

有机肥配施生物菌肥对设施黄瓜土壤改良效果

金珊, 刘雪, 陈卓帛, 李路瑶, 陈雪, 耿兵

引用本文:

金珊, 刘雪, 陈卓帛, 李路瑶, 陈雪, 耿兵. 有机肥配施生物菌肥对设施黄瓜土壤改良效果[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(9): 1995–2003.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0329>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长期施肥对黄土旱塬农田土壤微生物量碳、氮、磷的影响

李春越, 郝亚辉, 薛英龙, 王益, 党廷辉

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1783–1791 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0240>

不同施肥措施对华北潮土区玉米田土壤微生物碳源代谢多样性的影响

刘红梅, 安克锐, 王慧, 张思宇, 赵建宁, 杨殿林, 张贵龙

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2336–2344 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0509>

氮肥减量配施有机肥对苹果产量品质及土壤生物学特性的影响

杨莉莉, 王永合, 韩稳社, 马林英, 杨乖成, 韩艳云, 同延安

农业环境科学学报. 2021, 40(3): 631–639 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1160>

不同土壤添加剂对太湖流域水稻产量及氮磷养分利用的影响

刘雅文, 马资厚, 潘复燕, 杨林章, 薛利红

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1395–1405 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1674>

施用鸡粪有机肥对种植小油菜土壤微生物群落结构多样性的影响

李可, 孙彤, 孙涛, 徐应明, 孙约兵

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2316–2324 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0036>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

金珊, 刘雪, 陈卓帛, 等. 有机肥配施生物菌肥对设施黄瓜土壤改良效果[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(9): 1995–2003.

JIN S, LIU X, CHEN Z B, et al. Effects of organic fertilizer containing biofertilizer on soil improvement of vegetables in facilities[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(9): 1995–2003.

有机肥配施生物菌肥对设施黄瓜土壤改良效果

金珊, 刘雪, 陈卓帛, 李路瑶, 陈雪, 耿兵*

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要:探究有机肥配施生物菌肥对设施蔬菜种植过程中不合理施肥等所导致的连作障碍、蔬菜生长状况不良和土壤养分失衡等问题的改善情况。本研究通过田间试验,设置了空白对照、传统施肥、单施生物菌肥、有机肥与生物菌肥配施和液态有机碳与生物菌肥配施5个处理,重点对比不同施肥处理对土壤基本化学性质、土壤酶活性、设施蔬菜的生长状况和蔬菜根际微生物群落结构的影响。有机肥配施生物菌肥处理的叶绿素相比空白对照和传统施肥处理分别提升了6.04%和8.74%,且明显提高土壤中速效养分和酶活性,最大增幅分别达22.80%和43.88%,单施生物菌肥的处理相比传统施肥增加了土壤中细菌和放线菌的数量(11.96%、9.39%)、降低了真菌数量(21.54%),改善了土壤微生物结构,丰富了细菌多样性,有助于降低设施蔬菜土传病害的发生。有机肥配施生物菌肥更有助于达到土壤-植物-微生物系统优化效果,相比其他处理更有利于提升土壤肥力质量、促进设施黄瓜田间生长、改善土壤微生态环境和提高土壤微生物多样性,而单施生物菌肥在提升土壤微生物数量上也有很好的效果。

关键词:有机肥;生物菌肥;设施黄瓜;田间生长;土壤肥力质量;土壤微生物

中图分类号:S642.2;S626 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)09-1995-09 doi:10.11654/jaes.2023-0329

Effects of organic fertilizer containing biofertilizer on soil improvement of vegetables in facilities

JIN Shan, LIU Xue, CHEN Zhuobo, LI Luyao, CHEN Xue, GENG Bing*

(Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: This study was conducted to investigate the effects of organic fertilizer containing bio-fertilizer on continuous crop disorders, poor vegetable growth, and soil nutrient imbalance caused by unreasonable fertilization when planting vegetables in facilities. Five treatments (a blank control, traditional fertilization, single application of bio-fertilizer, organic fertilizer with bio-fertilizer, and liquid organic carbon with bio-fertilizer) were set up through field experiments, focusing on the effects of different fertilization treatments on the basic chemical properties of soil, soil enzyme activity, the growth condition of facility vegetables, and the structure of the vegetable soil microbial community. The effects of organic fertilizer with bio-fertilizer on soil fertility quality, field growth of vegetables, and the microecological environment were studied. Treatment with organic fertilizer containing bio-fertilizer increased chlorophyll by 6.04% and 8.74%, respectively, compared to the blank control and conventional fertilizer treatments, and significantly increased the fast-acting nutrients and enzyme activities in the soil by a maximum of 22.80% and 43.88%, respectively. The treatment with a single application of bio-fertilizer increased the number of bacteria and actinomycetes (11.96% and 9.39%, respectively). It decreased the number of fungi (21.54%) in the soil compared to the conventional application, improving the soil microbial structure and enriching the bacterial diversity, which helped to reduce the occurrence of soil-borne diseases in facility vegetables. Organic fertilizer with bio-fertilizer is more helpful in achieving an optimized effect on the soil-plant-microbial system, which is more beneficial in enhancing the quality of the environment and increasing the diversity of soil microorganisms compared with other treatments, whereas bio-fertilizer alone is also able to enhance the number of soil microorganisms.

Keywords: organic fertilizer; biological bacterial fertilizer; facility cucumber; field growth; soil fertility quality; soil microorganism

收稿日期:2023-04-26 录用日期:2023-06-21

作者简介:金珊(1997—),女,新疆昌吉人,硕士研究生,从事设施蔬菜土壤改良研究。E-mail:shan_jin2021@163.com

*通信作者:耿兵 E-mail:gengbing2000@126.com

基金项目:北京市绿色有机示范区(带)建设项目

Project supported: Beijing Green Organic Demonstration Zone(Belt) Construction Project

设施栽培在我国农业发展中起着十分重要的作用,而设施蔬菜是设施栽培发展中的一项代表性产业,它的生产面积、产值和经济价值分别占全国蔬菜的20%、35%和60%^[1],同时,设施蔬菜也是北京市蔬菜产业的主要形式,在保障首都蔬菜全面供应方面具有重要作用,其中设施黄瓜是主要蔬菜作物之一^[2]。近年来,伴随着设施蔬菜种植业的迅速发展,长期连作及化肥不合理施用所导致的土壤养分不均衡、土壤肥力质量下降、土传病害日趋严重以及土壤微生物生态环境破坏等问题十分突出,而更为重要的是设施蔬菜产量降低和品质下降已经严重影响了设施蔬菜种植业的安全高效和绿色优质化发展^[3-4]。因此,如何优化施肥模式,在减少化肥投入的基础上同时满足设施蔬菜所需的营养成分并提高产量和品质,已经成为构建绿色蔬菜产业所要面对的重大课题之一^[5]。

有机肥含有植物生长需要的大量元素和微量元素,并且富含纤维素、蛋白质、氨基酸等营养物质,肥效缓而持久,对环境友好,对于维持土壤肥力也有很好的效果。已有研究表明,有机肥替代相比单施化肥显著提高了设施土壤pH,减缓了酸化现象^[6-7],也能够有效地改善设施蔬菜的品质^[8-9]。生物菌肥在改良土壤、预防设施蔬菜土传病害、恢复地力、降解有毒物质、维持根际微生物区系平衡方面有很好的作用^[10],除此之外对很多作物的种植增产、设施蔬菜土传病害的防治也产生了很好的效果^[11-12]。于占东等^[13]研究表明有机肥配施生物菌肥对面条菜茎粗、干物质含量等影响较大,显著提高产量,但针对其在设施蔬菜土壤改良、促进作物生长等方面的作用还有待进一步研究。池福铃等^[14]研究发现配施有机肥和生物菌肥增加了小白菜的品质和产值,经济效益提高。高喜叶等^[15]发现有机肥与生物菌肥配施对胡萝卜长势、胡萝卜素、叶绿素含量及肉质根生长也有促进效果。王涛等^[16]发现施用生物菌肥宁盾后,细菌、放线菌增加,真菌数量减少,于会丽等^[17]研究发现随生物菌肥用量增加,土壤微生物活性和多样性指数呈先增加后降低趋势,针对有机肥和生物菌肥配施的效果已有部分研究,但对二者配施后土壤肥力提升效果以及土壤微生物多样性变化等综合性的研究还较少^[16-18]。

因此,本文从有机肥与生物菌肥配施研究不足之处出发,对不同施肥情况下设施蔬菜生长状况、土壤理化性质、营养物质和微生物数量及群落结构的变化情况进行评价,较为系统地分析了有机肥与生物菌肥配施对设施蔬菜生长以及土壤改良的效果,以期为解决

设施蔬菜连作障碍问题提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验于2022年6月至11月在北京市顺义区大孙各庄环发所试验基地进行,该试验区地处暖温带半湿润半干旱大陆季风气候,年平均气温在11.5℃左右,年日照时数可达到2 746 h,年相对湿度为58%。土壤0~20 cm养分含量为碱解氮163.96 mg·kg⁻¹,全氮(N)1.70 g·kg⁻¹,速效磷(P)27.51 mg·kg⁻¹,速效钾(K)201.33 mg·kg⁻¹,有机质42.15 g·kg⁻¹。

1.2 试验材料

黄瓜:大成种苗“靓绿460”,由北镇市大成农业科技有限公司提供。

有机肥:普通有机肥(由中国农业科学研究院环发所试验基地研制,其中氮含量2%、磷含量2%、钾含量1%,总养分含量为6.19%、有机质的质量分数为56.11%)、液态有机碳(有机碳养分≥150 g·L⁻¹,有机质含量为25%,氮和钾的含量都约为100 g·L⁻¹,由福建绿洲生化有限公司提供)。

生物菌肥:“禾神元”多效微生物菌肥(有效活菌数≥2.0亿·mL⁻¹,由神州汉邦(北京)生物技术有限公司提供)。

化肥:复合肥(氮含量15%、磷含量15%、钾含量15%,安徽辉隆集团五禾生态肥业有限公司提供)、尿素(总氮≥46.0%,中国石油天然气股份有限公司提供)。

1.3 试验设计

本试验共设置5个处理,每个处理3次重复,共计15个小区。每个小区长6 m,宽1.73 m,面积为10.38 m²,试验采用完全随机区组设计,处理如表1所示。

在各处理底肥施入后人工整地,黄瓜提前在育苗基质中进行培育,黄瓜苗龄为30 d左右时,将黄瓜幼苗从育苗基质中统一移栽至试验小区,其中黄瓜株距和行间距分别为45 cm和60 cm,黄瓜于2022年8月25日育苗,2022年9月20日移栽,2022年12月19日拉秧,生育期91 d,在试验期间各处理均进行定期追肥(约10 d追施一次),并适时适量灌水。

1.4 测定项目与方法

在黄瓜生长苗期(移栽后15 d),对植株生长情况进行测定,叶绿素含量的测定用TYS-B型叶绿素测定仪进行测定。

在黄瓜生长结果期采集土样(移栽后60 d),风干

表1 试验设计
Table 1 Experiment design

处理 Treatment	底肥 Basal fertilizer				追肥 Additional fertilizer				
	有机肥/(kg·hm ⁻²)		多效微生物菌肥/ (mL·hm ⁻²)	化肥/(kg·hm ⁻²)		多效微生物菌肥/ (mL·hm ⁻²)	化肥/(kg·hm ⁻²)		液态有机碳/ (kg·hm ⁻²)
	有机肥	液态有机碳		复合肥	尿素		复合肥	尿素	
CK									
T1	45 000			375			150	150	
T2	15 000		1 500			1 500			
T3	22 500		750	187.5		1 500	75	75	
T4		75	1 500			1 500			75

粉碎后装袋以测定土壤化学性质和土壤酶活性。

土壤化学性质:土壤pH测定采用电位法(其中土水比为1:5),土壤全氮测定采用半微量开式法(采用0.01 mol·L⁻¹ 1/2 HCl滴定),土壤碱解氮采用碱解扩散法测定,土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定,土壤速效磷测定采用钼锑抗比色法,土壤速效钾测定采用NH₄OAC浸提-火焰光度法^[19]。

土壤酶活性:土壤碱性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法通过北京盒子生工科技有限公司试剂盒测定,土壤蔗糖酶采用可见分光光度法通过Solarbio公司试剂盒测定,土壤过氧化氢酶采用紫外分光光度法测定和脲酶采用靛酚蓝比色法通过苏州格锐思生物科技有限公司试剂盒测定。

土壤微生物:微生物数量采用平板稀释法测定,其中细菌采用牛肉膏蛋白胨培养基、真菌采用马丁氏培养基、放线菌采用高氏1号培养基。微生物多样性送至上海美吉生物医药科技有限公司通过Illumina Miseq PE300测序平台进行16S rRNA基因V3~V4可变区的高通量测序,引物采用38F(ACTCCTAC-GGGAGGCAGCAG)和806R(GGACTACHVGGGT-WTCTAAT)测定。

1.5 数据统计及分析

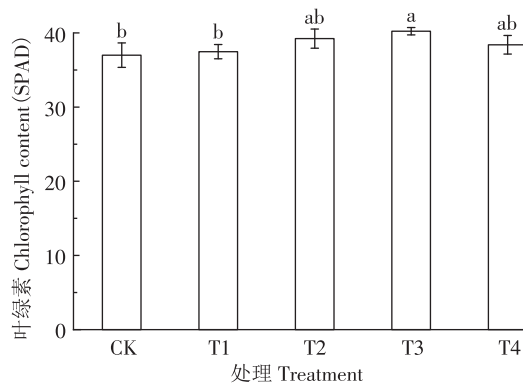
试验数据利用Excel 2010软件和SPSS27.0软件对数据进行统计和分析,同时采用Duncan法进行数据差异显著性多重比较,其中显著性水平设为 $\alpha = 0.05$,利用Origin 2019进行绘图,微生物多样性通过Illumina Miseq PE300测序平台分析。

2 结果与讨论

2.1 对黄瓜叶绿素的影响

由图1可以看出,各处理间的叶绿素含量变化呈现如下趋势:CK<T1<T4<T2<T3,虽其他处理与空白对照相比,叶绿素含量均有所提升,但仅有T3处理较

CK和T1处理有显著差异,其他处理均没有显著差异,引起差异的原因可能是在有机肥促进植物生长发育^[20]的基础上生物菌又为黄瓜根系提供适合的微生态生长环境,促进根系的生长和增强根系的吸水吸肥能力,为黄瓜植株的生长提供充足的水分和养料,从而促进黄瓜植株生长,进而促进了黄瓜叶绿素含量的增加^[21]。



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Different lowercase letters indicate significant difference between treatments($P<0.05$). The same below.

图1 苗期设施黄瓜在不同处理下叶绿素含量变化

Figure 1 Changes of plant chlorophyll of cucumber under different treatments at seedling stage

2.2 对土壤养分的影响

施用生物菌肥对土壤养分的影响如表2所示,其中T2、T4和T3处理均可降低土壤pH,且这3个处理与空白对照和T1处理相比有显著的差异,pH的降幅最高可达到4.63%,这可能是因为生物菌肥中的有益微生物在植物生长过程中分解了土壤有机质,从而产生有机酸中和了土壤的碱性^[22-23]。与CK相比,其他施肥处理(T1、T2、T3、T4)均能提高土壤全氮(分别增高1.75%、6.43%、8.19%、3.51%)、碱解氮(2.73%、6.18%、12.54%、7.12%)、有机质(2.81%、16.51%、

表2 不同施肥处理对土壤养分的影响

Table 2 Effects of different fertilization treatments on soil nutrients

处理 Treatment	pH	全氮 Total nitrogen/(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Avail. N/(mg·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	速效磷 Avail. P/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Avail. K/(mg·kg ⁻¹)
CK	7.77±0.05a	1.71±0.04d	164.27±3.15d	42.33±1.23c	27.87±0.68d	200.33±4.62c
T1	7.83±0.05a	1.74±0.03cd	168.75±3.15cd	43.52±0.53c	28.86±0.13c	249.33±4.04a
T2	7.53±0.04b	1.82±0.01ab	174.42±2.25bc	49.32±1.48a	29.69±0.32b	242.00±6.56ab
T3	7.41±0.05c	1.85±0.04a	184.87±3.73a	46.30±0.83b	30.59±0.11a	246.00±9.64ab
T4	7.56±0.04b	1.77±0.02bc	175.96±4.29b	47.62±1.87ab	29.27±0.29bc	235.67±7.51b

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between treatments ($P<0.05$).

9.38%、12.50%)、速效磷(3.55%、6.53%、9.78%、5.04%)、速效钾(24.46%、20.80%、22.80%、17.64%)的含量,其中T1相较于CK处理除土壤速效磷和速效钾以外,其他土壤养分增幅并不显著,而T2、T3、T4处理与CK、T1之间的差异较为显著,可以看出3个有机肥配施生物菌肥的处理更有助于提升土壤养分含量,这可能是因为3个处理中生物菌的地衣芽孢杆菌有助于促进土壤中难溶的磷、钾转化,使得土壤中部分速效成分增加。除此之外,有机质的含量也有所增加,这可能是因为有机肥本身就含有较多有机物质,再加上生物菌肥中含有的有益微生物进入土壤后加速了土壤有机态养分的转化。由此表明,有机肥与生物菌肥配施的施肥模式相较于传统的施肥模式更有助于提升土壤肥力,但3个有机肥与生物菌肥配施的处理在各种土壤养分的提升各有不同,其中T2与T4处理在相同生物菌肥用量下,土壤养分间的差异并不显著,而传统施肥量减半用生物菌肥替代的T3处理相较于T2、T4处理在土壤养分提升方面有显著差异,这说明在适量减少化肥使用的基础上加入一些生物菌肥对于土壤养分的改善效果更佳。

2.3 对土壤酶活性的影响

土壤酶活性在不同施肥处理下的变化如图2所示,不同施肥处理土壤过氧化氢酶活性各有不同,呈现出以下趋势:CK<T3<T1<T4<T2。各处理按土壤碱性磷酸酶活性大小排序为CK<T1<T2<T4<T3,其中T2、T3和T4处理的土壤磷酸酶活性均显著高于T1和CK处理。不同处理之间的土壤脲酶活性也存在一定的差异,呈现出CK<T1<T4<T3<T2的变化趋势,其中CK和T1、T3和T4处理相互之间并无显著差异,而T2处理的脲酶活性达到最高且与其他处理均有显著差异,增幅达到了41.62%。不同施肥处理下土壤蔗糖酶活性变化趋势为:CK<T1<T3<T4<T2,各处理的土壤蔗糖酶活性均高于CK,除T1与CK差异不显著外,

其他处理与CK相比均有显著差异。

已有大量研究表明施用生物菌肥可增加土壤酶活性^[24-28],其中过氧化氢酶活性与土壤有机质含量、土壤微生物数量以及土壤肥力之间都存在着十分密切的联系,可以通过过氧化氢酶活性的高低表示土壤氧化过程的强度^[29],这与本文研究结果一致,T2、T3和T4处理均可提高土壤过氧化氢酶活性且与CK差异显著,其中T2处理的酶活性最高,达到了503.85 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$,且T2处理的有机质提升也是最大的。T3处理土壤中脲酶活性有显著提高,增幅达到了28.25%,这与曲成闯等^[30]的研究结果一致,除此之外,T2和T4处理相比CK和T1处理也均在不同程度上对土壤碱性磷酸酶活性有所提升,但T3处理对碱性磷酸酶的提升效果最好,由此可以证明有机肥与生物菌肥配施可以增加土壤有效磷的成分,促进土壤营养元素的平衡,提高土壤养分的含量和土壤酶活性,进而提高土壤肥力,能够做到及时补给因植株生长繁殖所消耗的营养,本文中T3处理土壤蔗糖酶活性也有一定的增加,可能是因为氮素供给可以提升土壤微生物活性,进而促进秸秆腐解,补充土壤养分,提高土壤蔗糖酶活性,这与文本中2.2中土壤氮含量变化相一致。另外,本研究还发现液态有机碳相比化肥也更有利于土壤肥力的提升,这可能与它本身就富含碳素和速效养分,具有高效、肥力持久和促植物生长、提高抗逆性的特点有关,这与王卓等^[31]的研究一致。

2.4 对土壤微生物数量变化的影响

不同施肥处理下土壤中可培养的微生物数量各有差异,通过对土壤中的细菌、真菌和放线菌的数量进行对比后发现,其中细菌数量最多,为 10^7 数量级;放线菌次之,为 $10^5\sim10^6$ 数量级;真菌数量最低,为 $10^4\sim10^5$ 数量级。由图3可知,与CK相比,T1处理可在不同程度上提高土壤中微生物的数量,其中细菌、真菌、放线菌分别增加了24.77%、41.04%、8.56%。与

T1相比,T2、T3和T4处理呈现增加土壤中细菌、放线菌数量而降低土壤中真菌数量的趋势,且各处理与CK、T1之间均呈显著差异,其中T2处理提高土壤中细菌、放线菌数量最为明显,增加量可达到19.14%和16.66%,T3处理降低土壤真菌量最大。

生物菌肥中本就含有大量有益微生物,因此施用生物菌肥相比传统化肥更能够增加土壤中微生物数量,改善土壤微生物群落结构。本文通过对土壤微生物数量进行对比发现,不同施肥处理相比空白对照均能够在不同程度上提高土壤中细菌、真菌、放线菌数量,表明土壤施入肥料后更有利于微生物的生长和繁殖,提升了土壤微生物的密度,这与苏煜等^[32]的研究结果一致,但与T1处理相比,T2、T3和T4处理更能提高土壤中细菌、放线菌的数量,并降低了土壤中真菌的数量,这与生物菌肥施用于连作黄瓜^[33]、番茄和辣椒^[34]、切花菊^[35]的土壤后得到的结果基本一致,细菌数量明显增多可能是与本研究供试的生物菌肥其主要功能菌是芽孢杆菌有关,而真菌数量降低可能是因为生物菌肥能够在增加土壤有益菌的同时降低了部分病原真菌的数量,这也能够说明有机肥与生物菌肥配施,在培肥土壤,促进设施蔬菜生长,提高产量、品质的同时也减缓了设施蔬菜土传病害的发生。T4处

理与T2处理在生物菌肥量施用相同的情况下,对土壤微生物数量变化影响不同,说明T4处理中施用的液态有机碳相比发酵的有机肥对土壤微生物数量的提升效果较差。T3处理对于土壤中细菌、放线菌的数量提升效果没有T2处理好,可能是因为生物菌肥施用量较少造成的。

2.5 对土壤细菌群落结构的影响

2.5.1 细菌群落多样性分析

在97%相似性的阈值下对OTUs进行生物信息统计分析,结果如图4所示。其中通过Alpha多样性,对不同施肥处理下土壤中细菌的物种丰富度和群落多样性进行分析,发现与CK相比,其他处理的Chao指数和Shannon指数均有所提升,其中T1处理增长幅度较小,其他有机肥和生物菌肥配施的处理增长幅度较大,有显著差异($P<0.05$),T2处理的Chao指数增幅最大达到了6.25%,T3处理的Shannon指数增幅达到最大为5.34%。

2.5.2 细菌优势物种组成分析

通过高通量测序对不同施肥处理下的土壤细菌在门水平上的差异进行分析,结果如图5所示。其中厚壁菌门(Firmicutes),变形菌门(Proteobacteria),放线菌门(Actinobacteria),绿弯菌门(Chloroflexi),酸杆

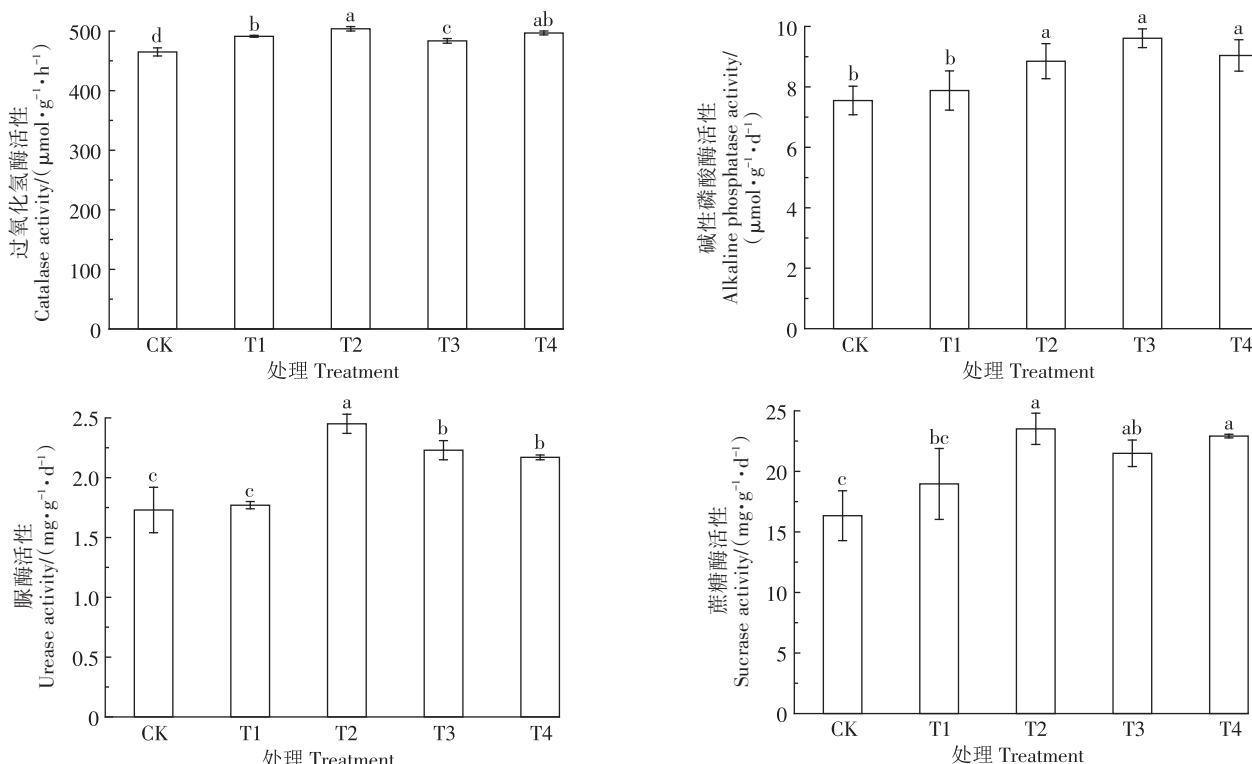


图2 不同处理下土壤酶活性变化

Figure 2 Changes in soil enzyme activities under different treatments

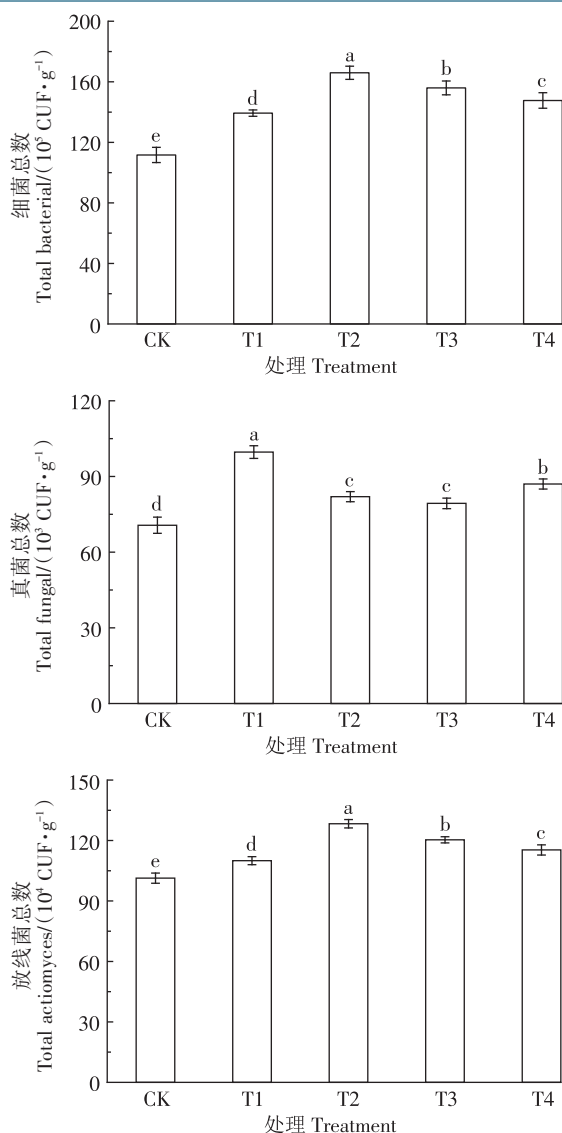


图3 土壤中微生物数量变化

Figure 3 Changes in microbial population in soil

菌门(Acidobacteria), 拟杆菌门(Bacteroidetes), 芽单胞菌门(Gemmatimonadetes), 黏球菌门(Myxococcota), 骸骨菌门(Patescibacteria)为门水平上的优势菌群, 其中分布最广的是厚壁菌门(Firmicutes), 分布范围为16.40%~27.89%。与CK相比, 厚壁菌门在T1、T2、T3、T4处理中相对丰度分别提高了5.72、10.89、11.5、6.22个百分点, 放线菌门的相对丰度在CK与T1处理变化较小, 而T2处理较CK与T1处理有较明显的提升, 变形菌门在各处理中丰度变化较小。

2.5.3 细菌群落主坐标分析

主坐标分析(PCoA分析)采用的是bray-curtis距离算法, 细菌的PCoA第一、第二坐标贡献度分别为37.91%、12.75%。其中在第一主成分上, T2、T3处理

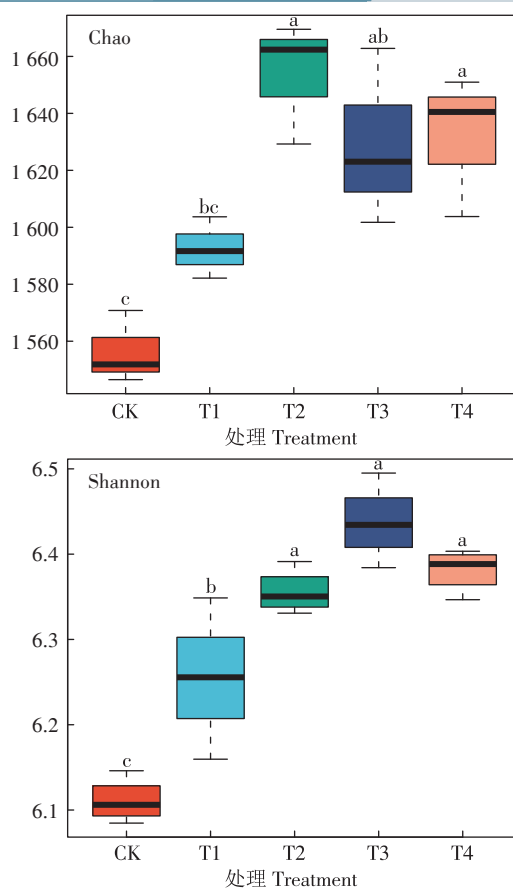


图4 不同处理下土壤中细菌多样性的Chao指数和Shannon指数
Figure 4 Chao index and Shannon index of bacterial diversity in soil under different treatments

土壤细菌群落组成基本一致, T4与T1基本组成一致。其中T2、T3与CK之间距离较远, 存在较大差异。在第二主成分上, 处理CK、T1、T2、T4土壤细菌群落组成基本一致, 唯有T3处理与CK、T1、T4存在较大差异。由此可以说明是有机肥和生物菌肥配施引起了差异。

通过高通量测序对土壤中细菌的多样性进行测定后发现, 土壤细菌多样性在不同处理下也有所不同, 有研究表明土壤细菌的多样性受到土壤化学、物理、生物等多个方面变化的影响^[36], 而在土壤中添加含有有益微生物的生物菌肥, 势必也会对土壤细菌的群落有所影响, 由此说明土壤中细菌多样性的改变会受到土壤理化性质本身变化和从外界加入植物促生菌两方面的影响。在本研究中, 发现不同施肥条件下, 土壤的理化性质也有所差异, 其中T2、T3、T4处理对土壤理化性质影响最为明显, 这与本研究中得出的土壤细菌多样性变化结果相对应, 从而说明有机肥和生物菌肥配施后改变了土壤理化性质和施入生物菌

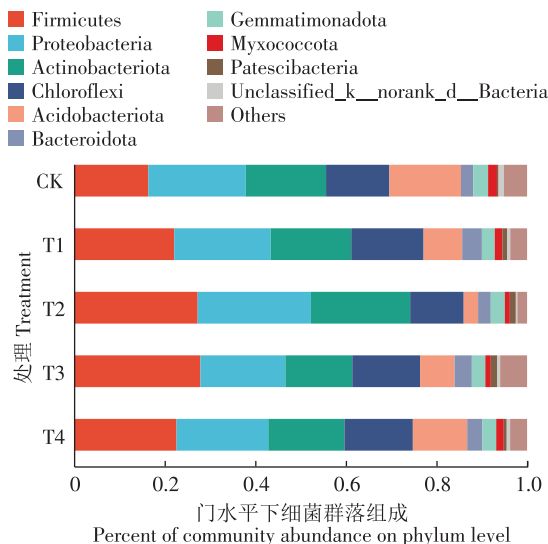


图5 不同处理下门水平细菌群落组成

Figure 5 Composition of phylum level bacterial community under different treatments

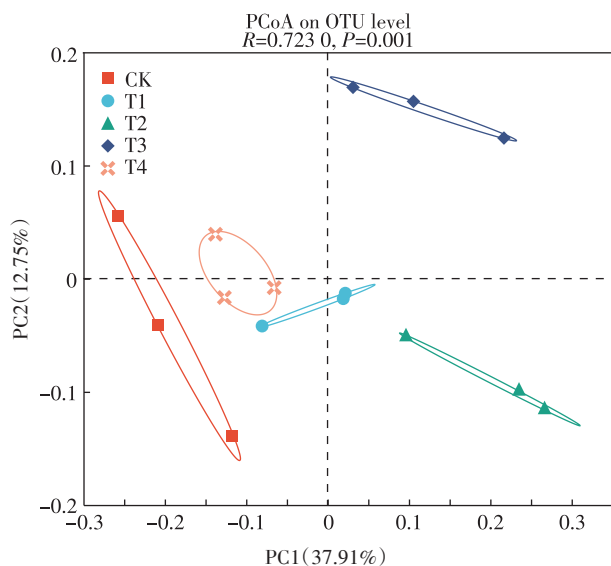


图6 不同处理下的PCoA分析

Figure 6 PCoA analysis under different treatments

肥直接在土壤中添加有益菌两方面影响了细菌多样性。本研究还发现,各处理中酸杆菌门的相对丰度占比均有不同程度降低,这与前人研究结果部分相似^[5,37],另外T2、T3处理中的厚壁菌门丰度占比达到了最高,厚壁菌门与土壤的肥力、植物的生长以及减少土壤污染都有一定关系,也有助于抑制有害微生物的繁殖。除此之外,也有研究证实土壤中施入不同的肥料可以改变土壤微生物群落结构^[38],这说明土壤细菌优势菌门的分布随着土壤质地、种植蔬菜种类、施

肥种类的不同也会有所不同。土壤微生物多样性越高,结构越稳定,土壤功能越完善,土壤生态系统就会越稳定^[39]。因此,通过施用生物菌肥可能会改变微生物结构,从而提升土壤微生物多样性,使得土壤微生物生态环境也得到改善,并且做到了环境友好。

3 结论

(1)在土壤肥力提升方面,3种有机肥与生物菌肥配施的处理(T2、T3、T4)相比传统施肥处理(T1)更能改善土壤肥力状况,但在这3种处理中,有机肥与生物菌肥配施的处理(T3)效果最佳。

(2)在土壤微生态环境改善方面,有机肥与生物菌肥配施(T3)在改善土壤微生物结构、提高微生物多样性方面效果最佳,液态菌液与生物菌肥配施(T4)次之。且有机肥配施生物菌肥的处理(T3)相比传统施肥处理(T1)在一定程度上减少了土壤中真菌数量,这也减少了土壤中部分病原菌,可以减缓设施蔬菜土传病害的发生。

(3)在实际生产中要改变传统施肥方式,减少化肥的使用,有机肥与生物菌肥配施的施肥方式更有助于设施蔬菜产业的发展,具体施用量可参考本研究中有有机肥与生物菌肥配施(T3)的施用量(有机肥 22 500 kg·hm⁻²、生物菌肥 750 mL·hm⁻²、化肥 187.5 kg·hm⁻²)。

参考文献:

- [1] LIANG L, RIDOUTT B G, LAL R, et al. Nitrogen footprint and nitrogen use efficiency of greenhouse tomato production in North China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 208(20): 285-296.
- [2] 韩莹琰. 北京市昌平区蔬菜产业发展现状及展望[J]. *蔬菜*, 2023, 388(4): 57-61. HAN Y Y. Current situation and prospect of vegetable industry in Changping district of Beijing[J]. *Vegetables*, 2023, 388(4): 57-61.
- [3] ZHOU X, WU F. Dynamics of the diversity of fungal and fusarium communities during continuous cropping of cucumber in the greenhouse[J]. *Fems Microbiology Ecology*, 2012, 80(2): 469-478.
- [4] 马阳, 张立宏, 张培, 等. 不同基肥措施对甜瓜产量和土壤性质、细菌多样性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2022, 304(8): 104-111. MA Y, ZHANG L H, ZHANG P, et al. Effects of different basal fertilizer measures on muskmelon yield, soil properties and bacterial diversity [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022, 304(8): 104-111.
- [5] 张庆, 胡春胜, 刘彬彬, 等. 生物有机肥配施化肥对生菜生长和土壤环境的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(5): 725-741. ZHANG Q, HU C S, LIU B B, et al. Influence of combined application of bioorganic fertilizer and chemical fertilizer on lettuce growth and soil environment[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(5): 725-741.

- [6] 林仕芳, 王小利, 段建军, 等. 有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(4): 2219–2225. LIN S F, WANG X L, DUAN J J, et al. Effects of organic fertilizer replacement chemical fertilizer on organic carbon mineralization and active organic carbon in dryland yellow soil[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(4): 2219–2225.
- [7] 曾子凡, 马艳, 罗佳, 等. 长期施肥对设施蔬菜土壤理化及生物学性状的影响研究进展[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(6): 9–15. ZENG Z F, MA Y, LUO J, et al. Research progress on effects of long-term fertilization on soil physicochemical and biological properties in greenhouse vegetables[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 51(6): 9–15.
- [8] 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. YUAN Q, ZHANG H, ZHONG Y H, et al. Evaluation of replacing chemical fertilizer with organic fertilizer on soil quality improvement of protected vegetable[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2022, 50(12): 132–136.
- [9] 王丽娟. 设施蔬菜有机肥替代化肥应用效果探讨[J]. 农业与技术, 2019, 39(21): 129–130. WANG L J. Application effect of organic fertilizer instead of chemical fertilizer in vegetable facilities[J]. *Agriculture and Technology*, 2019, 39(21): 129–130.
- [10] 朱黔, 何东成. 生物菌肥技术与推广[J]. 农业灾害研究, 2020, 10(7): 189–190, 192. ZHU J, HE D C. Research and popularization of biological fertilizer technology[J]. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2020, 10(7): 189–190, 192.
- [11] 吴云艳, 王鑫厚. 生物菌肥对水稻氮素利用率及产量的影响[J]. 东北农业科学, 2021, 46(5): 18–20, 70. WU Y Y, WANG X H. Effects of biological fertilizer on nitrogen use efficiency and yield of rice[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2021, 46(5): 18–20, 70.
- [12] 吕宁, 周光海, 陈云, 等. 滴施生物药剂对棉花生长、黄萎病防治及土壤微生物数量的影响[J]. 西北农业学报, 2018, 27(7): 1056–1064. LÜ N, ZHOU G H, CHEN Y, et al. Effects of different biological agents application through drip irrigation systems on cotton verticillium wilt prevention, cotton growth and soil microbial quantity[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2018, 27(7): 1056–1064.
- [13] 于占东, 刘云峰, 温丹, 等. 有机肥配施生物菌肥对设施蔬菜土壤改良及面条菜生长、品质的影响[J]. 山东农业科学, 2022, 54(8): 99–103. YU Z D, LIU Y F, WEN D, et al. Effects of organic fertilizer combined with biological fertilizer on facility soil improvement and growth and quality of *Silene conoidea* L[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2022, 54(8): 99–103.
- [14] 池福铃, 李锋, 阮惠明, 等. 三种肥料混施对小白菜生长、品质和经济效益的影响[J]. 长江蔬菜, 2019, 492(22): 69–72. CHI F L, LI F, RUAN H M, et al. Effects of three fertilizers mixed on growth, yield and economic benefit in pakchoi[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2019, 492(22): 69–72.
- [15] 高喜叶, 刘明升. 生物菌肥和有机肥配施对胡萝卜生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(35): 39–41. GAO X Y, LIU M S. Effects of combined application of biological fertilizer and organic fertilizer on growth of carrot[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, 45(35): 39–41.
- [16] 王涛, 乔卫花, 李玉奇, 等. 轮作和微生物菌肥对黄瓜连作土壤理化性状及生物活性的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 578–583. WANG T, QIAO W H, LI Y Q, et al. Effects of bio-fertilizer on soil nutrients and microbial functional diversity in peach orchard[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(3): 578–583.
- [17] 于会丽, 徐国益, 徐变变, 等. 施用生物菌肥对桃园土壤养分及微生物功能多样性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(6): 91–97. YU H L, XU G Y, XU B B, et al. Effects of rotation and microbial fertilizers on the properties of continuous cucumber cropping soil[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(6): 91–97.
- [18] 勾真真, 王海波, 张灵瑞. 有机肥、生物菌肥替代化肥对苹果生产的影响[J]. 河北果树, 2021, 167(3): 8–10. GOU Z Z, WANG H B, ZHANG L R. Effects of replacement of chemical fertilizer with organic manure on apple production[J]. *Hebei Fruits*, 2021, 167(3): 8–10.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997: 25–151. BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1997: 25–151.
- [20] 王东丽, 郑笑影, 刘阳, 等. 微生物菌剂协同有机肥对矿区复垦植物生长与养分的影响[J/OL]. 生态学杂志: 1–10[2023–06–07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230220.1733.004.html>. WANG D L, ZHENG X Y, LIU Y, et al. Effects of organic fertilizer application combined with bacterial agent on the growth and nutrient of reclaimed plants in mining area[J/OL]. *Chinese Journal of Ecology*: 1–10[2023–06–07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230220.1733.004.html>.
- [21] 谢晚彬. 生物菌肥在番茄种植中的应用研究[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(11): 2198–2199. XIE W B. Study on application of biological fertilizer in tomato planting[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2011, 50(11): 2198–2199.
- [22] 李廷轩, 周健民, 段增强, 等. 中国设施栽培系统中的养分管理[J]. 水土保持学报, 2005(4): 70–75. LI T X, ZHOU J M, DUAN Z Q, et al. Nutrient management of greenhouse cropping systems in China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005(4): 70–75.
- [23] FENG N X, LIANG Q F, FENG Y X, et al. Improving yield and quality of vegetable grown in PAEs-contaminated soils by using novel bio-organic fertilizer[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 739: 139883.
- [24] JIN N, JIN L, WANG S Y, et al. Reduced chemical fertilizer combined with bio-organic fertilizer affects the soil microbial community and yield and quality of lettuce[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 863325.
- [25] 张静, 杨江舟, 胡伟, 等. 生物有机肥对大豆红冠腐病及土壤酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(3): 548–554. ZHANG J, YANG J Z, HU W, et al. Effects of bio-organic fertilizer on soybean red crown rot and soil enzyme activities[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(3): 548–554.
- [26] SHI Y, GROGAN P, SUN H, et al. Multi-scale variability analysis reveals the importance of spatial distance in shaping arctic soil microbial functional communities[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 86:

- 126-134.
- [27] 孙家骏, 付青霞, 谷洁, 等. 生物有机肥对猕猴桃土壤酶活性和微生物群落的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 829-837. SUN J J, FU Q X, GU J, et al. Effects of bio-organic fertilizer on soil enzyme activities and microbial communities of kiwifruit[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(3): 829-837.
- [28] LEIROS M C, GIL-SOTRES F, TRRASAR-CEPEDA M C, et al. Soil recovery at the meirama opencast lignite mine in northwest Spain: a comparison of the effectiveness of cattle slurry and inorganic fertilizer[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1996, 91(1/2): 109-124.
- [29] 付丽军, 张爱敏, 王向东, 等. 生物有机肥改良设施蔬菜土壤的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2017(3): 1-5. FU L J, ZHANG A M, WANG X D, et al. Advances on application of bio-organic fertilizer for restoring facility vegetable soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(3): 1-5.
- [30] 曲成闯, 陈效民, 韩召强, 等. 施用生物有机肥对黄瓜不同生育期土壤肥力特征及酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 279-284. QU C C, CHEN X M, HAN Z Q, et al. Effects of biological organic fertilizer application on soil fertility characteristics and enzyme activities of cucumber at different growth stages[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(6): 279-284.
- [31] 王卓, 孙保平, 张建锋, 等. 施用有机碳菌肥对2种灌木和土壤肥力的影响[C]. 西安: 中国环境科学学会, 2019. WANG Z, SUN B P, ZHANG J F, et al. Effects of organic carbon fertilizer on the fertility of two shrubs and soil[C]. Xi'an: Chinese Society for Environment Sciences, 2019.
- [32] 苏煜, 黄勍理. 增施生物有机肥对烤烟光合特性及根际土壤微生物的影响[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(1): 164-171. SU Y, HUANG S L. Effects of increased application of bio-organic fertilizer on photosynthetic characteristics and rhizosphere soil microorganisms of flue-cured tobacco[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2022, 24(1): 164-171.
- [33] 袁玉娟, 胡江, 凌宁, 等. 施用不同生物有机肥对连作黄瓜枯萎病防治效果及其机理初探[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 372-379. YUAN Y J, HU J, LING N, et al. Preliminary study on the control effect and mechanism of fusarium wilt of continuous cropping cucumber by applying different biological organic fertilizers[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(2): 372-379.
- [34] 张鹏, 韦中, 朱震, 等. 生物有机肥对连作番茄和辣椒根际土壤微生物区系及茄科雷尔氏菌的影响[J]. 南京农业大学学报, 2013, 36(4): 77-82. ZHANG P, WEI Z, ZHU Z, et al. Effects of bio-organic fertilizer on microbial flora and *Ralstonia solanacearum* population in rhizosphere soil of continuous cropping tomato and pepper[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2013, 36(4): 77-82.
- [35] 陈希, 赵爽, 姚建军, 等. 微生物有机肥及杀菌剂对切花菊连作障碍的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(4): 1231-1236. CHEN X, ZHAO S, YAO J J, et al. Effects of microbial organic fertilizer and fungicide application on continuous cropping obstacle of cut chrysanthemum[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(4): 1231-1236.
- [36] BAAKKER M G, CHAPARRO J M, MANTER D K, et al. Impacts of bulk soil microbial community structure on rhizosphere microbiomes of *Zea mays*[J]. *Plant and Soil*, 2015, 392(1/2): 115-126.
- [37] JIA Z, JIANG L, HONG L, et al. Manipulation of the rhizosphere microbial community through application of a new bio-organic fertilizer improves watermelon quality and health[J]. *Plos One*, 2018, 1(2): e0192967.
- [38] CHAER G, FEMANDES M, MYROLD D, et al. Comparative resistance and resilience of soil microbial communities and enzyme activities in adjacent native forest and agricultural soils[J]. *Microbial Ecology*, 2009, 58(2): 414-424.
- [39] KNIG S, VOOGEL H J, HAARMS H, et al. Physical, chemical and biological effects on soil bacterial dynamics in microscale models[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2020, 8.

(责任编辑:叶飞)