

微生物菌肥在园艺作物上的应用研究

刘云峰^{1,2}, 杨宁², 温丹², 王晓², 孙凯宁², 王克安², 于占东^{1*}

(1. 吉林农业大学园艺学院, 吉林长春 130118; 2. 山东省农业科学院蔬菜花卉研究所, 山东济南 250100)

摘要 微生物菌肥作为绿色肥料, 为农业可持续发展和农产品安全等提供重要保障。综述了微生物菌肥的种类和作用机理, 重点分析了微生物菌肥应用的生态效应, 表明微生物菌肥可以提高化肥的利用率, 减少化学肥料的用量, 改善土壤环境, 保持土壤健康, 提高作物抵抗病虫害的能力, 促进作物的生长发育, 提高农作物产品质量。指出微生物菌肥推广应用过程中面临的问题, 提出今后研究和发展的建议。

关键词 微生物菌肥; 可持续发展; 测菌施肥; 持效性; 推广

中图分类号 S144 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2022)07-0011-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.07.003



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research Progress on Application of Microbial Fertilizer to Horticultural Crops

LIU Yun-feng^{1,2}, YANG Ning², WEN Dan² et al (1. College of Horticulture, JiLin Agricultural University, Changchun, Jilin 130118; 2. Institute of Vegetables and Flowers, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan, Shandong 250100)

Abstract As a green fertilizer, microbial fertilizer provides an important guarantee for the sustainable development of agriculture and the safety of agricultural products. This paper describes the types and mechanism of microbial fertilizer, analyzes and introduces the ecological effect of the application of microbial fertilizer. The results show that microbial fertilizer can improve the utilization rate of chemical fertilizer, reduce the dosage of chemical fertilizer, improve the soil environment, maintain soil health, improve the ability of crops to resist diseases and insect pests, promote the growth and development of crops, improve the quality of crop products. Points out the problems in the promotion and application of microbial fertilizer, and puts forward the suggestion of future research and development.

Key words Microbial fertilizer; Sustainable development; Fertilization by testing bacteria; Persistence; Promotion

随着我国保护地蔬菜产业的发展, 很多地区由于长年集约化经营所引起的土壤酸化与盐渍化问题对农业可持续发展、农产品质量安全及生态环境带来了一定的负面影响。随着设施作物连作年限的增加, 土壤碱解氮、速效磷、速效钾、有机质、微生物多样性等均呈现持续下降的趋势^[1], 如果不及治理将会影响蔬菜的产量和品质, 并严重制约国家农业绿色发展的需要^[2]。

种植者往往通过大量投入农业化学品以期获得高产, 而化学肥料长期施用会导致土壤结构破坏, 造成土壤微生物数量减少、病原菌数量增加、有机质含量下降, 加剧连作障碍的发生, 使农作物产量和品质下降, 以及种植成本上涨等一系列问题, 严重影响生态的稳定, 因此肥料的合理选择与使用对生态安全尤为关键, 而微生物菌肥作为环境友好型肥料, 以可持续的方式有效缓解了这一系列问题。微生物肥料可在农业绿色发展中发挥独特的重要作用, 从单一菌种向复合菌种、从提供单一养分功能到提供综合功能环境友好、生态循环的新型微生物肥料, 并且可与智慧型农业技术模式相结合, 做到测土配方、测菌施肥、动态监测。

1 植物与有益微生物

植物与微生物之间的相互作用为植物获取营养、提高抗

病性等提供了基本保障, 是调节植物生态系统的组成部分^[3]。在与植物有广泛相互作用的微生物群落中, 有一类活跃于植物根际的有益微生物被称为根际促生菌(plant-growth-promoting rhizobacteria, PGPR), 这些有益微生物可以分为植物促生长真菌(plant-growth-promoting fungi, PGPF)和植物促生长细菌(plant-growth-promoting bacteria, PGPB)两类, 是根际微生态系统中的重要组成部分^[4-5]。其中 PGPB 包括在根际细菌、内生细菌和其他促进植物生长的细菌, 对作物根际土壤养分的有效性及其养分循环起到重要作用^[6]。与根际细菌相比, 生活在植物组织中的内生菌不仅能促进宿主植物的生长, 并对其他竞争植物产生化感作用, 能发挥直接的有益作用^[7]。由于微生物种类繁多所以作用机理也多样, 总体而言可以使宿主植物更好地抵御生物和非生物的胁迫以及其他植物的竞争。

1.1 活化养分 微生物通过合成各种有机酸来溶解不溶性磷酸盐, 从而起到活化土壤中的矿质养分的作用。光合细菌(photosynthetic bacteria, PSB)将光能转化成植物所需的养分、能量, 有助于基质多元氮素的有效转化, 提高土壤中脲酶(urease)、过氧化氢酶(CAT)活性, 有利于植物对营养物质的吸收, 提高作物产量^[8-9]。固氮菌(*Azotobacter* sp.)分泌的多种维生素可促进植株的生长发育。研究发现, 胶质芽孢杆菌(*Bacillus mucilaginosus*)和环状芽孢杆菌(*Bacillus circulans*)对富钾火成岩的分解释放出磷、钾及其他营养元素的能力与自身代谢产生有机酸、胞外多糖等物质的能力有显著相关^[10-13]。酵素菌肥发酵过程中所含有微生物主要以酵母菌、乳酸菌、曲霉等为主, 其代谢产生大量的超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、细胞壁分解酶等, 浇施土壤中有

基金项目 吉林省市场监督管理厅资助项目(DBXM190-2019); 山东省现代农业产业技术体系蔬菜创新团队项目(SDAIT-05-07); 山东省农业科学院农业科技创新工程项目(CXGC2016B06, CXGC2018E08)。

作者简介 刘云峰(1989—), 男, 山东烟台人, 硕士, 从事设施蔬菜无公害生产技术研究。*通信作者, 副教授, 博士, 从事蔬菜栽培生理研究。

收稿日期 2021-06-28

利于除去土壤重金属同时增加它速效养分的含量^[14-15]。桓明辉等^[16]在秸秆还田试验中发现,生物菌肥能有效地促进秸秆分解,并且随着微生物数量增加,土壤脲酶、转化酶(invertase)、碱性磷酸酶(ALP)及过氧化氢酶的活性也显著增加。刘学静^[17]研究发现,酵素菌肥能够产生糖化酶(α -1,4-Glucan glucohydrolase)、尿素分解酶、纤维分解酶等几十种活性很强的酶,具有较强发酵分解能力。其中的脂肪酶(lipase)、淀粉酶(amylase)、蛋白酶(protease)和过氧化氢酶等能提高活性污泥产甲烷(methane)的潜力^[18-19]。Pfennig^[20]研究发现,光合细菌还能够合成糖类、氨基酸类、维生素类及其他生物活性物质。

1.2 促生长的活性物质 微生物群落结构与植物激素有相关性,通过改变作物根际周围的微生物群落结构来影响植株的激素种类和浓度^[21]。贾小明^[22]检测到多种微生物分泌细胞分裂素(cytokinin,CTK)。细胞分裂素影响植物根的伸长生长以及促进侧根和根毛的形成^[23]。微生物也能诱导植物产生激素,如吲哚乙酸(IAA)、赤霉素(gibberellins,GAs)和脱落酸(ABA)以及其他一些生长调节剂。乙烯(ethylene)作为胁迫激素参与植物生长发育过程,调节根和茎的生长,乙烯浓度升高会导致叶片衰老、黄化、萎蔫等,大多数非生物胁迫可诱导其产生,这对植物的生长和健康有不利影响。Glick^[24]研究发现,许多促进植物生长的根际细菌含有ACC脱氢酶,该酶可以裂解植物的乙烯前体ACC,从而降低植物产生的乙烯或者对乙烯水平进行调节,防止植物在受到胁迫时因乙烯水平升高而导致生长抑制。

此外,微生物可诱导植物系统抗性提高,使植物体内的茉莉酮酸(jasmonate)形成积累,能够促进气孔闭合,还能激活防御反应基因的表达,引发防卫素的合成,诱导产生渗透蛋白、高脯氨酸(L-Pipecolic acid)含量的糖蛋白(glycoprotein)、苯丙氨酸解氨酶(phenylalanineammonialyase,PAL)、植物抗毒素(phytoalexin)以及蛋白酶抑制剂(protease inhibitor)等的合成^[25-30]。枯草芽孢杆菌可通过产生激素和酶来提高植物对逆境的抗性^[31]。内生菌产生抗菌化合物、铁载体、挥发性有机化合物和抗生素,例如产生氰化氢、抗菌素、胞外酶等对病原菌具拮抗作用的代谢产物^[32-37]。

2 微生物菌肥分类、组成和施用模式

2.1 微生物菌肥分类 微生物菌肥种类繁多功能多样,在农业农村部登记的产品种类有农用微生物菌剂、生物有机肥和复合微生物肥料3大类12个品种^[38]。按照作用机理可分为传统微生物菌肥(如固氮菌肥、硅酸盐菌肥、解磷菌肥、解钾菌肥、根瘤菌肥等)和新型微生物功能菌肥(如细菌肥、放线菌肥、真菌类菌肥、根际促生菌等);按照制品可分为单一微生物菌肥和复合微生物菌肥;按照使用的类型可以分为微生物菌肥和微生物菌剂;按形态可分为液体、粉状和颗粒状。

2.2 微生物菌肥的组成 微生物肥料由早期提供单一功效逐渐向多功能复合微生物菌肥方向发展,从提供单一农业生态效应到多种复合菌株协同增效。作为一种新型生物肥料制品,微生物菌肥利用活性可繁殖微生物的生命活动及代谢

产物使作物得到特定需要的肥料养分,核心是其中特定的有效的活微生物。微生物的种类决定了菌肥的应用效果,目前使用的菌种有200多种,包括细菌、真菌、放线菌等功能菌株,其中以枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)、解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*)、胶冻样类芽孢杆菌(*Bacillus mucilaginosus*)、巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterium*)和地衣芽孢杆菌(*Bacillus licheniformis*)等植物根际促生菌最为常见^[39]。

2.3 施用模式多样 微生物菌肥可以和有机肥配施做基肥,也可做追肥。还可用来浸种、蘸根或叶面喷施等,具体施用方式要根据菌肥类型,土壤板结、病害程度等来酌情调整。Da Silva等^[40]认为,选择合适的方法可以增强有益菌在田间定植和促进甘蔗(*Saccharum officinarum*)生长。

2.3.1 作基肥。微生物菌肥基肥最好配施腐熟的农家肥,施用时应适当减少化肥的使用量。经济作物和大田作物的施用量应根据微生物菌肥的类型、种植的习惯和使用说明确定。李松儒^[41]研究发现,施用750 kg/hm²酵素有机肥+750 kg/hm²生物炭基肥+300 kg/hm²微生物菌肥可使桔梗(*Platycodon grandiflorus*)最快达到采收标准,并且根部长势最优,产量也能达到最高。马超等^[42]试验得出,施用农家肥90 m³/hm²+生物菌剂675 kg/hm²做基肥,可以使西瓜的植株长势偏旺,坐果率在97.2%左右。秦立金等^[43]发现,施用复合微生物菌剂做底肥时,马铃薯生理指标和产量指标效果更佳。师学静等^[44]建议,施生物有机肥1 800 kg/hm²+生物蛋白控释肥1 200 kg/hm²+土壤调理剂1 200 kg/hm²+微生物菌肥15 L/hm²做基肥,既能改善土壤的理化性状,又能明显提高马铃薯产量和品质。缪桂红等^[45]研究发现,用复合微生物肥做基肥时,比常规施肥处理的氮磷钾总养分用量增加25%时,西兰花的产量和收益较常规施肥显著提高。李怡博等^[46]用高碳基肥1 500 kg/hm²和微生物肥225 kg/hm²配施+纯氮30 kg/hm²对植烟土壤的改良效果最好,能够增加土壤微生物数量,提高土壤酶活性和土壤肥力。李坤灼等^[47]发现,在酸性土壤条件下,西瓜田基施复合微生物肥1 500 kg/hm²可明显提高西瓜的产量和品质。

2.3.2 作追肥。生物有机肥作追肥时,通常施用量跟化肥等值量或根据具体情况考虑配施一定量化肥,施用时间要比化肥提前7~10 d。有试验结果表明,在鲁西南蒜一椒轮作种植模式下,在大蒜种植时施用微生物菌剂300 kg/hm²的基础上,辣椒定植后用85%常规追肥量加上微生物菌剂150 kg/hm²,可使辣椒品质和产量显著提高^[48]。刘燕敏等^[49]的3年试验结果表明,在荞麦(*Fagopyrum esculentum* Moench)需肥期间用生物菌肥进行根部追肥和叶面喷肥能显著增加荞麦的结实率和千粒重,一般喷施用法为菌肥:水1:50搅拌,静置2 h后取用上清液。赵芮晗等^[50]进行生菜栽培试验时,用光合细菌(photosynthetic bacteria,PSB)和猪粪沼液配施做追肥,可使硝酸盐含量平均降低14.41%,V_C含量提高24.36%,其他品质指标也显著提高。

2.3.3 浸种、沾根。利用微生物处理种子是改善种子特性

的一种有效方法。目前常用且能与植物共生的植物内生菌主要有木霉属 (*Trichoderma*)、假单胞菌属 (*Pseudomonas*)、肠杆菌属 (*Enterobacter* Hormaeche and Edwards) 和芽孢杆菌属 (*Bacillus* Cohn) 等, 通过与种子形成紧密的内生联系来改善植物的生长和发育^[51]。使用时要根据菌肥的形态浸种施用, 固态菌剂可在清水中浸泡 1~2 h 后, 用浸出液进行浸种或沾根。液态菌剂要根据使用说明稀释相应的倍数后再使用。刘燕敏等^[49]把生物菌肥按照用量为 22.5 kg/hm² 拌种, 使用时将种子润湿加入肥料拌匀, 使种子与菌肥充分接触, 堆放 8~12 h 后播种。Zakria 等^[52]发现, 浸根接种比根际施用能观察到更多内生细菌的定殖。烟苗假植时通过蘸根可使侧根数比对照增加 20.4%, 促进烟苗的生长, 利于培育壮苗^[53]。

此外, 在作物生长期将菌肥溶于水中, 按说明要求稀释后用于叶面追肥, 选择阴天无雨的日子或晴天下午均匀喷施, 滤渣可再施于植物根部。

3 微生物菌肥的农业生态效应

微生物菌肥通过特定微生物的生命活动直接或间接为植物提供生长发育所需营养元素, 抑制病原微生物降低病虫害发生。菌肥具有高吸附的性能, 能固定大量水分和养分, 提高土壤向植物提供养分的能力, 肥料中的有机质能增加土壤空隙, 改善团粒结构, 进而提高土壤通气性, 增加土壤易代谢碳的含量^[54-55], 调节土壤氮素平衡, 还可促进土壤腐殖质的合成, 降解土壤中难溶有机物, 促进有机质的矿化, 增加土壤肥力^[56]。

3.1 培肥地力, 改善和修复土壤结构 长期施用化肥导致土壤板结, 通气性变差, 土壤有益微生物活力降低。微生物菌肥可促进土壤中微生物量增加, 秸秆腐熟菌剂可促进秸秆原位还田腐解及木质素的降解和腐殖质的形成, 提升土壤有机质、全氮和速效钾含量, 增加土壤肥力。各种自生、共生的固氮微生物可以增加土壤中的氮素, 尿素分解菌可诱导碳酸钙沉淀, 治理土壤重金属污染, 多种解磷、解钾微生物可以分解土壤中难溶的磷、钾^[57]。

通过微生物自身的生命活动增强土壤通气性, 使土壤相对容重减少, 提高土壤中有机-无机团聚体的含量, 促进土壤团粒结构形成, 使板结的土壤疏松透气, 改善土壤物理性质, 促进作物根系的生长^[58]。

3.2 防虫抗病, 增强作物抗逆性 有益微生物在作物根际微生态系统内生长繁殖, 形成优势种群, 保护根际, 抑制其他有害微生物的生长与繁殖^[59-60]。一些有益微生物对病原微生物具有拮抗作用, 当作物受到病虫害侵扰时, 能有效减轻病虫害对植物的损伤。微生物在生长繁殖过程中会分泌各种代谢产物, 刺激作物的生长。例如丛枝菌根真菌 (arbuscular mycorrhizal fungi, AMF) 可与宿主植物形成共生体提高根系对矿质元素吸收和保护酶活性, 以及改善植物体内离子平衡, 增强宿主植物的耐盐性^[61]。

复合微生物肥料中的特定有效活微生物能够诱导作物形成过氧化物酶和超氧化物歧化酶, 通过消除自由基的方法

减轻外界的不利影响, 增强作物抗逆性^[62]。广谱拮抗生防枯草芽孢杆菌胞外植酸酶可促进在盐胁迫条件下小麦幼苗的生长^[63]。D' Alessandro 等^[64]证明在玉米植株上接种具有产生 VOC 2,3-丁二醇潜力的内生产气肠杆菌可以增强对玉米叶枯病的病原体玉米大斑病菌的抗性。病害是威胁苹果生产的主要障碍之一, 其中花脸病和腐烂病是危害较为严重的两种病害。陈建明等^[65]通过 2 年的田间试验表明, 施加微生物菌肥促进了花脸病苹果植株根系的生长, 提高了植株对氮肥的吸收利用, 减轻了花脸病对产量和品质的影响。黄南^[66]利用含有解淀粉芽孢杆菌 SQR9 的微生物菌肥 (BIO), 能够有效降低黄瓜枯萎病 (cucumber fusarium wilt) 的发病率。西瓜枯萎病病原为尖孢镰刀菌西瓜专化型 [*Fusarium oxysporum* f. sp. *Hiveum* (E. F. Smith) Wollen.], 西瓜专用微生物菌肥能够防止西瓜枯萎病, 克服西瓜连作障碍^[67]。

3.3 节约资源, 减少农药化肥使用 含有特定微生物的菌肥能增加土壤中氮素、有效钾和有效磷在根际土的释放和转化利用, 提高肥料利用率, 与化学肥料配合施用, 使无机肥变为有机肥, 既可以保增产, 又能减少化肥使用量, 减少农业化学品用量, 达到平衡施肥、合理施肥^[68-69]。菌肥中的功能菌能增强土壤酶活性, 加快有机质的分解和利用^[70]。试验表明有机肥配施菌肥既能提高烟叶产量和品质, 又能降低肥料的使用量, 还能增加烤烟抗病能力^[71]。许丽等^[72]研究显示, 在对小麦玉米的减肥增效方面, 与对照相比, 生物菌肥等量替代复合肥使土壤中碱解氮、速效磷、速效钾的养分含量增加 12.49%~26.38%, 使土壤肥力库容增加。吴莉雅^[73]在解决太子参 (*Pseudostellaria radix*) 连作障碍的试验中, 通过施用生物菌肥提高了土壤的 pH, 从而提高重茬地土壤的缓冲效果, 使连作障碍得到有效缓解。

3.4 促进植物生长, 提高品质和产量 微生物菌肥可以改变根的形态结构, 良好的根系构型会提高作物对逆境的适应能力^[74]。根瘤菌可以提高植物分枝的程度从而增加侧枝的数量^[75]。褐球固氮菌 (*Azotobacter chroococcum*) 和巴西固氮螺菌 (*Azospirillum brasilense*) 混施促进了青钱柳 (*Cyclocarya paliurus*) 根细根的形成和生长^[76]。根的生长使根更大面积地接触土壤, 提高植物对营养元素和水分的吸收力。通过外源施加有益微生物菌剂调整土壤中微生物区系及活性, 是实现根际生态环境定向调控、改善植株生长发育状态的重要途径之一^[77]。微生物菌肥可以降低白菜、辣椒、豆角等农产品的硝酸盐含量, 提高维生素 C 的含量^[78-79]。

通过提高植物的光合作用, 可促进作物发芽开花, 使其成熟期提前, 使茄果类保果率提高 30%~40%, 增产 15%~30%, 叶菜类增产 9%~21%, 提高单果重、含糖量、延长储存期和品质, 提高农产品的市场竞争力^[80]。试验表明, 常规施肥配施生物菌肥, 可增加肥效, 提高单季晚稻^[81]成穗率, 能显著提高藜麦 (*Chenopodium quinoa* Willd)^[82]产量。与土壤调理剂配施处理促进效果显著, 使黄瓜株高和茎粗增加, 节间缩短, 提高了黄瓜的单果重和产量^[83]。

综上所述, 施用微生物菌肥对促进土壤微生物繁殖、改

善土壤结构、保持土壤健康、提高作物抗逆性、在促进作物生长发育和保护农业生态环境方面具有重要作用^[84],这使得微生物菌肥在农业上的作用逐渐被人们所认识,并拥有广阔的发展前景。

4 微生物肥面临的主要问题和对策

4.1 认识不够全面,要测菌配肥 很多种植者对微生物肥的认识不够全面,甚至进入夸大或否定的误区。一种肥料的效果如何,需经长时间的检验和准确的选择,同一菌肥在不同作物上的施用效果不同,不同菌肥对同一作物的施用效果也不同,同一菌剂的不同施用浓度对同一作物的影响也不同。不同土壤的类型和微生物区系的差异往往会使同种菌肥应用效果不同。特定微生物菌种才是微生物肥料的核心,对施用效果的影响最为直接,应结合实际的田间土壤类型、土壤肥力状况、气候条件以及菌种与宿主植物的亲和性进行有针对性地分析,选择出具有最佳生态效应的菌种,最好做到“测菌施肥”,继续深入全面地研究微生物促进作物生长和提高产量的机理及菌肥的田间持久性^[85]和肥效的变化规律。

4.2 配套设施缺乏,技术支持不完善 目前微生物肥料的施用方式大多是与其它化学肥料混施,或用于堆肥、沤肥、秸秆发酵,不但操作费时,使施肥成本大于买肥成本。而且微生物肥开始发挥效益的时间较化学肥料时间长,短期难见收益,有的地区农户使用积极性不高。微生物肥料在使用过程中,因其含有的特效微生物受环境等因素的影响较大,导致产品质量不稳定,影响了农户对微生物菌肥的正确认识和接受能力。应根据不同地区的使用习惯建立一套完整的标准化耕作体系,细化施用标准和方案,科学地指导实践生产^[86],同时开发相应的配套设备,降低使用的劳动强度,提高农户的劳动效率。

4.3 菌株复配协同作用 菌株复配协同作用机理有待深入研究,单一的微生物菌种只提供单一的功效,受土壤环境的波动、微生物间拮抗、农田条件的变化等因素影响,单一微生物很难高效地发挥理想的田间生态效应。可利用不同功能微生物之间的相互作用,科学合理的复配组合,应用生态学的观点,将生防菌株与田间土壤环境条件相结合,与土著菌株共同构建高效复合微生物菌系,共同缓解不同的生物和非生物胁迫,促进微生物生态功能更好的发挥。

参考文献

- [1] LI T Z, LIU T T, ZHENG C Y, et al. Changes in soil bacterial community structure as a result of incorporation of *Brassica* plants compared with continuous planting eggplant and chemical disinfection in greenhouses [J]. *PLoS One*, 2017, 12(3): 1-17.
- [2] 农业农村部. 农业农村部关于印发《农业绿色发展技术导则(2018—2030年)》的通知:农科教发[2018]3号[EB/OL]. (2018-07-06) [2021-03-17]. http://www.moa.gov.cn/gk/ghjh_1/201807/t20180706_6153629.htm.
- [3] TURNER T R, JAMES E K, POOLE P S. The plant microbiome [J]. *Genome biology*, 2013, 14(6): 1-10.
- [4] 张亮, 盛浩, 袁红, 等. 根际促生菌防控土传病害的机理与应用进展 [J]. *土壤通报*, 2018, 49(1): 220-225.
- [5] LUGTENBERG B, KAMILOVA F. Plant-growth-promoting rhizobacteria [J]. *Annual review of microbiology*, 2009, 63: 541-556.
- [6] KONG Z, GLICK B R. The role of plant growth-promoting bacteria in metal phytoextraction [J]. *Advances in microbial physiology*, 2017, 71: 97-132.
- [7] COMPANT S, CLÉMENT C, SESSITSCH A. Plant growth-promoting bacteria in the rhizo-and endosphere of plants: Their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization [J]. *Soil biology & biochemistry*, 2010, 42(5): 669-678.
- [8] 谷军, 杨旭. 光合细菌菌肥在番茄、黄瓜上的应用 [J]. *安徽农业科学*, 2002, 30(4): 592-593.
- [9] 陈宁, 赵贞, 林多, 等. 光合菌肥对基质环境、黄瓜穴盘苗生长及根系形态的影响 [J]. *华北农学报*, 2014, 29(3): 210-215.
- [10] 曹宇, 陈浩, 孙德四, 等. “硅酸盐细菌”对钾矿物浸矿效果的影响 [J]. *非金属矿*, 2020, 43(6): 1-4.
- [11] 连宾. 硅酸盐细菌 GY92 对伊利石的释钾作用 [J]. *矿物学报*, 1998, 18(2): 234-238.
- [12] 何顺特. 微生物肥对马铃薯产量、品质的影响研究 [J]. *种子科技*, 2017, 35(3): 122.
- [13] 白志强. 宁夏雨养区施钾对马铃薯产量和品质的影响 [D]. 银川: 宁夏大学, 2016.
- [14] 齐天翊. 自制酵素中细菌群落动态分析和优势菌株的重金属吸附积累特性研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2018.
- [15] 李方志, 李丝丝, 王殷, 等. 环保酵素改良土壤有机质与磷素的探索性研究 [J]. *环境科学导刊*, 2016, 35(5): 65-69.
- [16] 桓明辉, 李杨, 刘晓辉, 等. 秸秆生物菌肥对保护地土壤微生物和土壤酶活性的影响 [J]. *山东农业科学*, 2013, 45(1): 107-109, 116.
- [17] 刘学静. 酵素有机肥对辣椒产量及品质的影响 [J]. *北方园艺*, 2010(18): 35-36.
- [18] ARUN C, SIVASHANMUGAM P. Investigation of biocatalytic potential of garbage enzyme and its influence on stabilization of industrial waste activated sludge [J]. *Process safety and environmental protection*, 2015, 94: 471-478.
- [19] ARUN C, SIVASHANMUGAM P. Enhanced production of biohydrogen from dairy waste activated sludge pre-treated using multi hydrolytic garbage enzyme complex and ultrasound-optimization [J]. *Energy conversion and management*, 2018, 164: 277-287.
- [20] PFENNIG N. General physiology and ecology of photosynthetic bacteria [M]//CLAYTON R K, SISTROM W R. *The photosynthetic bacteria*. New York: Plenum Press, 1978.
- [21] 卢玉秋. 微生物群落对作物生长及植物激素的影响 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [22] 贾小明. 微生物产生的细胞分裂素 [J]. *微生物学通报*, 1996, 23(4): 230-235.
- [23] YOUNG S E, PHARIS R P, REID D, et al. PGPR: Is there a relationship between plant growth regulators and the stimulation of plant growth or biological activity? [J]. *Bulletin OILB SROP*, 1991, 14(8): 182-186.
- [24] GLICK B R. Modulation of plant ethylene levels by the bacterial enzyme ACC deaminase [J]. *FEMS microbiology letters*, 2005, 251(1): 1-7.
- [25] PIETERSE C M J, VAN WEES S C M, VAN PELT J A, et al. A novel signaling pathway controlling induced systemic resistance in *Arabidopsis* [J]. *The plant cell*, 1998, 10(9): 1571-1580.
- [26] ENYEDI A J, YALPANI N, SILVERMAN P, et al. Signal molecules in systemic plant resistance to pathogens and pests [J]. *Cell*, 1992, 70(6): 879-886.
- [27] FARMER E E, RYAN C A. Interplant communication: Airborne methyl jasmonate induces synthesis of proteinase inhibitors in plant leaves [J]. *Proceedings of national academy of sciences*, 1990, 87(19): 7713-7716.
- [28] PENNINGCKX I A, EGGERMONT K, TERRAS F R, et al. Pathogen-induced systemic activation of a plant defensin gene in *Arabidopsis* follows a salicylic acid-independent pathway [J]. *The plant cell*, 1996, 8(12): 2309-2323.
- [29] WASTERNAK C, PARTHIER B. Jasmonates-signalled plant gene expression [J]. *Trends in plant sciences*, 1997, 2(8): 302-307.
- [30] 吴跃开. 植物促生根圈细菌诱导植物系统抗性的研究进展 [J]. *中国森林病虫*, 2006, 25(2): 24-29.
- [31] 张金林, 吴永娜, 李剑, 等. 土壤有益细菌调控草类植物抗逆性及代谢产物积累的研究 [C]//中国作物学会, 中国细胞生物学学会, 中国遗传学会, 等. 2013 全国植物生物学大会论文集. 北京: 中国作物学会, 2013.
- [32] THOMASHAW L S, WELLER D M. Role of a phenazine antibiotic from *Pseudomonas fluorescens* in biological control of *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* [J]. *Journal of bacteriology*, 1988, 170(8): 3499-3508.
- [33] WELLER D M. Biological control of soilborne plant pathogens in the rhizosphere with bacteria [J]. *Annual review of phytopathology*, 1988, 26: 379

- 407.
- [34] BECKER J O, COOK R J. *Pythium* control by siderophore producing bacteria on roots of wheat[J]. *Phytopathology*, 1984, 74: 806.
- [35] LEONG J. Siderophores; Their biochemistry and possible role in the bio-control of plant pathogens[J]. *Annual review of phytopathol*, 1986, 24: 187-209.
- [36] PAHARI A, PRADHAN A, MAITY S, et al. Carrier based formulation of plant growth promoting *Bacillus* species and their effect on different crop plants[J]. *International journal of current microbiology and applied sciences*, 2017, 6(5): 379-385.
- [37] HAN Q, WU F L, WANG X N, et al. The bacterial lipopeptide iturins induce *Verticillium dahliae* cell death by affecting fungal signalling pathways and mediate plant defence responses involved in pathogen-associated molecular pattern-triggered immunity[J]. *Environmental microbiology*, 2015, 17(4): 1166-1188.
- [38] 李俊, 姜昕, 马鸣超, 等. 我国微生物肥料产业需求与技术创新[J]. *中国土壤与肥料*, 2019(2): 1-5.
- [39] 李俊, 姜昕, 马鸣超. 新形势下微生物肥料产业运行状况及发展方向[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(12): 2108-2114.
- [40] DA SILVA M F, DE SOUZA ANTONIO C, DE OLIVEIRA P, et al. Survival of endophytic bacteria in polymer-based inoculants and efficiency of their application to sugarcane[J]. *Plant & soil*, 2012, 356(1/2): 231-243.
- [41] 李松儒. 种植方式与施肥对叶用桔梗生长及品质的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020.
- [42] 马超, 曾剑波, 朱莉, 等. 不同类型基肥在西瓜上的应用效果初报[J]. *中国园艺文摘*, 2015, 31(10): 17-19, 62.
- [43] 秦立金, 李玉芳, 刘欣华, 等. 不同底肥处理对马铃薯生长及产量与品质的影响[J]. *农业科技通讯*, 2021(5): 159-162.
- [44] 师学静, 柴同海, 邢阴振, 等. 不同肥料配施对马铃薯产量和品质以及土壤理化性状的影响[J]. *河北农业科学*, 2021, 25(2): 72-76.
- [45] 缪桂红, 高建国, 赵丹, 等. 复合微生物肥替代化肥在如东县西兰花上的应用效果试验初报[J]. *上海农业科技*, 2019(6): 104-105, 136.
- [46] 李怡博, 翟春贺, 苏梦迪, 等. 微生物肥与高碳基肥配施对植烟土壤微生物数量和土壤肥力的影响[J]. *烟草科技*, 2021, 54(4): 23-32.
- [47] 李坤灼, 苏仕凤, 陆有通. 酸性土壤条件下复合微生物肥对西瓜产量和品质的影响[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(27): 11848-11849, 11961.
- [48] 殷碧秋, 李晶, 徐保民, 等. 蒜-椒轮作模式下配施微生物菌肥对辣椒减量追肥效果的影响[J]. *农业工程技术*, 2020, 40(20): 17-18.
- [49] 刘燕敏, 刘荣甫, 王全友, 等. 生物菌肥在有机芥麦种植中应用效果初探[J]. *农业科技通讯*, 2021(6): 106-112.
- [50] 赵芮芮, 张欢, 卢海凤, 等. 追施光合细菌, 结合细土对生菜生长效果的研究[J]. *河南农业大学学报*, 2020, 54(5): 786-792.
- [51] RAJ S N, SHETTY N, SHETTY H. Seed bio-priming with *Pseudomonas fluorescens* isolates enhances growth of pearl millet plants and induces resistance against downy mildew[J]. *International journal of pest management*, 2004, 50(1): 41-48.
- [52] ZAKRIA M, UDONISHI K, OGAWA T, et al. Influence of inoculation technique on the endophytic colonization of rice by *Pantoea* sp. isolated from sweet potato and by *Enterobacter* sp. isolated from sugarcane[J]. *Soil science & plant nutrition*, 2008, 54(2): 224-236.
- [53] 赵益强, 柳开芳, 洪晓莉. 菌肥不同施用方法对烤烟假植苗的影响[J]. *西昌学院学报(自然科学版)*, 1999, 13(1): 20-23.
- [54] 元炳成. 紫花苜蓿改良盐渍土对土壤微生物活性和养分含量的影响[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(3): 415-419.
- [55] 韩亚萍. 硒与酵素混施对番茄与菠菜生长及品质的影响研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- [56] 佟玉洁. 自制环保酵素改善土壤肥力试验研究[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(26): 119-121.
- [57] 黄晓东. 含有植物促生菌的生物制剂及其制备方法和应用: CN200810181327. 8[P]. 2009-08-05.
- [58] 毛骁, 孙保平, 张建锋, 等. 微生物菌肥对干旱矿区土壤的改良效果[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 201-206.
- [59] 李乐, 孙海, 刘政波, 等. 微生物肥料的作用、机理及发展方向[J]. *东北农业科学*, 2016, 41(4): 63-69.
- [60] 刘鹏, 刘训理. 中国微生物肥料的研究现状及前景展望[J]. *农学学报*, 2013, 3(3): 26-31.
- [61] 贺学礼, 赵丽莉, 李英鹏. NaCl 胁迫下 AM 真菌对棉花生长和叶片保护酶系统的影响[J]. *生态学报*, 2005, 25(1): 188-193.
- [62] 李忠. 复合微生物肥料的标准生产及应用探讨[J]. *中国标准化*, 2018(6): 190-192.
- [63] 郭英, 刘栋, 赵蕾. 生防枯草芽孢杆菌胞外植酸酶对小麦耐盐性的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2009, 15(1): 39-43.
- [64] D'ALESSANDRO M, ERB M, TON J, et al. Volatiles produced by soil-borne endophytic bacteria increase plant pathogen resistance and affect trophic interactions[J]. *Plant, cell & environment*, 2014, 37(4): 813-826.
- [65] 陈建明, 葛顶峰, 沙建川, 等. 微生物菌肥促进苹果花脸病植株氮素吸收和果实增产[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(5): 1296-1302.
- [66] 黄南. 微生物有机肥对黄瓜枯萎病及土壤微生物区系的影响[D]. 西安: 西北大学, 2017.
- [67] 凌宁, 王秋君, 杨兴明, 等. 根际施用微生物有机肥防治连作西瓜枯萎病研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(5): 1136-1141.
- [68] 祝英, 彭轶楠, 巩晓芳, 等. 不同微生物菌剂对当归苗生长及根际土微生物和养分的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2017, 23(3): 511-519.
- [69] 康林玉, 刘周斌, 欧立军, 等. 土壤微生物促进作物生长发育研究进展[J]. *湖南农业科学*, 2017(3): 113-116.
- [70] 李玉奇, 辛世杰, 奥岩松. 微生物菌肥对温室黄瓜生长、产量及品质的影响[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(1): 259-263.
- [71] 高政绪, 夏磊, 王德权, 等. 土壤有益微生物扩繁剂对烤烟生长及产质量的影响[J]. *广东农业科学*, 2018, 45(5): 19-24.
- [72] 许丽, 孙青, 容睿, 等. 生物菌肥等量替代氮磷钾复合肥对冬小麦和夏玉米产量及土壤肥力的影响[J]. *山东农业科学*, 2019, 51(4): 85-88.
- [73] 吴莉雅. 微生物菌肥对连作太子参的生长状况及品质提高的探究[J]. *海峡药学*, 2019, 31(11): 56-59.
- [74] 李秉钧, 颜耀, 吴文景, 等. 环境因子对植物根系及其构型的影响研究进展[J]. *亚热带水土保持*, 2019, 31(3): 41-45.
- [75] CATOIRA R, TIMMERS A C, MAILLET F, et al. The *HCL* gene of *Medicago truncatula* controls *Rhizobium*-induced root hair curling[J]. *Development*, 2001, 128(9): 1507-1518.
- [76] 徐子恒, 王志康, 陈紫云, 等. 生物菌肥对青钱柳根构型和根系形态的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(4): 258-266.
- [77] 孔庆宇, 秦嗣军, 张霞霞, 等. EM 菌剂对甜樱桃幼苗根际微生物区系及根系呼吸的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2013, 44(4): 409-412.
- [78] 冀玉良. 降低蔬菜体内硝酸盐污染的配合施肥技术研究[J]. *安徽农业科学*, 2006, 34(5): 947, 950.
- [79] 王朋, 刘丹, 梁文举. 微生物肥料对绿色食品蔬菜品质的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2002, 21(6): 562-563.
- [80] 车红梅. EM 菌的作用以及在蔬菜栽培上的应用技术[J]. *中国园艺文摘*, 2017, 33(3): 223-224.
- [81] 郭焕茹, 陈少杰, 童相兵. 生物菌肥作底肥对单季晚稻甬优 12 产量的影响[J]. *浙江农业科学*, 2016, 57(1): 11-12.
- [82] 邓妍, 王婷玲, 王创云, 等. 生物菌肥与无机肥配施对藜麦农艺性状、产量性状及品质的影响[J]. *作物学报*, 2021, 47(7): 1383-1390.
- [83] 王广印, 郭卫丽, 陈碧华, 等. 生物菌肥和土壤调理剂对大棚春黄瓜生长、产量和病害的影响[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(36): 58-62.
- [84] BERENDSEN R L, PIETERSE C M J, BAKKER P A H M. The rhizosphere microbiome and plant health[J]. *Trends in plant science*, 2012, 17(8): 478-486.
- [85] 占新华, 蒋延惠, 徐阳春, 等. 微生物制剂促进植物生长机理的研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 1999, 5(2): 97-105.
- [86] 张越, 赵宇宾, 蔡亚凡, 等. 农用植物酵素的生态效应研究进展[J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(3): 25-35.