我国柑橘园氮、磷、钾过量施用面积分别占57.3%、76.6%和69.1%,然而仅47.8%的柑橘园施用有机肥^[2]。

2015年农业部通过并启动实施《到2020年化肥使用量零增长行动方案》,并在方案中提出通过合理利用有机养分资源,用有机肥替代部分化肥,实现有机无机相结合^[3]。2015年以来,已有较多学者针对橘园有机肥施用开展了研究,发现有机肥配施提高了柑橘产量,改善了果实品质,并进一步从土壤理化性质的改良、树体营养状况的改善等方面探讨了作用机理^[4-5],但针对长期施用有机肥对橘园土壤生物群落结构影响的研究则较少。

土壤生物种类繁多、数量庞大,除植物根系外还包括微生物、线虫、螨类、蚯蚓等。这些生物及其相互作用构成的土壤生物多样性,在生态系统服务中发挥重要作用,如促进土壤养分循环、加快有机质降解、消减土壤污染物、改良土壤结构、控制病虫害等,并最终支持生态系统的高效生产^[6]。本研究从土壤生物群落结构出发,通过对比单施化肥和有机肥替代化肥模式下土壤生物群落结构的差异,探讨柑橘园有机肥替代化肥的可行性。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点位于我国柑橘主产区湖北宜昌当阳肖家湾($30^{\circ}39'48.98''\text{N}$, $111^{\circ}48'24.82''\text{E}$),年平均温度 16.4°C ,年均降雨量992.1 mm,海拔高度79 m,土壤类

型为典型黄棕壤。橘园种植的柑橘品种均为鄂柑一号,树龄18~21年,平均树高3.5 m,冠幅4 m,间距3 m,树体长势良好。

1.2 试验设置

本研究共设置三个处理:①单施化肥(F),施用量为 $2.0\text{ kg}\cdot\text{棵}^{-1}$;②厩肥+化肥(M),化肥施用量 $1.0\text{ kg}\cdot\text{棵}^{-1}$,厩肥施用量 $2.0\text{ kg}\cdot\text{棵}^{-1}$;③生物有机肥(O),生物有机肥施用量 $5.0\text{ kg}\cdot\text{棵}^{-1}$ 。各处理均施肥10~12年。其中所施用化肥为柑橘配方肥,其总养分($\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O}$)含量 $\geq 35\%$;厩肥为当地农户利用猪粪和水稻秸秆自行混合堆沤而成,因堆肥过程和原料差异,其有机质及总养分含量在年际间稍有差异,近三年测定其有机质含量平均值为54%,总养分含量平均值为4.5%;生物有机肥为商业肥料,近五年均购于湖北恩施壮农业科技有限公司,其有机质含量 $\geq 45\%$,总养分含量 $\geq 6\%$,有效活菌数 $\geq 0.2\text{ 亿}\cdot\text{g}^{-1}$ 。所有肥料均分为两部分,分别在6月和12月进行沟施。按照不同肥料总养分含量计算,F处理折合施入纯养分($\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O}$) $0.70\text{ kg}\cdot\text{棵}^{-1}$,M处理折合施入纯养分 $0.44\text{ kg}\cdot\text{棵}^{-1}$,O处理折合施入纯养分 $0.30\text{ kg}\cdot\text{棵}^{-1}$ 。

1.3 样品采集与测定

7—9月为柑橘生长的关键时期(果实膨大期),树体需要从土壤中获取大量的有机无机营养。因此,本研究选择于2019年7月开展样品采集工作。每个橘园随机设置三个 $12\text{ m}\times 12\text{ m}$ 取样样方(样方之间间隔不小于6 m),每个样方包含相邻三行中的12棵柑橘树。在每个样方中采用5点取样法,避开施肥沟利用土钻采集0~20 cm土壤并混合均匀。

土壤含水量采用烘干法测定;土壤有机质和全氮采用碳氮元素分析仪(Euro Vector EA3000型)测定;碱解氮采用碱解扩散法测定;有效磷采用钼锑抗比色法测定;速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定;

pH采用pH计测定(水土比为2.5:1)。

土壤微生物在提取总DNA后使用338F、806R以及ITS1、ITS2R分别对细菌16S rRNA基因V3~V4区和真菌ITS基因ITS1区进行扩增,使用NEXTFLEX® Rapid DNA-Seq Kit进行建库,并在上海美吉生物医药科技有限公司用MiSeq PE300平台进行测序。土壤微生物生物量碳采用氯仿熏蒸法测定,同时采用磷脂脂肪酸法(PLFAs)测定细菌、真菌分子团浓度。土壤线虫采用改进的淘洗-离心-漂浮法提取,之后在40倍显微镜下计数,在400倍显微镜下鉴定。土壤螨采用Tullgren漏斗法进行分离,随后将螨制作成永久玻片并在光学显微镜下进行形态学鉴定。蚯蚓的收集采用电击法,之后进行形态学鉴定。

1.4 统计分析

土壤微生物测序数据由Fastp软件对原始测序序列进行质控,Flash软件进行拼接,根据97%的相似度对序列进行OTU聚类并剔除嵌合体后,利用RDP classifier对每条序列进行物种分类注释,计算微生物群落物种的丰富度和多样性指数,包括Chao1指数、香农指数(H')和优势度指数(λ)。

总微生物PLFA浓度乘以转换值11.3得到微生物生物量碳^[7],真菌分子团(18:1 ω 9;18:2 ω 6,9)的浓度乘以转换值42得真菌生物量碳^[8],细菌生物量碳为两者差值。根据上述计算方法,获得各处理中真菌、细菌生物量碳的比例如下:F处理0.58/1,M处理0.16/1,O处理0.23/1。

土壤线虫根据食性划分为食细菌线虫(Ba)、食真菌线虫(Fu)、植物寄生线虫(Pp)和杂食捕食性线虫(Om-Ca)四个营养类群,并在营养类群分析的基础上计算其香农指数(H')、优势度指数(λ)、瓦斯乐斯卡指数(WI)、类群数(S)、结构指数(SI)和富集指数(EI)。

土壤螨虫根据食性划分为菌食性隐气门螨(FCR)、菌食性非隐气门螨(FNCR)、食线虫螨(NEM)和捕食性螨(PRE)^[9],并计算类群数(S)、香农指数

(H')和优势度指数(λ)。

土壤蚯蚓计算类群数(S)、香农指数(H')和优势度指数(λ)。

处理间的土壤理化性质、微生物量和土壤生物指标均使用SPSS进行单因素方差分析, $P<0.05$ 被认为具有显著性差异。

2 结果与讨论

2.1 不同施肥方式下橘园土壤化学性质差异

与单施化肥相比,施用化肥+厩肥或单施生物有机肥显著提高了有机质(SOM)含量($P<0.05$)(表1),这与已有的研究一致,主要归因于有机肥施用长期向土壤补充大量有机质^[10]。梁路等^[11]的研究指出,与单独施用化肥相比,配施有机肥能够显著提高土壤养分含量^[11]。但在本研究所测定的土壤养分中,总氮(TN)、碱解氮(AN)和有效磷(AP)在各处理间均无显著差异,仅施用化肥+厩肥的速效钾(AK)含量显著高于单施化肥的处理(表1)。需要注意的是,本研究中各处理投入的纯养分含量并不一致,施用化肥+厩肥和单施生物有机肥投入的纯养分仅为单施化肥的62.9%和42.9%。长期以来,单施化肥与施用化肥+厩肥和单施生物有机肥处理相比投入的纯养分含量差异巨大,但并未导致土壤有效养分含量的显著下降,这从土壤肥力维持方面验证了橘园有机替代的可行性。这种作用与有机肥庞大的孔隙结构和巨大的比表面积有关,在土壤中形成有机-无机复合物和大粒径团聚体,进而改善土壤结构,从而减少土壤养分淋失。此外,生物有机肥的缓效性有助于腐殖质的形成,长期作用也有利于土壤肥力的维持与提升。施用化肥+厩肥导致土壤酸化,其土壤pH值显著低于单施化肥的处理($P<0.05$),一方面可能是因为厩肥中含有大量的腐植酸,施入土壤后 H^+ 解离,从而使土壤pH下降,另一方面可能是因为厩肥施用后土壤微生物活性提升,激发土壤中原有有机质的分解,从而产生大量氨基酸、腐植酸等小分子有机酸,促使土壤

表1 不同施肥方式下橘园土壤化学性质

Table 1 Soil chemical properties of citrus orchard under different fertilizer applications

处理 Treatment	pH	有机质 SOM/(g·kg ⁻¹)	总氮 TN/(g·kg ⁻¹)	碱解氮 AN/(mg·kg ⁻¹)	有效磷 AP/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 AK/(mg·kg ⁻¹)
F	6.46±0.55a	15.36±3.11b	1.25±0.17a	48.53±6.57a	70.64±2.51a	313.00±98.29b
M	5.21±0.15b	21.55±2.55a	1.53±0.10a	57.40±7.14a	96.89±3.66a	480.00±33.03a
O	5.72±0.22ab	21.00±0.78a	1.38±0.05a	48.18±2.40a	58.37±8.2a	351.67±48.71ab

注:同一列中不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Notes: Different letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$).

pH值降低^[12]。

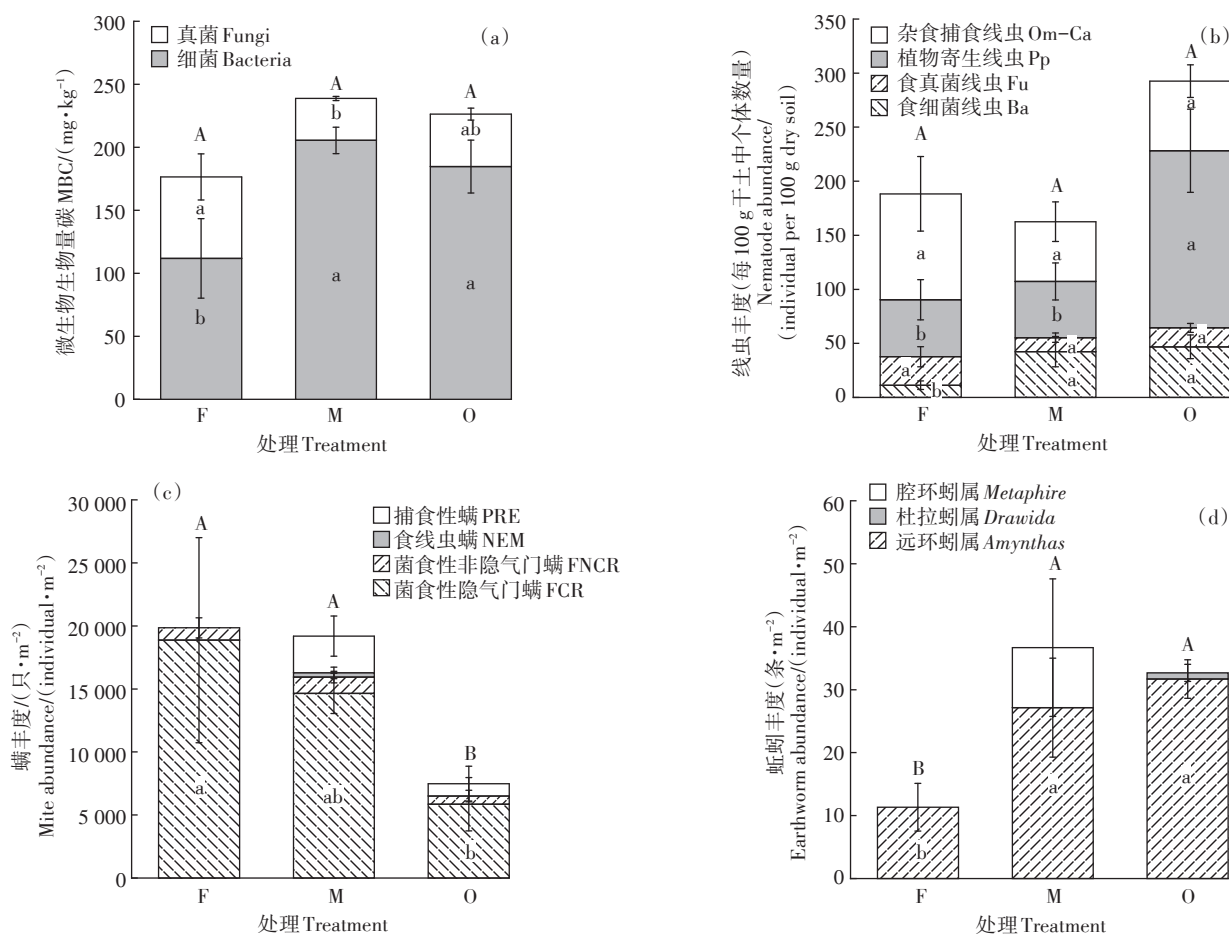
2.2 不同施肥方式下橘园土壤生物群落结构差异

2.2.1 微生物

图1a为不同施肥处理下土壤微生物生物量碳,与单施化肥相比,施用厩肥+化肥或单施生物有机肥均提高了微生物生物量碳和细菌生物量碳,降低了真菌生物量碳,且提高了土壤微生物的细菌/真菌比例,这和多数研究结果一致^[13],可能是有机肥的施用提供了大量的有机营养物质,能促进土壤中微生物的生长,同时生物有机肥中含有大量的有益功能菌,对土著微生物有一定的活化作用,加速土壤中有益微生物(如好氧自生固氮菌、厌氧自生固氮菌等)的生长繁殖^[14],抑制真菌生长。

高通量测序结果(图2)显示,变形菌门(Proteobacteria)、酸杆菌门(Acidobacteria)、放线菌门(Acti-

nobacteria)和绿弯菌门(Chloroflexi)是土壤中主要的细菌类群,子囊菌门(Ascomycota)和担子菌门(Basidiomycota)是土壤中主要的真菌类群。与单施化肥相比,施用厩肥+化肥和施用生物有机肥的橘园土壤细菌群落中的酸杆菌门(Acidobacteria)相对丰度得到了明显提高(图2)。酸杆菌是土壤中一类重要的细菌类群,在纤维素降解过程中具有重要作用,其数量一般占细菌总量的20%左右,有的甚至可高达50%以上^[15]。酸杆菌具有嗜酸的特点,这可以部分解释在施用厩肥+化肥和施用生物有机肥橘园土壤中酸杆菌门相对丰度更高的原因。从真菌群落来看,施用厩肥+化肥和施用生物有机肥的橘园土壤子囊菌门(Ascomycota)和担子菌门(Basidiomycota)相对丰度高于单施化肥处理(图2)。子囊菌门与担子菌门在系统发育上有着密切的关系,从生态系统功能上来看,二



不同大写字母表示处理间生物总丰度(生物量)差异显著;不同小写字母表示处理间生物不同组分丰度(生物量)差异显著($P < 0.05$)
Different capital letters indicate significant differences in total biological abundance(biomass)among treatments; Different lowercase letters indicate significant differences in the abundance(biomass) of different biological components among the treatments($P < 0.05$)

图1 不同施肥方式下土壤生物丰度(生物量)

Figure 1 The abundance(biomass) of soil organisms under different fertilizer applications

者均能够促进植物残体的降解^[16]。总之,无论从细菌还是真菌来看,施用厩肥+化肥和施用生物有机肥橘园土壤中微生物优势种相对丰度的变化,均有助于促进植物残体的降解,这与厩肥和生物有机肥原料中大量使用的秸秆有关,也表明了土壤微生物群落结构对不同施肥方式的响应。

从土壤生物生态指数(表2)来看,化肥+厩肥的施用明显提高了微生物群落的 λ 指数,同时降低了群落 H' 指数和Chao1指数,可能是由于厩肥的施用改变了土壤养分含量,从而提高了某些特异功能微生物的种群密度,例如研究中观察到的几类优势菌门均与土壤养分密切相关^[17]。相比之下,生物有机肥对微生

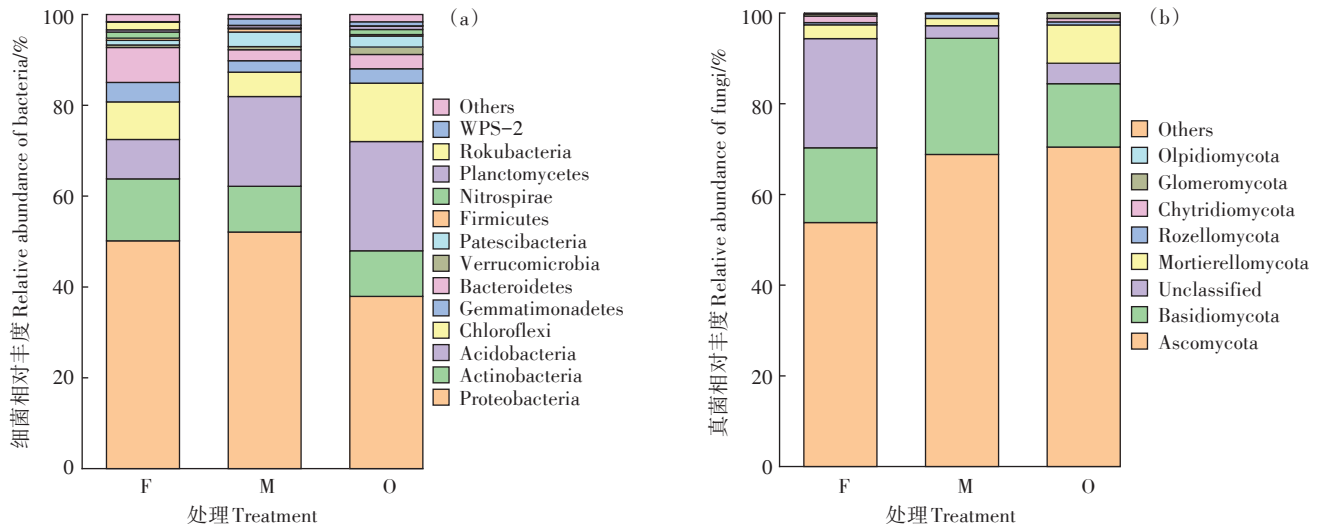


图2 不同施肥方式土壤微生物群落在门水平上的相对丰度

Figure 2 The relative abundance of microbial community at the phylum level under different fertilizer applications

表2 不同施肥方式土壤生物生态指数

Table 2 The ecological index of soil organisms under different fertilizer applications

类群Taxa		生态指数Ecological index	F	M	O
微生物 Microbe	细菌 Bacteria	Chao1	1 699±23a	1 276±257a	1 531±55a
		H'	6.28±0.19a	4.98±0.55b	5.86±0.14ab
		λ	0.005±0.001b	0.039±0.014a	0.007±0.001b
	真菌 Fungi	Chao1	534±8a	380±71b	518±60a
		H'	4.12±0.17a	2.98±0.37b	4.17±0.49a
		λ	0.041±0.005b	0.130±0.035a	0.037±0.035b
线虫 Nematode		H'	2.40±0.18a	2.31±0.41a	2.06±0.22b
		λ	0.13±0.02b	0.14±0.14b	0.24±0.06a
		WI	0.71±0.11b	1.06±0.01a	0.39±0.03c
		EI	55.56±8.25b	71.79±1.25a	68.18±8.77a
		SI	93.51±1.21a	82.33±6.32a	85.42±5.47a
		S	16.03±1.25a	15.32±2.62a	15.25±2.16a
螨 Mite		H'	1.86±0.12b	2.20±0.25a	1.92±0.81ab
		λ	0.19±0.03a	0.20±0.09a	0.21±0.38a
		S	8.04±0.82b	18.18±1.80a	9.02±0.12b
蚯蚓 Earthworm		H'	0.99±0.09b	1.17±0.02a	0.13±0.01a
		λ	0.40±0.03b	0.34±0.03b	0.94±0.08a
		S	3.0±1.6a	4.0±1.4a	2.0±0.8a

注:同行不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Notes: The different lowercase letters in a line indicate significant differences among treatments ($P<0.05$).

物群落生态指数的影响较小。虽然有机肥处理降低了微生物群落多样性和丰富度,但特定功能微生物种群密度的增加可能更利于物质分解和养分循环^[18]。

2.2.2 线虫

线虫是土壤生物中最为丰富的后生动物,在土壤有机质降解和养分循环过程中扮演重要的角色,同时线虫也是良好的土壤健康指示生物。本试验共鉴定得到土壤线虫 664 条,隶属于 26 属,F、M 和 O 处理中的线虫密度分别为每 100 g 干土 188、163 条和 293 条,分别隶属于 16、15 属和 15 属。在分离鉴定的线虫四大功能群中,杂食捕食性线虫和植食性线虫占比较高,分别为 30%~56% 和 22%~47%,其次为食细菌线虫,占比为 10.7%~18.0%,食真菌线虫占比最低,为 4.7%~11.3% (图 1b)。本研究中,不同施肥处理下橘园土壤的线虫数量无显著差异 (图 1b),这与 LIANG 等^[19]和 NAHAR 等^[20]发现有机肥投入增加土壤线虫数量的结论并不一致。土壤线虫总数受土壤中养分含量等因素影响^[21],本研究中各处理土壤速效养分含量无显著差异,可能是导致土壤线虫数量无显著差异的原因之一。与单施化肥相比,施用厩肥+化肥和施用生物有机肥均显著提高了橘园土壤中食细菌线虫的数量,这是因为厩肥、生物有机肥的投入能够持续稳定地提供土壤碳源和氮源,提高微生物(细菌)数量,为处于细菌通道的食细菌线虫提供丰富的食物来源^[21]。值得注意的是生物有机肥的施用较单施化肥和施用厩肥+化肥处理显著增加了植物寄生线虫的数量 (图 1b),可能归因于商品生物有机肥中额外加入的促生根激素。食细菌线虫在土壤有机质分解和养分循环中发挥着重要作用,被视为有益线虫;而植食性线虫以作物根系为食,不利于根系健康生长,被视为有害线虫^[21]。本研究说明有机肥施用模式可促进土壤有益线虫的生长繁殖,但商品生物有机肥对有害植食性线虫数量的促生作用也应该引起关注。

表 2 显示,施用生物有机肥的橘园土壤线虫多样性指数(H')显著低于其他处理,而优势度指数(λ)则显著高于其他处理,这可归因于施用生物有机肥处理中显著增加的植食性巴兹尔属(*Basiria*)线虫。瓦斯乐斯卡指数(WI)用于反映土壤线虫群落组成和土壤的健康程度, WI 值越大,表明土壤矿化途径主要由食细菌线虫和食真菌线虫参与,土壤健康程度越高^[22]。本研究显示,与单施化肥相比,施用厩肥+化肥显著提高了土壤线虫 WI 值,使土壤食物网向健康方向转变。虽然施用生物有机肥相比单独施用化肥显著降

低了土壤线虫 WI 值,但在土壤线虫营养结构方面,施用有机肥处理的富集指数(EI)却显著高于单施化肥的处理,说明土壤线虫可利用的养分资源较为丰富,有利于作物的生长^[23]。

2.2.3 螨

土壤螨是土壤生态系统中重要的功能群,其通过加速物质循环和能量流动维持地下生态系统。本试验共捕获土壤螨 46 523 只,隶属于 21 属,F、M 和 O 处理中螨的密度分别为 19 548、19 195 只 $\cdot m^{-2}$ 和 7 483 只 $\cdot m^{-2}$,分别隶属于 8、18 属和 9 属。在所有处理中,螨类群中均以甲螨亚目为优势种,其次依次为前气门亚目、中气门亚目,无气门亚目占比最小。甲螨是土壤螨类中种类和数量最多的一类,它们在螨类中的相对丰度大多为 30%~70%。甲螨自身特异的防御机制,如角质化或钙化的表皮、保护性的刚毛、坚硬的突起、良好的跳跃能力及一些特殊的分泌物等,使它们很少受到捕食者的攻击,这是甲螨种群密度较高的原因之一^[24]。土壤中的甲螨大多以真菌为食^[25],本研究中真菌生物量碳的下降部分解释了化肥+厩肥处理和生物有机肥处理使甲螨以及螨总数降低的现象。与单施化肥相比,有机肥处理提高了土壤捕食性螨的数量 (图 1c),土壤中的捕食性螨除了对碳、氮矿化做出较大的直接贡献外^[26],还可以通过捕食调节其他土壤动物的种群密度,从而间接地影响诸多地下生态过程。

在土壤螨生态指数方面,有机肥处理显著提高了螨群落多样性,但螨群落优势度并未发生明显的变化。有机肥处理群落多样性的提高主要是物种数增多导致的,尤其是在厩肥+化肥的处理中观察到了远高于单施化肥处理的螨种类 (表 2)。尽管有机肥处理下土壤螨的总数没有显著增加,但捕食性螨数量的上升以及螨群落多样性的提高表明施用有机肥的橘园土壤具有更高的生物活性^[27],有助于促进养分循环和作物生长。

2.2.4 蚯蚓

蚯蚓是土壤中常见的动物,被誉为“生态系统工程师”,在生态系统中具有重要作用,如调控微生物群落结构、促进凋落物分解、提高土壤肥力等^[28]。有机肥的施用改变了蚯蚓的群落结构,本研究共鉴定得到 3 属 7 种土壤蚯蚓 (图 1d),其中远环蚓属(*Amyntas*)是三个处理共有属,也是各处理中的优势属,腔环蚓属(*Metaphire*)为厩肥+化肥处理的独有属,杜拉蚓属(*Drawida*)为生物有机肥处理的独有属。与单施化肥

相比,厩肥配施化肥和单施生物有机肥均显著提高了远环蚓属的丰度和蚯蚓总丰度($P<0.05$)。蚯蚓根据其食性可划分为腐生者、根食者和捕食者,其中腐生者占绝大多数,由食碎屑者、食腐殖质者和粪食者组成。与单施化肥相比,两种有机肥处理均显著增加了土壤有机质的含量(表1),这可能是导致蚯蚓数量增加的主要原因。蚯蚓数量的增加能促进其对土壤和凋落物的取食,通过直接或间接作用调控微生物群落结构,提高微生物代谢活性^[29],同时蚯蚓掘穴形成的蚓道增加,有利于改良土壤结构,提高土壤养分可利用性^[30]。

厩肥配施化肥处理和单施生物有机肥处理较单施化肥处理均显著提高了蚯蚓群落多样性,单施生物有机肥显著提高了蚯蚓群落优势度(表2),两种有机肥处理均未显著改变蚯蚓的物种数。蚯蚓数量的增加表明更多的资源流向高营养级,而蚯蚓群落多样性的增加有利于维持生态系统的稳定。

3 结论

本研究比较了厩肥部分替代化肥和商品有机肥全量替代化肥模式下橘园土壤化学性质和土壤生物群落的变化,研究结论如下:

(1)有机肥替代化肥改变了微生物群落结构,并且显著提高了细菌生物量碳,降低了真菌生物量碳。

(2)有机肥替代化肥显著增加了细菌通道(细菌、食细菌线虫)和植物通道(植物寄生线虫)生物类群生物量。

(3)有机肥替代化肥降低了土壤螨总数,但提高了螨群落多样性和捕食性螨数量。

(4)有机肥替代化肥显著增加了蚯蚓的数量和群落多样性。

综上,与单施化肥相比,长期施用有机肥改变了橘园土壤生物群落结构,总体上促使土壤生物群落结构向有利于土壤养分循环和生态系统稳定的方向发展。

(本研究中线虫、螨、蚯蚓类群分类单位丰度数据详见补充材料,可扫描首页OSID码,点击“本文开放的科学数据与内容”查看)

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019. National Bureau of Statistics of the PRC. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [2] 雷靖, 梁珊珊, 谭启玲, 等. 我国柑橘氮磷钾肥用量及减施潜力[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(9): 1504-1513. LEI J, LIANG S S, TAN Q L, et al. NPK fertilization rates and reducing potential in the main citrus producing regions of China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(9): 1504-1513.
- [3] 农业部. 到2020年化肥使用量零增长行动方案[J]. 青海农技推广, 2015(2): 3-5, 11. Ministry of Agriculture of the PRC. Action plan for zero growth of fertilizer use by 2020[J]. *Qinghai Agro-Technology Extension*, 2015(2): 3-5, 11.
- [4] 温明霞, 徐建军, 王允镇, 等. 有机肥对柑橘园生产效应的影响[J]. 浙江柑橘, 2019, 36(3): 12-15. WEN M X, XU J J, WANG Y B, et al. Effect of organic fertilizer on production of citrus orchard[J]. *Zhejiang Ganju*, 2019, 36(3): 12-15.
- [5] 丁阔, 王雪梅, 陈波浪, 等. 施用黑炭和羊粪对库尔勒香梨园土壤理化性质与产量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(5): 449-455. DING K, WANG X M, CHEN B L, et al. Influences of applying black carbon and sheep excrement on soil properties and yield of korla fragrant pear orchard[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(5): 449-455.
- [6] BARDGETT R D, PUTTEN W H V D. Belowground biodiversity and ecosystem functioning[J]. *Nature*, 2014, 515(7528): 505-511.
- [7] JOHANSEN A, OLSSON S. Using phospholipid fatty acid technique to study short-term effects of the biological control agent *Pseudomonas fluorescens* DR54 on the microbial microbiota in barley rhizosphere[J]. *Microbial Ecology*, 2005, 49(2): 272-281.
- [8] JOERGENSEN R G, WICHERN F. Quantitative assessment of the fungal contribution to microbial tissue in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(12): 2977-2991.
- [9] HOLTkamp R, KARDOL P, VAN DER WAL A, et al. Soil food web structure during ecosystem development after land abandonment[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, 39(1): 23-34.
- [10] 邵兴芳, 徐明岗, 张文菊, 等. 长期有机培肥模式下黑土碳与氮变化及氮素矿化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 326-335. SHAO X F, XU M G, ZHANG W J, et al. Changes of soil carbon and nitrogen and characteristics of nitrogen mineralization under long-term manure fertilization practices in black soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(2): 326-335.
- [11] 梁路, 马臣, 张然, 等. 有机无机肥配施提高旱地麦田土壤养分有效性及酶活性[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(4): 544-554. LIANG L, MA C, ZHANG R, et al. Improvement of soil nutrient availability and enzyme activities in rainfed wheat field by combined application of organic and inorganic fertilizers[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(4): 544-554.
- [12] 贾中涛, 王文亮, 汤建华, 等. 畜禽粪便有机肥与氮肥配施对玉米土壤性状的影响[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(S1): 34-39. JIA Z T, WANG W L, TANG J H, et al. Effect of animal manure organic fertilizer and nitrogen combined application on maize soil physical & chemical properties[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(S1): 34-39.
- [13] 宋以玲, 于建, 陈士更, 等. 化肥减量配施生物有机肥对油菜生长及土壤微生物和酶活性影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 352-360. SONG Y L, YU J, CHEN S G, et al. Effects of reduced chemi-

- cal fertilizer with application of bio-organic fertilizer on rape growth, microorganism and enzymes activities in soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(1):352-360.
- [14] 张迎春, 顾建明, 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. ZHANG Y C, XIE J M, LI J, et al. Effects of partial substitution of chemical fertilizer by bio-organic fertilizer on asparagus lettuce and soil physical-chemical properties and microorganisms[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(4):196-205.
- [15] 王光华, 刘俊杰, 于镇华, 等. 土壤酸杆菌门细菌生态学研究进展[J]. 生物技术通报, 2016, 32(2):14-20. WANG G H, LIU J J, YU Z H, et al. Research progress of Acidobacteria ecology in soils[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2016, 32(2):14-20.
- [16] 郑九文, 邢鹏, 余多慰, 等. 不同水生植物残体分解过程中真菌群落结构[J]. 生态学杂志, 2013, 32(2):368-374. ZHENG J W, XING P, YU D W, et al. Fungal community structure during the decomposition of various aquatic plant litters[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(2):368-374.
- [17] 李金融, 侯湖平, 王琛, 等. 基于高通量测序的复垦土壤细菌多样性研究[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(12):148-157. LI J R, HOU H P, WANG C, et al. Soil bacteria diversity of reclaimed soil based on high throughput sequencing[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(12):148-157.
- [18] 王小玲, 马琨, 伏云珍, 等. 免耕覆盖及有机肥施用对土壤真菌群落组成及多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(3):890-898. WANG X L, MA K, FU Y Z, et al. Effects of no-tillage, mulching, and organic fertilization on soil fungal community composition and diversity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(3):890-898.
- [19] LIANG W J, LOU Y, 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.
- [20] 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.
- [21] 任宏飞, 高伟, 黄绍文, 等. 设施蔬菜有机肥/秸秆替代化肥模式对土壤线虫群落的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(7):1303-1317. REN H F, GAO W, HUANG S W, et al. Effects of partial substitution of chemical fertilizer with manure and/or straw on soil nematode community in greenhouse vegetable production[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(7):1303-1317.
- [22] 刘婷, 叶成龙, 陈小云, 等. 不同有机肥源及其与化肥配施对稻田土壤线虫群落结构的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(12):3508-3516. LIU T, YE C L, CHEN X Y, et al. Effects of different organic manure sources and their combinations with chemical fertilization on soil nematode community structure in a paddy field of east China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(12):3508-3516.
- [23] 陈云峰, 韩雪梅, 李钰飞, 等. 线虫区系分析指示土壤食物网结构和功能研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(5):1072-1084. CHEN Y F, HAN X M, LI Y F, et al. Approach of nematode fauna analysis indicate the structure and function of soil food web[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(5):1072-1084.
- [24] HEETHOFF M, BERGMANN P, LAUMANN M, et al. The 20th anniversary of a model mite: A review of current knowledge about *Archezogozetes longisetosus* (Acari Oribatida) [J]. *Acarologia*, 2013, 53(4):353-368.
- [25] COLEMAN D C, CALLAHAM M A, CROSSLEY D A. Fundamentals of soil ecology[M]. Elsevier Inc., 2018.
- [26] BERG M, RUITER P D, DIDDEN W, et al. Community food web, decomposition and nutrient mineralisation in a stratified Scots pine forest soil[J]. *Oikos*, 2001, 94(1):130-142.
- [27] CAO Z P, HAN X M, HU C, et al. Changes in the abundance and structure of a soil mite (Acari) community under long-term organic and chemical fertilizer treatments[J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 49:131-138.
- [28] 黄初龙, 张雪萍. 蚯蚓环境生态作用研究进展[J]. 生态学杂志, 2005, 24(12):1466-1470. HUANG C L, ZHANG X P. Research progress on environmental and ecological functions of earthworm[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(12):1466-1470.
- [29] 郑宪清, 范晓芬, 张翰林, 等. 威廉环毛蚓耕作时间对菜田土壤微生物群落多样性及碳代谢特征的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(6):596-602. ZHENG X Q, FAN X F, ZHANG H L, et al. Effects of *Pheretima guillelmi* cultivation time on microbial community diversity and characteristics of carbon metabolism in vegetable soil [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(6):596-602.
- [30] BROWN G G, EDWARDS C A, BRUSSAARD L. How earthworms affect plant growth: Burrowing into the mechanisms[M]//EDWARDS C A. Earthworm Ecology. CRC Press, 2004:13-49.