◆提质增效产品创制技术◆

生物有机肥肥效影响因素及增效措施

徐　翔[1]，王艺璇[2]，戈应同[1]，王宇蕴[1]，和　翔[1]，徐　智[1]

（1. 云南农业大学 资源与环境学院，云南 昆明　650201；2. 南京农业大学 资源与环境科学学院，江苏 南京　210014）

［摘　要］生物有机肥是传统有机肥与菌肥的有机结合体，功能微生物是生物有机肥的“核心”。生物有机肥主要基于将活性的功能微生物施用于土壤，旨在通过增加根际所需微生物的数量和生物活性来增加土壤肥力和促进植物生长，其施用效果受产品中有效活菌数的影响。目前，生物有机肥研制与应用研究较多，但针对功能微生物活性与生物有机肥肥效关系的相关研究相对较少。介绍生物有机肥作用机制，阐述影响生物有机肥肥效的关键因素，并对提高生物有机肥中功能微生物活性的措施进行探讨。深入了解功能微生物活性与生物有机肥肥效的关系将为生物有机肥的研究和应用提供技术支撑，进而推进我国农业绿色可持续发展。

［关键词］生物有机肥；功能微生物；核心；肥效

［中图分类号］S144.9　　［文献标志码］A　　［文章编号］ 2097-4566（2024）10-0028-07

Influencing factors and improvement measures of fertilizer efficiency of bio-organic fertilizer

XU Xiang[1]，WANG Yixuan[2]，GE Yingtong[1]，WANG Yuyun[1]，HE Xiang[1]，XU Zhi[1]

（1. *College of Resources and Environment*，*Yunnan Agricultural University*，*Kunming* 650201，*China*；
2. *College of Resources and Environmental Science*，*Nanjing Agricultural University*，*Nanjing* 210014，*China*）

Abstract：Bio-organic fertilizer is an organic combination of traditional organic fertilizer and bacterial fertilizer，and functional microorganisms are the“core”of bio-organic fertilizer. Bio-organic fertilizer is mainly based on the application of active functional microorganisms to the soil，aiming to increase soil fertility and promote plant growth by increasing the number and biological activity of microorganisms required in the rhizosphere，and its application effect is affected by the number of effective viable bacteria in the product. At present，there are many researches on the development and application of bio-organic fertilizer，but there are relatively few researches on the relationship of functional microorganisms activity and the efficiency of bio-organic fertilizer. This paper briefly introduces the action mechanism of bio-organic fertilizer，focuses on the key factors affecting the efficiency of bio-organic fertilizer，and discusses measures to improve the activity of functional microorganisms in bio-organic fertilizer. In-depth understanding of the relationship between functional microorganisms activity and efficiency of bio-organic fertilizer will provide technical support for the research and application of bio-organic fertilizer，which will promote the green and sustainable development of China's agriculture.

Key words：bio-organic fertilizer；functional microorganisms；core；fertilizer efficiency

0　引言

生物有机肥（BOF）是在以畜禽粪便和农副产品残渣为原料发酵生产的有机肥料的基础上添加具有固氮、溶磷、解钾、抗病等功能的微生物发酵形成的新型肥料[1]，它是传统有机肥与菌肥的有机结合体，是由微生物生命活动而使农作物得到特定的肥料效应的一类制品，应用于农业生产中可以增加土壤中的有机碳，并保持田间和园艺作物的可持续性等[2]。

生物有机肥中起关键作用的是微生物和营养物质的数量[3-4]。生物有机肥施入土壤后，通过特定菌株的快速繁殖，能够固定大气中的氮素，释放土壤中固定态的磷、钾元素，使得环境的养分潜力得以充分发挥，并为农作物生长营造良好的土壤微生物环境[5-6]，还可以刺激与植物生长、抵抗病害及

［收稿日期］2024-03-14
［作者简介］徐　翔（1999-），男，云南宣威人，在读硕士研究生，研究方向为有机固体废弃物资源化利用。E-mail:2739104485@qq.com
［通信作者］徐　智。E-mail:xuzhi9910@126.com
［基金项目］云南省重大科技专项计划（202202AE090025）

土壤养分转化相关的特定微生物群，如假单胞菌、链霉菌、黄杆菌等[7-9]。将功能菌与成熟堆肥相结合的特殊生物有机肥可以增强微生物的活性[10]，因为生物有机肥中的微生物在任何时候都需要来自有机肥料或根系分泌物的合适营养[11]。堆肥不仅作为合适的基质起着重要作用，而且还在固态发酵中作为促进生长的培养基[12]。微生物是生物有机肥中必不可少的一部分，同时其活性是决定生物有机肥肥效的关键因子。

生物有机肥具有不同地区的生态适应性，需根据其施用的土壤条件、农作物类型、耕作方式、施用方法、施用量及与之相应的施肥状况等，有针对性地选择功能菌[7，12-13]。产品中的初始微生物添加量大，以便在制造过程、运输、储存期和土壤施用等几个阶段保持高微生物数量[5]。目前有许多关于生物有机肥生产及应用的报道，但很少有研究关注微生物从接种到生产再到施用过程中的存活状况。笔者通过对生物有机肥的作用机制、影响生物有机肥作用的关键因素进行研究，发现基质营养特性及微生物接种方式对微生物活性影响较大，优化基质配方及外源添加营养物质有利于功能菌的增殖，这为高效、高活性生物有机肥的生产提供了理论指导。

1　生物有机肥的作用机制

有机肥和微生物菌剂是生物有机肥的组成部分，它们在农作物生长过程中的作用是相辅相成的[14]，农作物施用含有发酵菌和功能菌的有机肥后，功能微生物能够利用营养物质进行繁殖，以便有效地定殖和发挥促进植物生长和生物控制的作用[15]。生物有机肥的肥料效应很大程度上取决于所选用功能菌的种类，一般腐熟的有机肥中含有酵母菌、乳酸菌、纤维素分解菌等有益微生物[16]，而添加有功能菌的生物有机肥还可能含有固氮菌、硅酸盐细菌、溶磷微生物、假单胞菌及一些与植物生长相关的有益菌[17]。添加有功能菌的生物有机肥含有丰富的维生素、氨基酸、核酸、吲哚乙酸、赤霉素、腐植酸及各种有机酸等生理活性物质，这些物质能刺激农作物根系生长，提高农作物的光合能力，使农作物根系发达，生长健壮[18]。

生物有机肥料中添加的固氮微生物主要通过其分泌的固氮酶的作用，将空气中的N_2还原为可被农作物吸收利用的NH_4^+，其固氮效率因土壤条件不同而有较大差异[19-21]；添加的溶磷微生物和硅酸盐细菌施入土壤后经增殖并与其他土壤微生物协同作用，可分解土壤中某些原生或次生矿物，并同时将这些矿物所固定的磷、钾等养分释放出来，把闭蓄态磷、钾转化成可供农作物吸收利用的有效态养分（见图1），从而提高土壤供肥能力[22]。PGPR（植物根际促生菌）菌株具有促生和抗病作用，一般通过一种或多种作用机制直接或间接实现，直接作用可通过固氮、溶磷、解钾、产生铁载体等生理活动[23-24]，将土壤中矿物质转化为植物可以吸收利用的营养元素，以及产生一些植物生长调节剂（如植物激素、ACC（1-氨基环氧丙烷羧酸）脱氨酶、挥发性物质等），进而促进植物生长发育[25-26]；另外还可通过分泌拮抗物质（如氨苄西林、吡咯烷酮、吩嗪类、氰化氢等）、竞争养分和生存空间、诱导农作物产生系统抗性等作用来改变农作物的生长环境，间接促进农作物的生长[27]。其促生能力主要取决于其在特定环境中优势的获取和适应不断变化环境的能力[28]。

为了有效地应用这些功能菌，建议将其富集在一些有机基质中（如作为生物有机肥的形式）后施用，因为微生物在富含有机底物后在根际中存活更好[29]。TAN等[30]研究发现，将5%解淀粉芽孢杆菌T-5接种到菜粕和鸡粪有机混合物堆肥中生产生物有机肥，施用后番茄根系分泌物中的有机酸可诱导番茄根际中生防菌T-5对真菌病原体的局部和系统抗性以及对非生物胁迫的耐受性，从而保护根系免受感染，并表明抑制性是由根际土壤微生物群落组成变化触发的，而不仅仅是引入生防菌株的丰度。这是由于根系分泌物中的有机酸可以以碳源的形式驱动功能菌在农作物根部定殖，同时防止病原菌的生长[31]。

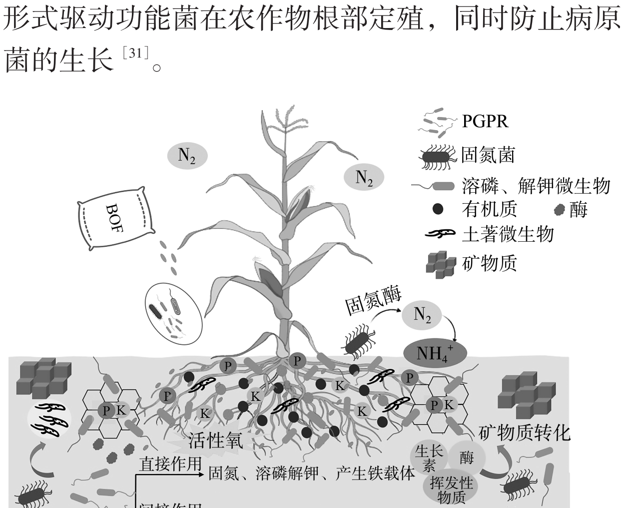

图1　生物有机肥中功能微生物的作用机制

Fig. 1　Action mechanism of functional microorganisms in bio-organic fertilizer

2　影响生物有机肥肥效的关键因素

2.1　功能微生物的作用

功能微生物是生物有机肥的“核心”[32]。功能微生物的使用已被证明有望改善植物的健康、营养和逆境恢复能力，并且通过生物有机肥等方式输送这些功能菌在改善土壤微生物功能方面特别有效[33]。生物有机肥施入土壤后能够调节土壤中微生物的区系组成，使土壤中的微生态系统结构发生改变[20]。在施用生物有机肥后，根区土壤细菌、真菌和放线菌数量显著增加，其中细菌占绝对优势。这是因为新鲜有机物质进入土壤后，为微生物提供了新的能源，使微生物在种群数量上发生较大改变[34]。先前的研究表明与植物病害抑制相关的特定微生物群（如假单胞菌、链霉菌、黄杆菌等）会受到施用生物有机肥的刺激[9]。随生物有机肥施入的功能微生物可以优先占据生态位，改变土壤微生物群落结构，进一步激活土著微生物，二者通过协同作用在农作物根际定殖，形成生物膜抑制病原菌侵染进而促进植物健康生长[35–37]（见图2）。对于生态位和养分竞争以及抗生素作用等生防机制而言，根部定殖是一个基本要求[38]。富含养分的根际环境也是一个生态系统，各种微生物和生物在这里争夺释放出来的养分[39]，与此同时，功能微生物占据根际生态位后在根系分泌的营养物质竞争上也占据优势地位，抑制了其他微生物的活性[40–42]，这是生物有机肥比普通有机肥更能提高农作物产量和品质的根本原因。

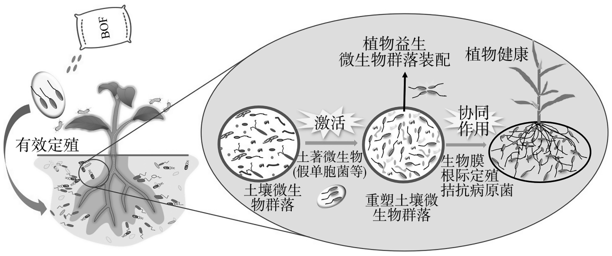

图2　生物有机肥中功能微生物占据根际生态位示意图[9]

Fig. 2　Schematic diagram of functional microorganisms occupying rhizosphere niche in bio-organic fertilizer

2.2　生物有机肥配方

生物有机肥能否发挥其有益作用与配方和生产密切相关，生物有机肥的配方高度依赖于载体材料[43]。有机基质是生物有机肥的重要载体和组成部分[44]，将微生物富集在有机基质后施用，可以更好地提高土壤中常驻有益微生物的丰度和活性[45]。但由于成熟堆肥中有效养分的限制，一些额外的有机资源如菜籽粕、玉米粉、豆饼和蓝藻污泥已被用作添加剂以促进功能微生物的繁殖[46–48]。刁春武等[49]的研究结果表明，腐熟鸡粪中添加5%酸解羽毛粉，功能菌SQR9数量增加3.8倍，这是因为有机肥发酵原料中含有较多氨基酸等含氮化合物，一些微生物必需的活性物质一般以氨基酸或其代谢产物为前体，从而促进功能菌的增殖；刘秋梅等[50]接种2%固体木霉菌种于含有20%氨基酸水溶液的腐熟有机肥中后，木霉活菌数增加6.4倍，施用后番茄的株高和茎粗分别增加了98.8%和58.9%；孙立广等[51]的研究结果表明，生物有机肥（30%茶枯+70%烟草秸秆）中添加枯草芽孢杆菌JK–4、解淀粉芽孢杆菌JK–10菌株的定殖率分别达到了945.7%、1 970%，链霉菌LC–7菌株定殖率达到496.7%，同时其防治青枯病的效果最好，在烟草旺长期防治效果达到57.40%，在青枯病发病高峰期防治效果为37.11%；张苗[52]的研究表明生物有机肥质量配比为牛粪75%、藻泥5%、菜粕8%、羽毛粉12%，优化配方扩大发酵后功能菌发酵数量增加7.78倍，盆栽试验结果表明，该生物有机肥对茄子及黄瓜植株具有显著的促生作用。CAKMAKCI等[18]利用3种微生物（固氮菌、溶磷菌和可产生ACC脱氨酶的微生物）制备生物肥料，评估它们对茶叶酶活性、生长和产量的影响。结果表明，所有生物有机肥都能刺激茶叶的整体生长，增加茶叶的面积、产量、叶绿素含量和酶活性，生物有机肥处理的百芽质量增加了22.3%，水溶物增加了21.9%，氨基酸增加了8.83%，茶多酚增加了9.76%，但咖啡碱减少了8.32%。上述研究结果表明：微生物活性是保证生物有机肥发挥作用的关键因子，而真菌和细菌在基质中的定殖能力有所不同，这是因为真菌与细菌在基质中的分解能力存在较大差异，根据基质特性选择合适的功能微生物有利于提高其活性，进而保证生物有机肥的施用效果。

不可避免的是，随着基质中养分消耗，微生物数量会随时间推移而下降，并可能导致施用后其在土壤中存活率低下[53]。因此，保证足够量的有效活菌数是高质量生物有机肥的重要标志之一。除此之外，生物有机肥在保存过程中由于内部成分及环境发生变化，导致活菌数下降[54–55]，从而影响其施用后的效果，这一般可以通过外源添加有机无机营养物质对有机肥内的微生物进行保护。有研究表明，生物有机肥中的有效活菌数和酶活性也可以通过外源添加无机营养物质（尿素、磷酸二铵等）来提高[56]。添加保护剂和助剂是国外微生物肥料生

产中保密性最强的核心技术，而我国在这方面的研究报道甚少。因此，选择针对性强、微生物浓度高和保质期长的功能菌是保障生物有机肥质量和作用效果的关键。

3　提高生物有机肥中功能微生物活性的措施

生物有机肥中功能微生物的有效活菌数决定于其生产工艺，其中包括微生物接种方式及基质的养分状况[57]。由于接种菌与本土微生物的竞争、接种时机和接种类型等因素，接种效果并不总是很好[58]。为了保证接种的功能微生物能够有效存活，研究人员尝试了各种方式。一种有前景的方法是在堆肥过程的不同阶段添加功能微生物菌剂，加速基质分解的同时为微生物繁殖提供营养物质。目前生产生物有机肥时接种功能微生物的方式见表1。

表1　生物有机肥生产中接种功能微生物的方式

Table 1　Methods of inoculating functional microorganisms in bio-organic fertilizer production

微生物接种方式	优点	缺点
堆肥初期接种	发酵菌与功能微生物共同发酵，以期提高生物有机肥品质	大部分的功能微生物不能耐受高温而死亡，达不到预期效果
按稀释倍数接种	生产便利	不利于提高微生物的定殖能力
堆肥降温期接种	可以避免接种菌剂之间、接种菌剂和土著微生物之间的竞争，能有效提高微生物的存活率	随着基质中养分的消耗，不利于微生物生长繁殖

大部分功能微生物具有固氮、溶磷、解钾、促生、抗病功能[15]，它们大都难以在60 ℃以上的高温环境下繁殖生长，而有机肥发酵过程中要通过产生60 ℃以上高温，将有害生物（如蛔虫卵、大肠杆菌、杂草种子）全部杀死[17]。堆肥初期将发酵菌与功能微生物共同发酵，除一些芽孢菌和耐高温菌外，大部分功能微生物不能耐受高温而死亡，这种发酵方式因为堆肥过程中微生物演替的不可控性，往往达不到预期效果。

按照稀释倍数接种功能微生物的优势在于生产便利，但是这种工艺需要的微生物量大，稀释后接种会增加物料的水含量，导致部分可溶性养分流失，不利于提高微生物的定殖能力[59]，在应用中受到很大的限制。

在堆肥降温期接种功能微生物再进行发酵，称为生物有机肥的二次发酵[58]。采用二次发酵的方法，在堆肥温度降低（经过高温期大量常温微生物已死亡）、有机物料基本腐熟时加入功能微生物可以避免接种菌剂之间、接种菌剂和土著微生物之间的竞争，能有效提高功能微生物的存活率[60]。

扎史品楚等[61]在二次发酵过程中发现，温度一般控制在45 ℃以下，可保证功能微生物的活性。陈春岚等[62]的研究结果表明，温度对二次发酵有明显影响，在40 ℃时，腐熟堆肥中青霉菌数量减少18.01%，而在15、25、35 ℃时，青霉菌数量都有所增长，尤其是在25 ℃时，定殖量最大，比接种前增加了8.87倍。刘丽[63]的研究结果表明，经过腐熟的有机肥水含量和自由空域降低，随着营养物质的消耗，功能微生物活性会受到抑制。因此，要使接种的功能微生物在二次发酵过程中存活或增殖成为优势菌株，首先要保证物料环境适宜微生物生存繁殖[64]；二次发酵过程中，随着发酵的进行，水分会随着微生物代谢蒸发减少，如果$w(H_2O)$低于40%，微生物分解有机物料会变得困难，营养物质变少则限制微生物生长繁殖，最终导致其在有机物料中不能成功定殖。白林等[65]的研究表明，DOC（可溶性有机碳）是堆肥后期微生物繁殖的限制因子。在发酵过程中，物料中的可溶性碳类化合物被微生物吸收用于生长繁殖，产生新的细胞菌体，二次发酵过程中碳源的添加可以提高功能微生物的定殖能力[66]。因此，二次发酵过程中应保证有足够的营养物质供给功能微生物生命活动[67]，这可以通过调整物料比例或者外源添加有机无机养分来解决。

4　展望

生物有机肥中微生物的活性存在一定的货架期，随着基质中养分消耗，微生物数量会随着时间的推移而下降，并可能导致施用后其在土壤中存活率低下进而影响其肥效[68-70]。根据目前的研究结果来看，仅有关于生物有机肥施用后增加土壤养分有效性或者是激活土著微生物种群以增强植物病害抑制的单一研究[9]。因此，研究菌肥有机基质–功能微生物活性–根际微生物的偶联机制是未来研究的一个思路，因为生物有机肥的生产过程会影响微生物的存活，而迫切需要进行研究以明确哪些功能菌对不同的基质营养状况有较强的契合性，以便选择和改进微生物菌株，在保证生产的前提下提高微生物活性。同时微生物存活时间与生物有机肥肥料效应的消长关系也是亟待关注的问题。探讨适合后续功能微生物接种或二次发酵的微生物菌肥基质（堆肥物料）水含量、碳氮比、pH、营养条件与功能微生物在微生物菌

肥基质的增殖状况，从而优化功能微生物接种和二次发酵工艺参数以保障生物有机肥中功能微生物的活性，提高生物有机肥的肥效。

5　结论

生物有机肥的核心在功能微生物的功能和活性。功能微生物能够利用基质中的营养物质进行繁殖，在基质中有效存活后施用能够最大限度地体现其生物效应。由于基质特性和微生物接种方式存在差异，微生物存活时间与生物有机肥的肥效可能存在一定的消长关系。根据以上所述，在堆肥降温期添加适当比例的功能微生物，同时添加一些有机或无机养分可以保证生物有机肥中功能微生物在储存和施用的过程中仍保持相对较高的活性，这也确保了生物有机肥施用后仍能发挥功能菌的作用。

[参考文献]

[1] WANG L, LI J, YANG F, et al. Application of Bioorganic Fertilizer Significantly Increased Apple Yields and Shaped Bacterial Community Structure in Orchard Soil[J]. Microbial Ecology, 2017, 73(2):404-416.

[2] ZHANG N, WU K, HE X, et al. A new bioorganic fertilizer can effectively control banana wilt by strong colonization with Bacillus subtilis N11[J]. Plant and Soil, 2011, 344(1):87-97.

[3] HUANG J K, HU R F, CAO J M, et al. Training programs and in-the-field guidance to reduce China's overuse of fertilizer without hurting profitability [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 63(5):165-167.

[4] XIN L J, LI X B, TAN M H. Temporal and regional variations of China's fertilizer consumption by crops during 1998—2008[J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(4) :643-652.

[5] HUANG X Q, LIU L L, WEN T, et al. Illumina MiSeq investigations on the changes of microbial community in the Fusarium oxysporum f. sp. cubense infected soil during and after reductive soil disinfestation [J]. Microbiological Research, 2015, 181:33-42.

[6] ZHAO J, LIU J, LIANG H, 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, 13(2) :e0192967.

[7] TAHIR M, KHALID U, IJAZ M, et al. Combined application of bio-organic phosphate and phosphorus solubilizing bacteria (Bacillus strain MWT14) improve the performance of bread wheat with low fertilizer input under an arid climate [J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2018, 49 (S1):15-24.

[8] LIANG J W, YU W M, YAO Y L, et al. Effects of a bio-organic fertilizer on soil quality and vegetable yield [J]. Ecology and Environmental Sciences,2022,31(3):497-503.

[9] TAO C Y, LI R, XIONG W, et al. Bio-organic fertilizers stimulate indigenous soil Pseudomonas populations to enhance plant disease suppression[J]. Microbiome, 2020,8(1):137.

[10] YU Y N, WU H Y, WANG P X, et al. Biological Effect of Trichoderma-enriched Biofertilizers on Cabbage Cultivation in Coastal Saline Soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(4): 1112-1124.

[11] LIU P, BI J T, LI W B, et al. Transcriptome analysis of the effect of bio-organic fertilizer on rice leaves[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(6):2342-2356.

[12] 张思奇,刘红军,沈宗专,等.外包木霉内含芽孢杆菌颗粒生物有机肥研制及其促生效应[J].土壤通报,2022,53(2):465-471.
ZHANG S Q, LIU H J, SHEN Z Z, et al. Development of Granular Compound Bioorganic Fertilizer with *Bacillus* Inside and *Trichoderma* Outside and Its Growth Promotion Effect [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(2):465-471.

[13] LIU S Y, ZHANG P Z, WANG X C, et al. Comparative analysis of different bio-organic fertilizers on growth and rhizosphere environment of grapevine seedlings [J]. Scientia Horticulturae, 2024, 324:112587.

[14] TAO C Y, WANG Z, LIU S, et al. Additive fungal interactions drive biocontrol of Fusarium wilt disease[J]. New Phytologist, 2023, 238(3):1198-1214.

[15] ZHANG M, LI R, CAO L L, et al. Algal sludge from Taihu Lake can be utilized to create novel PGPR-containing bio-organic fertilizers [J]. Journal of Environmental Management, 2014, 132:230-236.

[16] LI S Q, ZHANG N, ZHANG Z H, et al. Antagonist Bacillus subtilis HJ5 controls Verticillium wilt of cotton by root colonization and biofilm formation[J]. Biology and Fertility of Soils, 2013, 49(3):295-303.

[17] MAJEE S, SARKAR K K, SARKHEL R, et al. Bio-organic fertilizer production from industrial waste and insightful analysis on release kinetics [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 325:116378.

[18] CAKMAKCI R, AK U S, ERAT M. Effect of co-inoculation of multitraits bacteria based bio-formulations on the growth yield and enzyme activities of tea[J]. Turk J Agr and Nat Sci, 2021, 8:594-604.

[19] BAI Z H, ZHOU C G, CAO J X, et al. Effects of Bacillus amyloliquefaciens biofertilizer on tea yield and quality[J]. Chin Agric Sci Bull, 2014, 15:1883-1887.

[20] HARMAN G E, HOWELL C R, VITERBO A, et al. Trichoderma species-opportunistic, avirulent plant symbionts [J]. Nat Rev Mic, 2004, 2(1):43-56.

[21] SHORESH M, HARMAN G E, MASTOURI F. Induced systemic resistance and plant responses to fungal biocontrol agents[J]. Annu Rev Phytopathol, 2010, 48(1):21-43.

[22] PANG G, CAI F, LI R X, et al. Trichoderma-enriched organic fertilizer can mitigate microbiome degeneration of monocropped soil to maintain better plant growth[J]. Plant and Soil, 2017, 416(1-2):181-192.

[23] HÖGBERG P, HÖGBERG M N, GÖTTLICHER S G, et al. High temporal resolution tracing of photosynthate carbon from the Tree Canopy to forest soil microorganisms[J]. New Phytol, 2008, 177(1):220-228.

[24] JAVOREKOVÁ S, MAKOVÁ J, MEDO J. Effects of bio-fertilizers application on microbial diversity and physiological profiling of microorganisms in arable soil[J]. Eurasian Journal of Soil Science,

2015, 4(1):54-61.

[25] LIU L, LI X, LI T Y, et al. Bio-organic Fertilizer with Bacillus subtilis F2 Promotes Strawberry Plant Growth and Changes Rhizosphere Microbial Community[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2022, 22(3):3045-3055.

[26] SADAT DARAKEH S A S, WEISANY W, DIYANAT M, et al. Bio-organic fertilizers induce biochemical changes and affect seed oil fatty acids composition in black cumin (Nigella sativa Linn)[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 164:113383.

[27] 勾宇春，王宗抗，张志鹏，等. 植物根际促生菌作用机制研究进展[J]. 应用与环境生物学报，2023, 29(2):495-506.
GOU Y C, WANG Z K, ZHANG Z P, et al. Advance in role mechanisms of plant growth-promoting rhizobacteria [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2023, 29 (2):495-506.

[28] CHEN Y, XU Y P, ZHOU T, et al. Biocontrol of Fusarium wilt disease in strawberries using bioorganic fertilizer fortified with Bacillus licheniformis X-1 and Bacillus methylotrophicus Z-1[J]. 3 Biotech, 2020, 10(2):1-14.

[29] MA L, ZHANG H Y, ZHOU X K, et al. Biological control tobacco bacterial wilt and black shank and root colonization by bio-organic fertilizer containing bacterium Pseudomonas aeruginosa NXHG29[J]. Applied Soil Ecology, 2018, 129: 136-144.

[30] TAN S Y, YANG C L, MEI X L, et al. The effect of organic acids from tomato root exudates on rhizosphere colonization of Bacillus amyloliquefaciens T-5 [J]. Applied Soil Ecology, 2013, 64:15-22.

[31] SHAHWAR D, MUSHTAQ Z, MUSHTAQ H, et al. Role of microbial inoculants as bio fertilizers for improving crop productivity:A review[J]. Heliyon, 2023, 9(6):e16134.

[32] OLOWE O M, NICOLA L, ASEMOLOYE M D, et al. Trichoderma: Potential bio-resource for the management of tomato root rot diseases in Africa [J]. Microbiological Research, 2022, 257:126978.

[33] HAFEZ M, POPOV A I, RASHAD M. Integrated use of bio-organic fertilizers for enhancing soil fertility-plant nutrition, germination status and initial growth of corn (Zea Mays l)[J]. Environmental Technology & Innovation, 2021, 21:101329.

[34] JIANG Z, SHAO Q, LI Y, et al. Noval bio-organic fertilizer containing Arthrobacter sp. DNS10 alleviates atrazine-induced growth inhibition on soybean by improving atrazine removal and nitrogen accumulation[J]. Chemosphere, 2023, 313:137575.

[35] NAGHDI A A, PIRI S, KHALIGI A, et al. Enhancing the qualitative and quantitative traits of potato by biological, organic, and chemical fertilizers [J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2022, 21(2):87-92.

[36] WANG Z H, YANG H, MA Y W, et al. WGCNA analysis revealing molecular mechanism that bio-organic fertilizer improves pear fruit quality by increasing sucrose accumulation and reducing citric acid metabolism [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13:1039671.

[37] LI Q J, ZHANG D Q, SONG Z X, et al. Organic fertilizer activates soil beneficial microorganisms to promote strawberry growth and soil health after fumigation [J]. Environmental Pollution, 2021, 295:118653.

[38] SAHANDI S M, MEHRAFARIN A, BADI N H, et al. Improving growth, phytochemical, and antioxidant characteristics of peppermint by phosphate-solubilizing bacteria along with reducing phosphorus fertilizer use[J]. Ind Crop Prod, 2019, 141:111777.

[39] LINU M S, ASOK A K, THAMPI M, et al. Plant growth promoting traits of indigenous phosphate solubilizing Pseudomonas aeruginosa isolates from chilli (capsicumannuum l) rhizosphere[J]. Commun Soil Sci Plant Anal, 2019, 50 (4): 444-457.

[40] WU Y, ZHAO C Y, FARMER J, et al. Effects of bio-organic fertilizer on pepper growth and Fusarium wilt biocontrol[J]. Scientia Horticulturae, 2015, 193:114-120.

[41] WU P F, WANG G Y, FAROOQ T H, et al. Low phosphorus and competition affect Chinese fir cutting growth and root organic acid content: does neighboring root activity aggravate P nutrient deficiency? [J]. Soils Sediments, 2017, 17 (12): 2775-2785.

[42] CAI F, CHEN W, WEI Z, et al. Colonization of Trichoderma harzianum strain SQR-T037 on tomato roots and its relationship to plant growth, nutrient availability and soil microflora[J]. Plant and Soil, 2015, 388(1):337-350.

[43] WEN T, DING Z X, THOMASHOW L S, et al. Deciphering the mechanism of fungal pathogen-induced disease-suppressive soil [J]. New Phytologist, 2023, 238(6):2634-2650.

[44] ZHANG F G, HUO Y Q, COBB A B, et al. Trichoderma Biofertilizer Links to Altered Soil Chemistry, Altered Microbial Communities, and Improved Grassland Biomass[J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9:848.

[45] ZHANG F G, ZHOU Z B, XIAO Y. Trichoderma biofertilizer facilitating Leymus chinensis production in different growth stages is strongly linked to dynamically altered soil microbiomes [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2022, 324: 107706.

[46] GENG Y J, YUAN Y M, MIAO Y C, et al. Decreased nitrous oxide emissions associated with functional microbial genes under bio-organic fertilizer application in vegetable fields[J]. Pedosphere, 2021, 31(2):279-288.

[47] ZHAO B H, CAO X H, CAI Z J, et al. Improving suppressive activity of compost on phytopathogenic microbes by inoculation of antagonistic microorganisms for secondary fermentation[J]. Bioresource Technology, 2023, 367:128288.

[48] ZHENG X F, ZHU Y J, WANG Z R, et al. Effects of a novel bio-organic fertilizer on the composition of rhizobacterial communities and bacterial wilt outbreak in a continuously mono-cropped tomato field[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 156:103717.

[49] 刁春武，曹亮亮，黄忠阳，等.酸解羽毛粉研制生物有机肥及其促生效果研究[J].土壤，2016，48(4)：661-667.
DIAO C W, CAO L L, HUANG Z Y, et al. Developing Bio-organic Fertilizer with Hydrolyzed Feather Powders and Its Promotion Effects on Plant Growth[J]. Soils, 2016, 48(4): 661-667.

[50] 刘秋梅，陈兴，孟晓慧，等.新型木霉氨基酸有机肥研制及其对

番茄的促生效果[J].应用生态学报,2017,28(10):3314-3322.
LIU Q M, CHEN X, MENG X H, et al. Development of a new type of biological organic fertilizer and its effect on the growth promotion of tomato[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(10):3314-3322.
[51] 孙立广,张洪春,赵秀云,等.烟草青枯病拮抗菌在有机肥中的定殖效率及田间防治效果[J].中国烟草科学,2016,37(4):48-53.
SUN L G, ZHANG H C, ZHAO X Y, et al. Colonization Rate of Several Antagonistic Bacteria against Tobacco Bacterial Wilt in Organic Fertilizers and Control Efficacy in Field[J]. Chinese Tobacco Science, 2016, 37(4):48-53.
[52] 张苗.含Bacillus amyloliquefaciens SQR9的育苗基质和生物有机肥的研制及其应用[D].南京:南京农业大学,2014.
ZHANG M. The Development and Application of Bio-Soilless Medium and Bio-Organic Fertilizer Containing *Bacillus amyloliquefaciens* SQR9[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.
[53] SUN B, GU L K, BAO L J, et al. Application of biofertilizer containing Bacillus subtilis reduced the nitrogen loss in agricultural soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 148: 107911.
[54] CHEN W L, ZENG L, YANG X, et al. Preparation and efficacy evaluation of Paenibacillus polymyxa KM2501-1 microbial organic fertilizer against root-knot nematodes[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2022, 21(2):542-551.
[55] LI Z D, JIAO Y Q, YIN J, et al. Productivity and quality of banana in response to chemical fertilizer reduction with bio-organic fertilizer: Insight into soil properties and microbial ecology[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 322:107659.
[56] 熊竹. 化肥组分配伍对生物有机肥有效活菌数的影响[J]. 农技服务, 2012, 29(2):161,197.
XIONG Z. Influence of fertilizer components on the effective number of live bacteria in bio-organic fertilizers[J]. Agricultural Technology Service, 2012, 29(2):161,197.
[57] ZHU N, ZHU Y Y, KAN Z X, et al. Effects of two-stage microbial inoculation on organic carbon turnover and fungal community succession during co-composting of cattle manure and rice straw[J]. Bioresource Technology, 2021, 341:125842.
[58] XU Z M, LI R H, LIU T, et al. Effect of inoculation with newly isolated thermotolerant ammonia-oxidizing bacteria on nitrogen conversion and microbial community during cattle manure composting[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 317:115474.
[59] HUANG G F, WONG J W C, WU Q T, et al. Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust[J]. Waste Management, 2004, 24(8):805-813.
[60] MACIAS-CORRAL A M, CUETO-WONG A J, MORÁN-MARTÍNEZ J, et al. Effect of different initial C/N ratio of cow manure and straw on microbial quality of compost[J]. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 2019, 8(1): 357-365.
[61] 扎史品楚,农传江,王宇蕴,等.生物有机肥的发酵工艺及应用效果研究[J].环境工程,2015,33(S1):1011-1014,1020.
ZHASHI P C, NONG C J, WANG Y Y, et al. Research of Microbial Organic Fertilizer Fermentation Process and Its Application[J]. Environmental Engineering, 2015, 33(S1): 1011-1014,1020.
[62] 陈春岚,苏辉兰,黄广上,等.腐熟堆肥与落叶堆中纤维素降解菌的筛选及其环境适应性分析[J].西南农业学报, 2016, 29(6):1366-1370.
CHEN C L, SU H L, HUANG G S, et al. Compost and Leaf Litter Decomposition of Cellulose Degrading Bacteria Screening and Environmental Effects[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2016, 29(6):1366-1370.
[63] 刘丽.生物有机肥制备加工贮存过程中功能菌的追踪及其影响机制[D].杭州:浙江大学,2015.
LIU L. The Functional Bacteria Tracing and its Influence Mechanism during Bio-organic Fertilizer Preparation, Processing and Storage[D].Hangzhou:Zhejiang University, 2015.
[64] 刘云鹏.增强解淀粉芽孢杆菌SQR9根际定殖和促生的根际互作机制研究[D].南京:南京农业大学,2015.
LIU Y P. Enhanced Plant Growth Promotion and Root Colonization of *Bacillus Amyloliquefaciens* SQR9 Through Rhizosphere Interaction[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.
[65] 白林,岳铁军,文斌,等.兔粪高温堆肥的控制参数及发酵机制研究[J].安徽农业科学,2010,38(7):3616-3619.
BAI L, YUE T J, WEN B, et al. Study on Control Parameter and Fermentation Mechanism of High Temperature Composting of Rabbit Dung[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(7):3616-3619.
[66] SU J, ZHOU K Y, CHEN W J, et al. Enhanced organic degradation and microbial community cooperation by inoculating Bacillus licheniformis in low temperature composting[J]. Journal of Environmental Sciences, 2024, 143:189-200.
[67] CHEN Z J, LI Y, ZHANG X C, et al. Effects of lignite bioorganic product on sunflower growth, water and nitrogen productivity in saline-sodic farmlands at Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2022, 271:107806.
[68] KONG F Y, LU S G. Effects of microbial organic fertilizer (MOF) application on cadmium uptake of rice in acidic paddy soil: Regulation of the iron oxides driven by the soil microorganisms [J]. Environmental Pollution, 2022, 307:119447.
[69] LI Z R, HAN J C, BAI H D, et al. Effects of novel bioorganic fertilizer application on soil enzymes and bacterial community in multi-site rice paddies in China[J]. AMB Express, 2021, 11(1):1-12.
[70] LI C N, LI H Y, YAO T, et al. Effects of microbial inoculation on enzyme activity, available nitrogen content, and bacterial succession during pig manure composting[J]. Bioresource Technology, 2020, 306:123167.