

# 微生物菌肥在植物减肥增效中的应用研究进展： 以果树为例

王佳<sup>2</sup>, 李明聪<sup>\*1</sup>

1 山东农业大学 生命科学学院, 山东 泰安 271000

2 山东农业大学 园艺科学与工程学院, 山东 泰安 271000

王佳, 李明聪. 微生物菌肥在植物减肥增效中的应用研究进展: 以果树为例[J]. 微生物学通报, 2024, 51(11): 4394-4415.

WANG Jia, LI Mingcong. Research progress in the application of microbial fertilizers in chemical fertilizer reduction and efficiency increase in orcharding[J]. Microbiology China, 2024, 51(11): 4394-4415.

**摘要:** 在国内外积极发展绿色农业的背景下, 生产绿色优质农产品已成为当今农业绿色发展新趋势。然而, 果树栽培中仍存在化肥农药过量施用的问题, 造成农田生态环境严重污染, 果实品质下降, 进而危害人体健康。微生物菌肥是一类能够改良土壤生态、促进植物生长发育的新型绿色肥料, 含有多种有益活性微生物, 有助于改善农田生态环境, 提高果实产量和品质, 实现植物种植减肥增效。以往有关微生物菌肥的研究多局限于少数几种菌或单一植物领域, 缺乏对微生物菌肥作用机制及功效的系统探讨。本文综合梳理了微生物菌肥改良土壤生态和提高植物抗病/抗逆的作用机制, 并以果树为例, 重点阐述微生物菌肥在提高果实产量和品质、改善农业生态环境的应用, 同时指出技术瓶颈, 提出新的研究思路 and 方向, 为改善农业生态环境、促进现代农业可持续发展提供理论指导。

**关键词:** 微生物菌肥; 减肥增效; 机制; 果树产量和品质; 应用

资助项目: 山东省重点研发计划(2020CXGC010803-06); 山东省科技厅青年创新团队项目(2022KJ333); 国家自然科学基金青年基金(42007208); 山东省自然科学基金青年基金(ZR2020QD084)

This work was supported by the Key Research and Development Program of Shandong Province (2020CXGC010803-06), the Project of Shandong Provincial Science and Technology Department Youth Innovation Team (2022KJ333), the National Natural Science Foundation of China Youth Found (42007208), and the Natural Science Foundation of Shandong Province Youth Found (ZR2020QD084).

\*Corresponding author. E-mail: lmc@sdau.edu.cn

Received: 2024-03-08; Accepted: 2024-04-27; Published online: 2024-05-21

# Research progress in the application of microbial fertilizers in chemical fertilizer reduction and efficiency increase in orcharding

WANG Jia<sup>2</sup>, LI Mingcong<sup>\*1</sup>

1 College of Life Sciences, Shandong Agricultural University, Tai'an 271000, Shandong, China

2 College of Horticultural Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271000, Shandong, China

**Abstract:** The production of green and high-quality agricultural products has become a new trend, especially in the context of developing green agriculture. However, the excessive use of fertilizers and pesticides in orcharding has caused severe pollution of the farmland environment, resulting in low-quality fruits and posing a threat to human health. Microbial fertilizers are a new type of green fertilizers that contain beneficial microorganisms to enhance soil ecology, promote plant development, and increase productivity and can reduce the application of chemical fertilizers. Although the current research on microbial fertilizers is limited to a few microbial species and single crops, the studies have shown the potential of microbial fertilizers in improving soil, yield, and plant quality, while the mechanisms and effectiveness of these fertilizers need systematic investigation. Therefore, this article reviews the mechanisms of microbial fertilizers in improving soil ecology and enhancing plant resistance to disease and stress. Taking fruit trees as an example, we focus on the application of microbial fertilizers in improving the fruit yield and quality as well as the agricultural environment. In addition, we discuss the technical bottlenecks and put forward new research ideas and directions, aiming to provide theoretical references for improving the agricultural environment and promoting sustainable agricultural development.

**Keywords:** microbial fertilizers; chemical fertilizer reduction and efficiency increase; mechanisms; yield and quality of fruit tree; application

在国内外积极发展绿色农业的背景下，生产绿色优质农产品已成为当今农业绿色发展新趋势。然而，果树栽培中大量使用化肥农药，造成农田生态环境严重污染，果实产量和品质下降，进而危害人体健康<sup>[1]</sup>。2022年，农业农村部印发相关通知，加快推进农业生产减肥减药进程，着力促进农业绿色发展、全面绿色转型<sup>[2]</sup>。在大力提倡农业生产减肥增效的新趋势下，维持农田生态健康、实现果树增产提质，

对农业可持续发展意义重大。

作为一类新型绿色肥料，微生物菌肥以活性微生物为主要肥源，通过微生物生命代谢活动改良土壤生态环境，提高植物抗病/抗逆能力，进而促进植物生长发育<sup>[3]</sup>。微生物菌肥所含的有益微生物活菌种类丰富，主要包括细菌、真菌、放线菌等，对土壤酸碱度的耐受范围较广，可作用于诸多植物。目前在农业农村部登记的微生物菌肥主要包括菌根菌剂、复合微生

物菌剂、光合细菌菌剂、有机物料腐熟剂、生物有机肥、根瘤菌菌剂、生物修复菌剂、内生菌根菌剂、土壤修复菌剂和微生物浓缩菌剂十类。实际生产中，固氮菌肥、溶磷菌肥和解钾菌肥等传统微生物菌肥应用最广泛。近年来，功能更全面的新型微生物菌肥主要包括枯草芽孢杆菌肥料、生防营养肥料和放线菌肥料等，发展势头趋强。新型菌肥中以枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*) 应用频率最高，地衣芽孢杆菌 (*Bacillus licheniformis*)、解淀粉芽孢杆菌 (*Bacillus amyloliquefaciens*)、胶冻样类芽孢杆菌 (*Paenibacillus mucilaginosus*) 和巨大芽孢杆菌 (*Bacillus megaterium*) 的应用率分别为 20.82%、18.25%、17.00% 和 4.95%<sup>[4-6]</sup>。

我国对微生物菌肥的研究和应用始于 20 世纪 40 年代，该时期主要关注应用于花生和大豆的根瘤菌接种剂<sup>[7]</sup>。国外对微生物菌肥的研究相对成熟，1888 年荷兰学者 Beijerinck 首次获得纯培养的根瘤菌；1895 年法国学者 Noble 首次研制并在欧美推广纯培养的根瘤菌制剂；20 世纪 50 年代，有学者已在固氮菌及磷、钾细菌的研究中取得显著成效<sup>[8]</sup>。在全球科研工作者的不懈探索下，微生物菌肥经过不断地改进和完善，其生态学效益正逐渐由最初的单一化走向多功能方向。

在农业生产中，微生物菌肥能够增加土壤有效养分，有助于减少化肥用量，对营造绿色安全的农田生态环境具有积极影响；此外，菌肥所含的有益活性微生物还能通过促进抗性物质生成、诱导体内防御系统及调节酶活性来增强植物抗病、抗逆能力，进而抵御病原物的侵害、缓解逆境胁迫<sup>[9-10]</sup>。然而，以往有关微生物菌肥的研究多局限于少数几种菌或单一植物领域，更多地关注微生物菌肥提高氮<sup>[11-12]</sup>、磷<sup>[13]</sup>

等营养物质的功效，缺乏对菌肥作用机制及功效的系统探讨。本文结合团队关于植物病害、外界环境条件及施肥方式与微生物的关系等研究工作，系统梳理微生物菌肥在植物减肥增效方面的应用，为合理利用菌肥改善土壤生态、增强植物抗病/抗逆能力，实现植物种植减肥增效提供理论参考。

微生物菌肥作为一种绿色、环保、安全、高效的新型肥料，对农田生态健康及农业绿色发展具有重要意义。本文综合梳理微生物菌肥改良土壤生态和提高植物抗病/抗逆的作用机制，并以果树为例，重点阐述微生物菌肥在提高果实产量和品质、改善农业生态环境的应用，同时指出技术瓶颈，提出新的研究思路 and 方向，以期改善农业生态环境、促进现代农业可持续发展提供理论指导。

## 1 微生物菌肥改良土壤生态的作用机制

微生物菌肥可以将土壤中的碳、氮、磷化合物等转化为有效养分，供给植物吸收利用；合理调节土壤元素分配比，实现农田“微生物-土壤-植物”系统的协调共生与养分平衡<sup>[14]</sup>。另外，微生物菌肥还能调节土壤微生物的群落组成、改良土壤，提供优良的土壤生态环境，对植物生长发育产生积极影响。

### 1.1 提高养分转化和利用，调节元素比例

微生物菌肥能够增加土壤中有效养分的含量，调节植物生长发育所需营养元素的比例。微生物菌肥所含的微生物具备优良的生物活性，通过酶促反应、酸化作用或生物膜活性等将土壤中难溶性氮、磷、钾化合物转化为可溶性状态，以促进植物吸收、利用土壤有效养分，并协调其在体内的积累和分配，如图 1 所示<sup>[15]</sup>。

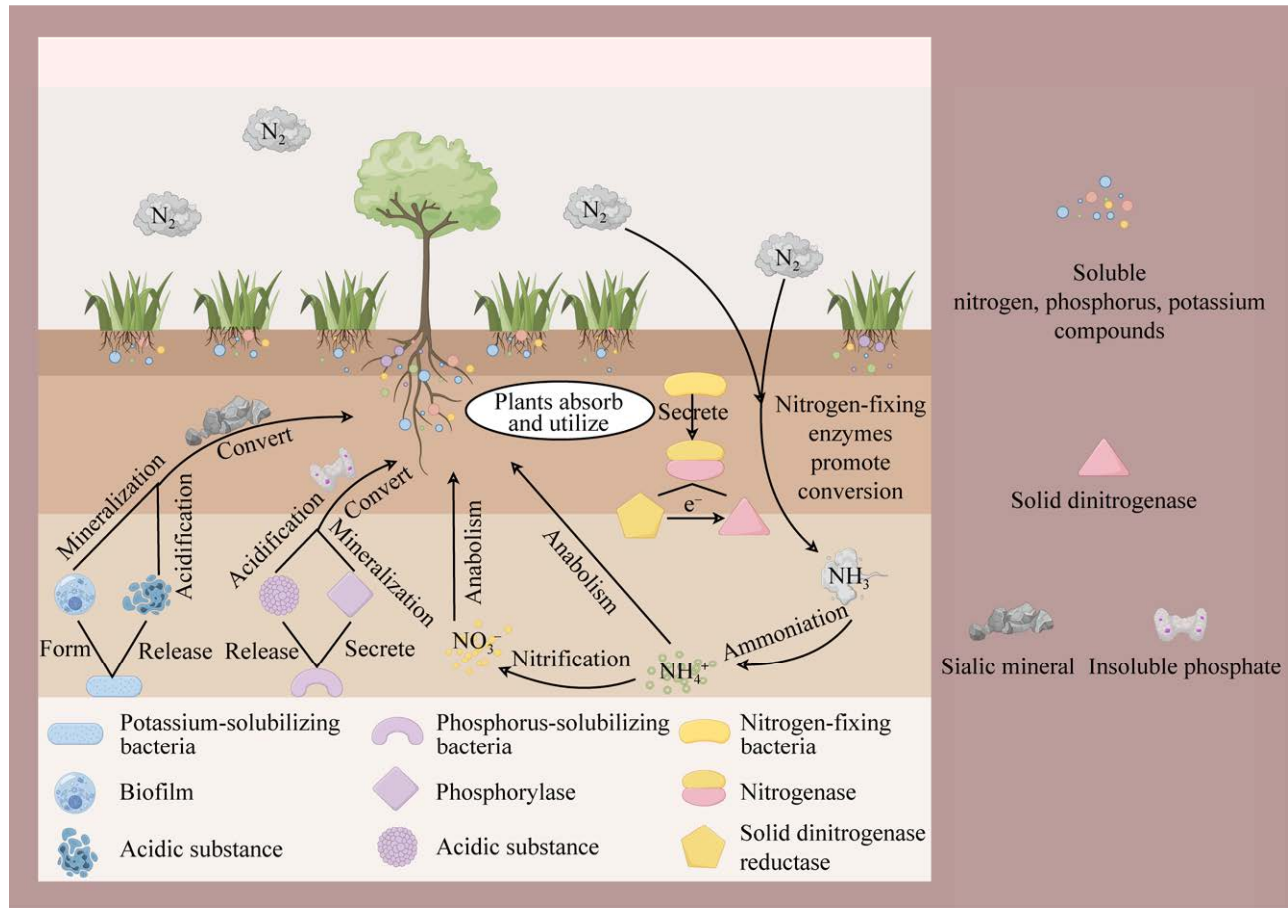


图 1 固氮菌、溶磷菌和解钾菌促进植物吸收养分的作用机制<sup>[15-21]</sup>

Figure 1 The mechanisms of action of nitrogen-fixing, phosphorus-solubilizing, and potassium-solubilizing bacteria in promoting nutrient uptake by plants<sup>[15-21]</sup>.

氮元素是植物生长不可或缺的重要营养元素，同时也是限制植物生长和产量形成的首要因素。总结以往研究得出，微生物菌肥中的固氮菌(*Burkholderia* spp.)产生的固氮酶(主要包括固二氮酶及固二氮酶还原酶)能够催化大气中氮气转化为氨气，再经氨化作用转化为铵盐。一方面，铵盐可以直接被同化为可溶性氮化物；另一方面，铵盐先经过硝化作用转化为硝酸盐，再经同化作用转变成利于植物吸收利用的氮化物，从而为植物提供充足的氮源，对植物促生、抗逆等产生良好效果(图 1)<sup>[16-17]</sup>。徐云龙等<sup>[18]</sup>从海南霸王岭的野生香蕉根际土壤中筛选出的

固氮菌(BWLY3X-6)，能够在胞外分泌氨态氮，有较高的固氮酶活性，自生固氮能力强，对南天黄和巴西蕉这 2 种香蕉的株高、茎围、地上和地下部鲜重均有显著促生作用。另有研究表明，固氮菌通过固氮作用为植物生长提供充足的氮源，加速了油菜生长<sup>[19]</sup>。

磷元素也是植物生长发育中不可或缺的重要养分之一。然而，土壤中的磷利用率较低，是植物最难获得的营养元素之一。微生物菌肥中的溶磷菌通过释放酸性物质、酶促反应来增溶、矿化不溶性磷酸盐，以分解土壤中的含磷化合物，并将其转化为植物可吸收的无机磷，

从而使植物获得有效的磷源(图 1)<sup>[20-21]</sup>。从土壤中分离耐温磷酸盐增溶菌(temperature tolerant phosphate solubilizing bacteria, TTPSB)的培养菌株 RPS9 作为微生物肥料组分,其对植物生长和磷营养的影响与添加推荐三聚磷酸钠(triple superphosphate, TSP)剂量的 50%相当,在支持玉米生长和磷吸收的成效显著<sup>[22]</sup>。另有学者对 2 种柳树接种溶磷菌,研究结果表明,溶磷菌能够增加土壤有效磷含量,刺激柳树生长,对植物生长发育产生积极影响<sup>[23]</sup>。

解钾菌通过产生酸性物质,利用酸化作用释放矿物质表面的难溶性钾、磷和硅等营养元素;另外,解钾菌也能通过形成生物膜,矿化硅铝酸盐等难溶性矿物质(图 1)<sup>[16]</sup>。这些难溶性矿物被转化为有效养分,供植物吸收利用,从而促进植物生长发育。刘岱松等<sup>[24]</sup>对烟草根际接种解钾菌,结果发现,相较于其他实验组,菌株 LK26 提高了盆栽烟草根际土壤中的钾含量,并且显著增加了烟草叶中的钾,从而证明解钾菌促进了烟草对钾的吸收利用,并证实菌株 LK26 是生物钾肥的优良菌株。最新研究表明,解钾菌通过调节植物体内酶代谢反应系统、光合作用、渗透调节和矿物质平衡机制等,提高叶片  $K^+$  含量,促进植物种子萌发和幼苗生长<sup>[25-26]</sup>。

此外,微生物菌肥通过调节植物生长发育所需营养资源的比(如 C:N:P)缓解土壤中氮、磷等元素限制,保证正常的养分供应,以促进植物生长发育。土壤中的 C:N:P 化学计量关系能够反映植物的养分利用效率和养分受限状态,其平衡主要受土壤微生物对土壤有机质的作用影响。微生物菌肥通过缓解土壤微生物与土壤对养分的竞争,实现微生物养分平衡,调节土壤 C:N:P 比,进而提高植物对土壤养分利用率,打破养分受限状态,从而维持农田生态系统“微生物-土壤-植物”的养分平衡<sup>[27]</sup>。

## 1.2 调节土壤微生物的群落组成

根际活性微生物菌群对植物的生长发育及生理代谢活动具有重要影响,在塑造植物生育、健康及抗逆性方面发挥重要驱动作用<sup>[28]</sup>。

微生物菌肥能够影响土壤微生物,调节植物根际菌群组成,增加根际有益功能菌群,改善植物根围的微环境,有利于促进植物的生长发育<sup>[29]</sup>。微生物菌肥含有诸多对土壤生态及植物生长发育有益的功能菌群,通过释放信号物质、分泌代谢产物、分解有机质并释放营养元素等,一方面与土壤中其他微生物进行竞争、协同和抑制等,直接调节微生物群落的构成和活性;另一方面能够影响土壤环境因子,改变土壤的生物学、理化性质,间接调节微生物群落的多样性和丰富度。有学者对栽培三七的土壤进行氯化苦(chloropicrin, CP)熏蒸后,分别施加有机肥和微生物菌肥,结果表明,菌肥处理能够提高土壤微生物多样性,增加有益菌种的相对丰度,并且促进效果显著优于单施有机肥处理;活化土壤氮、磷、钾养分,提升土壤肥力,改善土壤理化性质,最终促进三七品质和产量的提高<sup>[30]</sup>。

此外,对植物根际具有重要影响的土壤微生物主要是细菌<sup>[31]</sup>。综合以往实验研究可知,菌肥主要通过影响根际细菌群落丰富度发挥功效,对真菌群落结构的影响相对不显著。有研究发现,高寒草地紫花苜蓿经微生物菌肥处理,其土壤微生物群落结构变化显著,根际变形菌门(*Proteobacteria*)、放线菌门(*Actinobacteria*)、子囊菌门(*Ascomycota*)和担子菌门(*Basidiomycota*)的相对丰度显著增加,并且根瘤菌(*Rhizobium*)、节杆菌(*Arthrobacter* sp. Conn and Dimmick)、假单胞菌(*Pseudomonas*)等细菌的相对丰度显著高于真菌<sup>[32]</sup>。岳宏忠等<sup>[33]</sup>对设施黄瓜配施微生物菌肥,显著提高了土壤细菌群落的丰富度和

多样性,改善微生物群落结构,对作物具有一定的增产效果。肖娴等<sup>[34]</sup>研究含沼泽红假单胞菌(*Rhodopseudomonas palustris*)、枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)这2种菌的微生物菌肥对水稻田微生物群落的影响,结果发现,土壤微生物群落的多样性变化不明显,但细菌的相对丰度和 $\alpha$ -多样性有所改变,能够影响土壤微生物酶活性,间接调节土壤碳、磷循环,从而对水稻产量产生积极影响。Li等<sup>[35]</sup>探究一种高效植物促生长真菌(plant growth promoting fungi, PGPF) *Aspergillus brunneoviolaceus* HZ23 作用于白菜根际,结果发现,相较于对照组,菌株 *A. brunneoviolaceus* HZ23 (MF-HZ23)使土壤中蛭石微生物群、变形菌群及类杆菌群的相对丰度分别增加 34.40%、50.78%和 317.47%,与改良土壤密切相关。

### 1.3 改良土壤结构和理化性质

微生物菌肥不仅能够促进土壤稳定复合团聚体的形成,营造合理的土壤胶结状态,优化土壤结构;还能促进土壤有机质的分解,提高土壤肥力,增强土壤的通气透水性,降低土壤密度、容重,促使板结的土壤变得疏松,从而对根系的呼吸和生长发育产生积极影响<sup>[36]</sup>。

#### 1.3.1 改良土壤结构

微生物菌肥能够提高土壤中有益微生物的数量和活性,促进土壤团聚体的形成并维持稳定<sup>[37]</sup>。土壤团聚体是有机物质与无机颗粒形成的一种结合体,加强了土壤物理结构稳定性,有利于维持土壤肥力;增加土壤的通透性和固结性,保持土壤水分,促进根系生长。同时,土壤团聚体也是土壤微生物生长的场所,对微生物的生命活动具有重要影响。

自然界中的部分微生物,如枯草芽孢杆菌(*B. subtilis*)、产赤霉素和木霉素的细菌等,通过分泌黏结物质、形成生物膜及菌丝缠绕作用影响土壤团聚体的状态。如用碎屑接种的细菌

能够分泌细胞外多糖、蛋白质、氨基酸、有机酸等,通过黏合作用与土壤矿物质结合,显著促进土壤大团聚体和微团聚体的形成,降低淤泥和黏土含量,调节土壤质地比,使土壤处于相对合理的结构状态<sup>[38]</sup>;微生物菌丝的缠绕也具有黏合作用,能够影响土壤团聚体颗粒的胶结程度,在一定程度上维持土壤结构的稳定<sup>[39]</sup>。此外,部分土壤真菌能够通过电荷吸引、黏附及缠结作用等机制,影响不同空间尺度下的团聚体和土壤结构,在改良土壤方面发挥重要作用<sup>[40]</sup>。

#### 1.3.2 改善土壤理化性质

微生物菌肥中的活性微生物主要通过2种途径改善土壤理化性质:一是分泌土壤酶或分解土壤有机质,增加土壤养分。微生物菌肥中的有益活菌通过代谢活动直接分泌土壤酶或提高其活性,促进土壤生化反应,从而提高土壤理化质量<sup>[41]</sup>。冯世鑫等<sup>[42]</sup>向栽培罗汉果的土壤中施加改良后的微生物菌肥,以探究土壤酶活性,结果表明,施肥后土壤中脲酶、磷酸酶及过氧化氢酶活性均有所提高。其中,脲酶和磷酸酶分别参与土壤有机或无机氮、磷的转化,增加土壤肥力;而过氧化氢酶分解土壤有害物质,加速腐殖质和有机质的转化,释放气体和水分,有助于改善土壤通气性和透水性,降低土壤密度和容重,从而避免土壤板结,营造优良的土壤理化环境<sup>[43]</sup>。

二是通过产酸产碱、降解作用、改变养分形态及影响微生物活动等多重机制,改良土壤耕性,调节土壤 pH 值,提高养分利用率,减轻酸碱化对植物和土壤生态的不利影响,从而改善土壤的理化性质,进而为植物生长提供健康的土壤生态环境。另外,以往研究发现,微生物菌肥不仅能为土壤消毒,清除土壤中残留的病原物,还可以改善和重塑作物连作障碍危害下的土壤-植物微生态环境<sup>[44]</sup>。

## 2 微生物菌肥提高植物抗病/抗逆的作用机制

土壤、根际微生物、植物共生于同一农田生态系统,相互协调,相互制约,处于动态平衡,构成不可分割的整体。除了通过调控土壤养分资源、调节土壤微生物群落结构以及改良土壤理化性质等作用机制,为植物生存、产量和品质的形成营造适宜的土壤生态环境,微生物菌肥还能提高植物的抗病/抗逆能力,以减少植物种植过程中化学药剂(包括生长调节剂、激素等)的使用,确保植物的产量和品质<sup>[45]</sup>。微生物菌肥主要通过产生或促进植物产生抗性物质、诱导防御系统等,提高植物的抗病性和抗逆性。

### 2.1 增强植物抗病性

#### 2.1.1 促进抗氧化物质产生

从分子水平的角度讲,微生物菌肥中的有益微生物能够促进植物产生抗氧化物质(如抗氧化酶<sup>[46]</sup>、酚酸<sup>[47]</sup>),抑制植物体内活性氧自由基的积累,降低氧化损伤,从而提高植物的抗病虫害能力。菌肥中的微生物与植物根系相互作用,释放部分信号物质,能够刺激植物产生如超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)等抗氧化物质,以清除植物体内活性氧自由基等有害物质,减少氧化损伤,提高植物的抗氧化能力,从而增强植物的抗病能力。此外,抗氧化物质还可以维持细胞内氧化还原平衡,稳定细胞内环境,促进细胞正常代谢和生长。因此,微生物菌肥通过促进抗氧化物质的产生,不仅提高了植物对氧化应激的抵抗能力,还促进了植物的生长发育,为植物抗病提供有力支持。这种机制使植物在遭受病原侵袭时,能够有效地抵御病害,有利于植物健康生长。

#### 2.1.2 激活植物的防御基因

微生物菌肥所含的激素类物质,能够诱导植物启动防御反应,增强植物中与抗病性相关的基因表达,如编码防御酶、抗病蛋白、抗菌物质(抗生素、铁载体)等基因,从而提高植物的抗病性,促进植物正常生长。

研究表明,菌肥中的有益功能菌通过产生或刺激植物产生抵御病虫害的抗生素,能够减少植物病害的发生<sup>[48]</sup>。有学者利用苏云金芽孢杆菌(*Bacillus thuringiensis*, Bt)制成生物农药(Bt杀虫剂浓缩液),其杀虫效力约达 8 000 IU/mg,对菜青虫、小菜蛾和烟青虫的田间防效为 77%–90%<sup>[49]</sup>。已有研究证实,从土壤中分离得到的蜡样芽孢杆菌(*Bacillus cereus*, Bc)和 Bt 具有杀菌、杀虫活性,将其配制为微生物菌肥,施于感染细菌斑点剂黄单胞菌(*Xanthomonas euvesicatoria*, Xe)的辣椒上,培养一定天数,辣椒的生长得到显著改善<sup>[50]</sup>。目前,从苏云金芽孢杆菌 CHGP12 中提取的脂肽(lipopeptide, LP),对尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris*, FOC)表现出明显的抑制作用;在体外定性测定中,菌株 CHGP12 表现出产铁载体等抑菌物质,经菌株 CHGP12 处理的植物患病严重程度较对照组降低 40%,并且显著增加了植物在根和芽生长参数、气孔导度和光合作用速率的总生物量<sup>[51]</sup>。

#### 2.1.3 诱导系统抗病性防御系统

微生物菌肥能够诱导植物产生系统抗病性,增强植物抵御病虫害的能力,进而减少病虫害的发生。微生物菌肥诱导植物产生系统抗病性,是在植物未接受菌肥刺激作用的部位所产生的抗病性,能诱导植物全株抵抗病原物的侵害。郝大志等<sup>[52]</sup>利用复合微生物制剂探究黄瓜苗期枯萎病防治机理,结果表明,微生物制剂能够诱导黄瓜产生系统抗病性,并且证明该系统抗病途径是防治协同增效的主要机理。菌



肥中的某些微生物如溶磷菌、水泡-丛枝菌根等，对经食草昆虫啃食后的植物做出氧化应激响应，这种作用方式控制了植物的过氧化物酶(peroxidase, POD)、抗坏血酸过氧化物酶(ascorbate peroxidase, APX)、单脱氢抗坏血酸还原酶(monodehydroascorbate reductase, MDHAR)和谷胱甘肽还原酶(glutathione reductase, GR)等一系列抗氧化酶的时间动态；此类微生物如同植物对抗病虫害的疫苗，能够诱导受害初期的植物产生系统抗病机制，提高植物抗病虫害的免疫力，进而减轻植物病害<sup>[53]</sup>。

然而，考虑到外界环境及微生物自身特性等因素，并非所有微生物都利于植物抵御病害，部分微生物也能致使植物患病。马铃薯普通疮痂病(potato common scab, PCS)是一种由致病链霉菌引起的病害，在世界各地普遍发生，而人们对 PCS 与土壤微生物组间的关系知之甚少。本团队前期研究了疮痂病自然严重程度高(high PCS severity, H)和低(low PCS severity, L)的马铃薯植株 4 个土壤-根系区系：土球土壤(geocaulosphere soil, GS)、根瘤土壤(rhizosphere soil, RS)、根区土壤(root-zone soil, ZS)和沟渠土壤(furrow soil, FS)，我们发现，GS 是 H 组和 L 组之间唯一表现出显著差异的区系<sup>[54]</sup>。此外，本团队通过研究还发现，不同种类的微生物菌群在 PCS 根部严重程度低(root endophytes with low PCS severity, REL)和块茎严重程度高(tuber endophytes with high PCS severity, TEH)的富集程度也不同<sup>[55]</sup>。这些研究在一定程度上揭示了 PCS 的发生与微生物菌群间的密切关系，为进一步探究植物与微生物互作提供思考方向，为合理利用微生物菌肥增强植物抗病性、抵抗病原侵害提供理论依据。

## 2.2 提高植物抗逆性

微生物菌肥中的促生菌，如产酸杆菌、枯

草芽孢杆菌、产植物生长激素的菌株等，能够通过促进抗逆物质的生成、诱导植物体内抗逆系统、调节植物激素的合成与降解等，提高植物抗旱、耐盐碱等抗逆性。在干旱、盐胁迫的土壤环境下栽培水稻，对其接种内生放线菌白黄链霉菌(osmolyte-producing endophyte *Streptomyces albidoflavus*) Osi Lf-2，水稻的渗透调节能力显著提高；研究表明，菌株 Osi Lf-2 通过影响水稻体内渗透调节物质、抗氧化物质等抗逆物质的合成，诱导与胁迫及离子转运等相关的抗逆系统，调控水稻耐旱、耐盐等多级机制，实现盐碱环境下水稻的增产<sup>[56]</sup>。微生物菌肥配施低氮肥应用于盐碱化土壤中，显著提高氮化物的氨化和硝化速率，提高土壤中的铵态氮含量，缓解因盐碱胁迫导致的土壤氮素流失高、有效氮化物难转化、植物难吸收利用的困境，对植物的抗逆产生积极影响<sup>[57]</sup>。另有研究表明，施加腐殖酸的微生物菌肥能够提高植物对微咸水的安全利用率<sup>[58]</sup>。此外，微生物菌肥还能够发挥双重降盐效果，缓解逆境胁迫，为植物的生长发育提供安全健康的生态环境。一方面，根围微生物通过提高土壤孔隙度和储水量，减轻土壤盐渍化程度；另一方面，嗜盐性微生物通过消耗盐碱地中游离的  $\text{Na}^+$ ，能够降低土壤中盐离子的浓度<sup>[59-60]</sup>。

植物对根际微生物具有显著的特异性筛选效应，这些被筛选的根际微生物能够启动植物体内由茉莉酸(jasmonic acid, JA)、水杨酸(salicylic acid, SA)和内皮素(endothelin, ET)介导的免疫信号通路，触发微生物中保守的微生物相关分子模式(microbe-associated molecular patterns, MAMP)，从而诱导免疫，促使逆境下的植物迅速做出反应，以缓解逆境胁迫，在调节植物免疫及微生物区系中发挥重要作用<sup>[61]</sup>。Liu 等<sup>[62]</sup>研究不同肥料和灌溉处理下，盆栽番



茄植株的生长、生理、水分利用效率(water use efficiency, WUE)等变化, 结果表明, 在亏缺灌溉条件下, 用枯草芽孢杆菌肥料处理番茄, 提高了植株耗水量, 优化了植株 WUE, 是缓解番茄植株水分胁迫和促进植物生长的最佳施肥方案。另有研究证实, 一方面, 微生物菌肥中的有益活菌(如芽孢杆菌)通过产生 1-氨基环丙基-1-羧酸(1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid, ACC)脱氨酶, 降解乙烯(ethylene, ETH)的合成前体 ACC, 减少乙烯的含量, 进而减轻乙烯对逆境胁迫下植物的不利影响; 另一方面, 菌肥中的枯草芽孢杆菌还可以提高植物体内细胞分裂素(cytokinin, CTK)水平, 增加脱落酸(abscisic acid, ABA)含量, 缓解干旱胁迫, 从而提高植物对逆境的耐受能力<sup>[63]</sup>。

为探究微生物菌肥在农田盐碱地的应用, 缓解作物在盐碱等逆境下的胁迫, 本团队研究了细菌和古细菌在不同环境条件下的生态模式。我们发现, 细菌和古细菌在农业土壤和非农业土壤中具有截然不同的微生物群落结构; 古细菌群落比细菌群落分布更受限; 观察到相似的环境因素但对 2 种菌群具有截然不同的影响; 细菌和古细菌在微生物共生网络中均占据重要位置<sup>[64]</sup>。上述及以往诸多有关不同生境中微生物生态模式的研究, 为我们后期探究微生物菌肥增强植物抗逆性及实现增产提质提供了坚实的理论支撑, 同时为农业生产实践提供科学指导。

### 3 微生物菌肥在果树减肥增效方面的应用

如前所述, 微生物菌肥通过提高植物对养分的转化和利用、调控土壤元素比, 调节土壤微生物的群落组成, 改良土壤, 并增强植物抗

病、抗逆能力, 来提高植物的产量和品质、改善农业生态环境, 真正实现减肥增效。本节在已充分阐明微生物菌肥作用机制的基础上, 探讨微生物菌肥实现果树增产提质、改善农业生态环境方面的应用, 以进一步证实菌肥能够显著提高果品产量, 改善果实营养品质和贮运品质, 进而将理论应用于实践, 推动新形势下农业的可持续发展。

#### 3.1 提高果实产量

微生物菌肥通过改良土壤生态、提高植物抗逆/抗病能力的作用机制, 促进果树生长发育, 提高果实产量。微生物菌肥中主要有效菌种——植物根际促生菌(plant growth promoting rhizobacteria, PGPR), 对植物的生长有显著促进作用, 有利于提高果实的产量。

PGPR 与植物根系紧密相关, 在植物根际内、外均有分布<sup>[65]</sup>, 主要包括芽孢杆菌属(*Bacillus*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)、伯克霍尔德氏菌属(*Burkholderia*)和根瘤菌属(*Rhizobium*)等。PGPR 不仅能够增强植物对养分的吸收, 还能缓解病虫害对植物生长的抑制, 提高植物生产力。一方面, PGPR 能够活化土壤中的脲酶, 将尿素水解为氨化物(NH<sub>3</sub>), 后经氨化作用和硝化作用, 转化为易于被植物吸收利用的有效氮化物(铵盐、硝酸盐); 另一方面, PGPR 分泌的水解酶(几丁质酶)可以溶解真菌类病原物细胞壁, 释放的铁载体能够导致病原物缺铁, 以及分泌的有机酸、氨基酸和氢氰酸等代谢产物均可抑制病原物对植物的损害(图 2)<sup>[66]</sup>。假单胞菌(*Pseudomonas*)和芽孢杆菌(*Bacillus*)能够产生多种抗生素化合物, 抑制菜豆分枝杆菌(*Cohnella phaseoli*)危害菜豆等, 减轻植物患木炭腐烂病和幼苗枯萎病的几率<sup>[67]</sup>。有研究表明, 植物在施加 PGPR 后, 出苗数、成熟期株高、拔节期根长等生长量相较于施全量化肥组有所

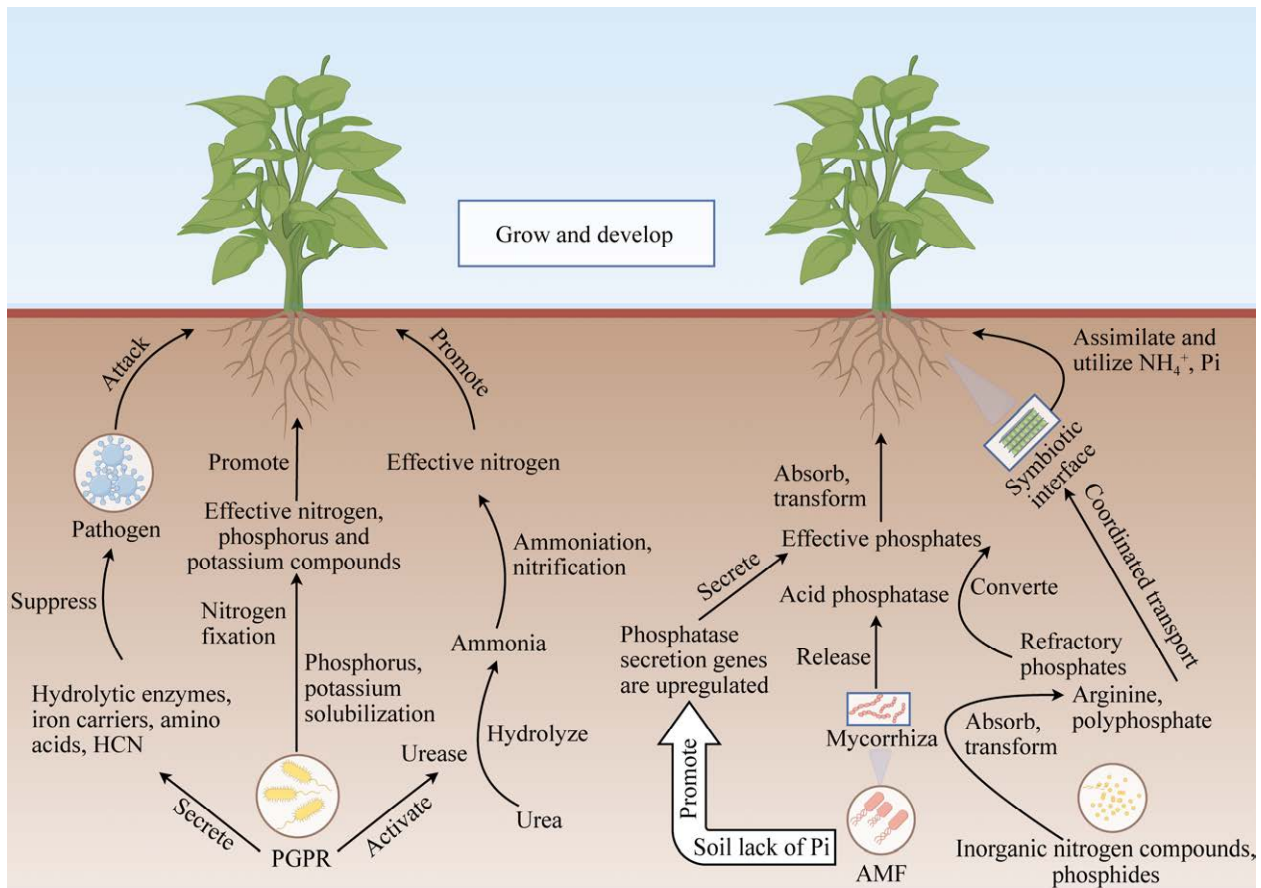


图 2 植物根际促生菌与丛枝菌根真菌对植物生长发育的调控机制<sup>[66-73]</sup>

Figure 2 The mechanisms of plant growth and development regulation by plant growth promoting bacteria (PGPR) and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF)<sup>[66-73]</sup>.

提升；千粒质量、穗粒数、产量及籽粒粗脂肪、磷、钾和锌含量也均较对照组有所增加<sup>[68]</sup>。内生细菌菌株伯克霍尔德菌 GXS16 作为有效的植物生长促生菌(plant growth promoting bacteria, PGPB)，能够在甘蔗中寄生，通过增强甘蔗体内生物固氮(biological N fixation, BNF)过程促进甘蔗生长发育<sup>[69]</sup>。最新研究发现，吸附了 PGPR 的纳米颗粒和生物炭能够缓解枯萎病对番茄和西瓜的危害，抑制疾病发生，有利于作物的稳产高产<sup>[70]</sup>。

其次，菌根真菌特别是丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)，通过与植物互利共生，增强植物对水分、矿质养分的吸

收，也能促进植物产量的形成。AMF 的菌丝能够吸收土壤中的铵盐、硝酸盐等无机氮化物和磷化物，分别转化为精氨酸和多聚磷酸盐，经协同运输转运至 AMF 与植物根系的共生界面，再分解为  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Pi}$ ，供植物根细胞吸收(图 2)<sup>[71]</sup>。另外，AMF 还能够直接或间接产生酸性磷酸酶，转化土壤中难溶性磷化物，促进植物对有效磷的吸收利用。一方面，在土壤低 Pi 条件下，AMF 参与共生植物体内酸性磷酸酶分泌基因的上调，增强酸性磷酸酶基因表达，从而增加酸性磷酸酶的合成和释放(图 2)<sup>[72]</sup>；另一方面，AMF 还能直接通过菌丝释放酸性磷酸酶，供植物生长利用(图 2)<sup>[73]</sup>。现有研究首次揭示，添加

AMF 和根瘤菌配制成的微生物菌肥,能够显著提高瓜尔豆的新陈代谢和产量;研究表明,AMF 和根瘤菌的联合接种施肥是改善瓜尔豆生长发育、提高产量和质量的创新方法<sup>[74]</sup>。

此外,以往诸多研究证实,微生物菌肥在增加果树产量、提高生产力方面具有显著功效。卢德等<sup>[75]</sup>研究微生物菌肥对果桑初果期果实形状表现,结果表明,使用微生物菌肥显著增加了果桑初果期的果长、横径、单果重,果实产量明显提高。对苹果的研究表明,减肥配施一定梯度的高性能系统(high performance system, HPS)微生物菌肥对冰糖心苹果的增产效果十分显著<sup>[76-77]</sup>。

## 3.2 改善果实品质

微生物菌肥在提高果实的营养品质和贮运品质方面具有优良功效,能够实现果实综合品质的提升。

### 3.2.1 果实营养品质的提高

微生物菌肥能够提高果实的糖酸比、可溶性固形物、维生素 C、花青苷等,改善果实的营养品质。王爱玲等<sup>[78]</sup>用减氮 20%的化肥配施微生物菌肥处理“富士”苹果果树,获得促进果树生长发育的最佳肥效,并且苹果果实中可溶性固形物、维生素 C 含量相较于传统施肥组提高,提升了果实品质。向葡萄配施微生物菌肥,果实的可滴定酸含量下降,而可溶性糖、维生素 C 及糖酸比均有所提高<sup>[79]</sup>;向巨峰葡萄施加含水拉恩氏菌(*Rahnella aquatilis*) JZ-GX1、巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterium*) ZS-3 和贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*) YH-20 的微生物菌肥,葡萄的风味、口感以及果实着色度均得到改善<sup>[80]</sup>。另有研究表明,向卷心菜和黄瓜减肥配施微生物菌肥,改善了两者的质量参数,显著提高了产量和品质<sup>[81-82]</sup>。

此外,以往关于草莓<sup>[83]</sup>、梨<sup>[84-85]</sup>等果树的

研究表明,微生物菌肥主要通过提高可溶性固形物、含糖量、糖酸比和香气品质,提高果实的综合品质;而对于生菜<sup>[86]</sup>、芹菜<sup>[87-88]</sup>、番茄<sup>[89-90]</sup>等蔬菜的研究表明,菌肥在降低总酸度、减少硝酸盐的积累量、提高维生素 C 及可溶性糖含量等方面发挥重要作用;同时,对其他农作物如小麦<sup>[91]</sup>、水稻<sup>[92]</sup>等的研究证实,菌肥能够提高淀粉、可溶性蛋白质、脂肪、膳食纤维及异黄酮等营养组分含量,进而改善农作物营养品质。

### 3.2.2 果实贮运品质的提高

微生物菌肥通过增强果实硬度、提高或维持果皮色泽度、延长果实成熟期等,实现果实耐贮运,改善采后果品的品质。曹秋艳等<sup>[93]</sup>研究测评了采后贮藏期的无花果果实,发现施微生物菌肥的果实处理组的果皮色亮度值、硬度、总可溶性固形物含量,分别比对照组提高 17.03%–28.29%、3.26%–29.69%、4.82%–15.48%,腐烂指数较对照组降低 84.00%,无花果果实一定时期内仍能保持良好的果色、硬度和新鲜度。此外,以往诸多对微生物菌肥影响苹果、桃、梨等果实品质的研究证明,菌肥能够保持贮运期果实的硬度、色泽和新鲜度,减轻果实霉烂等病害,提高贮运期果实的品质,为人们提供优质绿色果品。

微生物拮抗菌因优良的抗菌防病特性,被广泛应用于果蔬保鲜贮运<sup>[94]</sup>。张鸿雁等<sup>[95]</sup>利用桑氏链霉菌(*Streptomyces sampsonii*) X13 处理贮藏期患果腐病的番茄,结果表明,菌株 X13 通过延缓果实硬度、可溶性固形物、可滴定酸及维生素 C 的下降,降低番茄的腐烂指数,并能显著抑制病原葡萄座腔菌(*Botryosphaeria dothidea*),实现番茄贮运期的防腐保鲜。有益拮抗酵母菌能够降低贮藏期樱桃番茄的腐烂率、失重率,显著延缓果实变色<sup>[96]</sup>。另有研究发现,对采后

番茄病害的生物防治效果优良，向贮藏期的番茄接种有益拮抗微生物黑酵母菌(*Aureobasidium pullulans*) S-2，不仅能够在规定时间内保持番茄果实硬度，减轻果实失重，还能抑制植物病原菌，降低番茄腐烂发病率，从而保证果实新鲜度，提高果实贮运品质<sup>[97]</sup>。

### 3.3 改善农业生态环境

在农业生产中，微生物菌肥不仅有助于果树丰产、果品提质，还能够通过减少化肥农药的用量，改善农业生态环境<sup>[98]</sup>。

微生物菌肥能够显著提高果树对肥料的利用率，从而减少化肥的用量。新型菌肥的使用改变了单纯依靠调控传统肥料养分组成而改善肥效的技术方略，通过促进植物对营养资源的吸收利用，活化土壤微生物功能菌群，培肥地力，综合调节“微生物-土壤-植物”系统，更程

度地提高了菌肥的肥效(图 3)<sup>[98]</sup>。这种有益活性微生物与传统肥料的创新性结合，极大地减少了果树栽培中化肥的用量和使用频率。

从农业可持续发展的角度来看，微生物菌肥还能弥补长期大量使用化肥对土壤造成的严重污染，节约了肥料资源，并且能保证果树的优质高产，真正实现减肥增效<sup>[99]</sup>。以往研究表明，施有机肥能显著改善土壤质量，调节根际微生物群落结构，有利于植物增产。然而，长期使用不同比例有机肥替代化肥对水稻产量的影响尚不明确。本团队前期研究了施肥对水稻产量、土壤特性、土壤菌群分布及其功能的具体影响。结果表明，高比例有机肥配施部分化肥显著改善土壤养分状况，改善土壤细菌群落结构，使水稻显著增产；该研究为指导微生物菌肥的生产应用及农业可持续发展提供理论依

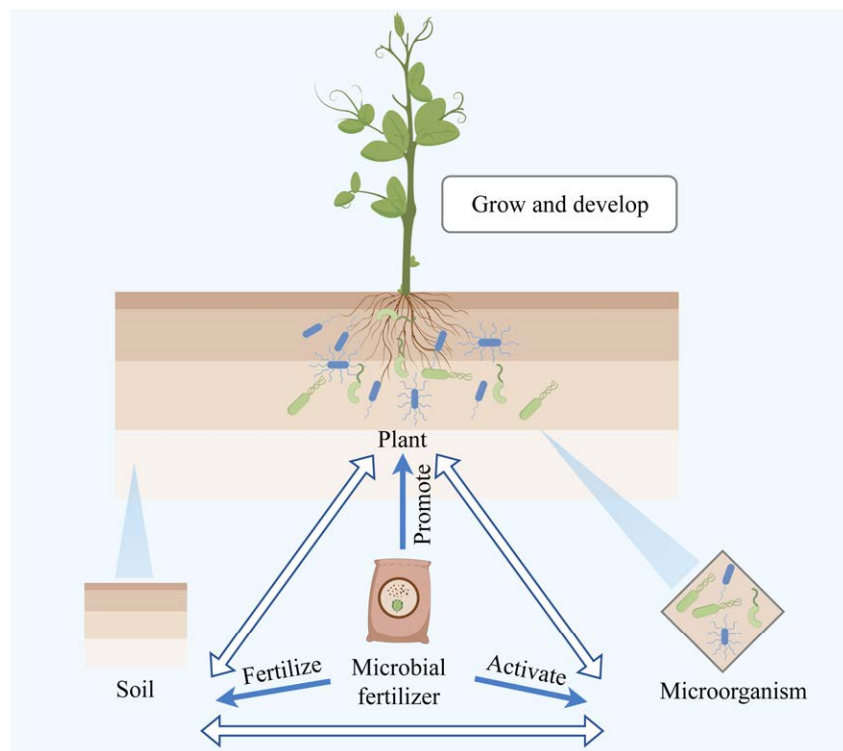


图 3 微生物菌肥调控下的“微生物-土壤-植物”系统<sup>[98]</sup>

Figure 3 A microbial-soil-plant system under the control of microbial fertilizers<sup>[98]</sup>.

据<sup>[100-101]</sup>。陈文东等<sup>[102]</sup>探究微生物菌剂对昭通苹果在减肥增效方面的效果, 研究表明, 化肥减量 20% 配施微生物菌剂的处理组, 在提高果实产量和品质方面显著高于其他处理组。另有研究表明, 微生物菌肥代替部分化肥配施于小麦-玉米种植系统中, 能够提高土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)固存量和降低碳足迹(carbon footprint, CF), 维持粮食高产、减少温室气体排放, 为优化农业生态系统中化肥的使用提供有效策略<sup>[103]</sup>。

另外, 菌肥中的微生物通过吸附和累积、淋溶和沉淀、转化(氧化还原)、解毒等作用, 能够减轻土壤中有害重金属等污染, 进而改善农田生态环境<sup>[104]</sup>。微生物细胞壁上存在诸多能够与重金属离子络合的官能团, 包括羧酸盐、羟基、氨基和磷酸基团等, 可以吸附重金属离子, 影响其迁移转化效率, 这些重金属离子又能进入细胞, 与细胞质中的金属硫蛋白(metallothionein, MT)等螯合或与带电官能团络合, 实现重金属在细胞内的累积; 微生物通过分泌降解酶、有机酸等改变土壤 pH, 使重金属在酸性或碱性条件下溶解; 微生物生长过程中产生的代谢产物, 如无机盐、氢氧化物、 $S^{2-}$ 和  $PO_4^{2-}$ 等能够与土壤中的重金属离子( $Cd^{2+}$ 、 $Pb^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$ 、 $Cr^{3+}$ 等)反应生成沉淀; 此外, 微生物还可以通过甲基化和脱甲基化、氧化还原反应等转化重金属离子的价态, 降低其活性, 削弱重金属对土壤及植物的毒害。微生物对重金属解毒的作用机制已成为领域内的研究热点, 在真核微生物和部分原核微生物中发现的重金属结合肽能够发挥区隔化作用, 可以与分布在细胞不同区域的重金属特异性结合形成无毒或低毒络合物, 从而消除或减弱重金属的毒性<sup>[105]</sup>。

利用肠杆菌(*Enterobacter* sp.) A11 和丛毛单胞菌(*Comamonas* sp.) A23 混合制成的微生物

菌剂, 通过产生新型氧化还原酶、琥珀酸、硫化氢等物质以及合成生物膜(固定重金属离子)、转运金属离子和激活三羧酸(tricarboxylic acid, TCA)循环(产生还原性物质)等, 能够修复重金属砷、铬、镉污染; 将该混合菌剂接种于中度和高度镉污染的白菜上, 发现地上部土壤中镉含量分别下降了 63% 和 39%, 减少了白菜对镉离子的吸收<sup>[106-107]</sup>。吴多基等<sup>[108]</sup>利用炭基微生物菌剂和复合微生物菌肥修复 Cd 污染石灰性稻田, 降低了土壤中 Cd 的生物有效性, 从而减少土壤中重金属污染物; 何明皇等<sup>[109]</sup>向养殖底泥中施微生物菌肥, 检测发现砷、锰、汞、铜和镉 5 种重金属的含量分别下降了 11.93%、22.81%、20.84%、22.73% 和 18.00%; 霍乾伟等<sup>[110]</sup>采用石油烃高效降解菌剂, 搭配不同实验因素处理土壤中石油烃, 结果表明, 土壤中的石油烃降解率最高可达 62.8%。

## 4 总结

微生物菌肥作为一种绿色、安全、高效的新型肥料, 逐渐受到人们的重视, 经过持续的改良和发展, 对土壤生态、植物、农业生产环境产生积极影响, 在国内外得到推广和应用。近些年, 学术界涌现出了大量有关微生物菌肥培肥地力、提高植物产量和品质、改善生态环境等的报道, 诸多学者和企业已投入到微生物菌肥的研发和制备中。微生物菌肥正在改变农业生产模式, 为促进现代化农业可持续发展做出重大贡献。

本文结合微生物与植物病害、逆境胁迫等研究工作, 分别从微生物菌肥改良土壤生态、提高植物抗病/抗逆的作用机制进行分析: 一方面, 微生物菌肥不仅能够提高土壤中有效养分、调节营养元素比, 促进植物对养分的吸收利用, 还能调节土壤微生物的群落组成、改良土壤结



构和理化性质，为植物生长发育提供优良的生态环境；另一方面，微生物菌肥通过产生或促进植物产生抗性物质、诱导防御系统等，提高植物的抗病/抗逆能力。文章在综合梳理微生物菌肥作用机制的基础上，以果树为例，重点探讨菌肥在提高果实产量和品质、改善农业生态环境的应用，为菌肥在植物减肥增效应用领域的应用提供理论参考，以推动农业可持续发展。

然而，在微生物菌肥实现植物种植减肥增效的研究领域中仍然存在诸多问题。目前，对微生物菌肥的研究更多停留在实验室或田间试验的层面，难以挖掘其在农业生产中的实际功效；其次，微生物菌肥含有诸多功能菌种，其种类、组合及配比方式赋予菌肥各异的功效，而以往研究多局限于探讨少数几种菌肥的功能，使研究结果参差不齐，缺乏代表性；此外，微生物菌肥中的活性微生物对环境因子极其敏感，而使菌肥难以稳定发挥功效；加之许多农民对微生物菌肥仍缺乏理性的认知，致使其应用力度远不及传统化肥，难以实现大规模推广应用。

本综述针对以上阻碍微生物菌肥发展的因素，结合团队研究工作，提出以下创新性解决方案：

(1) 从微生物菌肥自身角度出发，加强新品种选育，筛选能够充当良种繁育工具材料的有益功能菌，进而研制出性能更加优良、稳定、持久的微生物菌肥；另一方面，探究微生物菌群的生态模式与环境因子的关系，探讨环境因子的变动对微生物菌群的丰富度、多样性、群落组成和功能变化的影响，通过调控环境因子，人为创造适于目标微生物菌群生存、有利于其稳定发挥功能的“微环境”，以提高菌肥发挥功效的稳定性。

(2) 制定一套科学的微生物菌肥配施标准，

即微生物菌肥中所含微生物种类与化肥的组合、配比以及菌肥与不同植物的搭配应合理化、标准化、规范化；同时，基于团队前期关于施肥方式对水稻产量影响的研究，针对菌肥在实际生产中应用的年限，应根据目标菌种、植物及环境因子等确定，以使菌肥能够最大限度地发挥减肥增效的功能。

(3) 推进核心菌种的研发，研制具有特异功效的有益菌种，实现微生物菌肥“定向化”“专门化”地改良土壤生态、提高植物的产量和品质等，更加精准、高效地解决农业生产问题。本团队研究了马铃薯普通疮痂病的发生与土壤微生物菌群的关系，为发掘有益菌种增强植物抵御病害或特异性治疗植物病害提供理论依据。

(4) 有关部门及领域内专家应强化关于微生物菌肥基础理论的科普教育；政府加大扶持力度，鼓励高校对接农民，引导农民理性看待微生物菌肥，增强其对新型菌肥的接纳能力；同时对农民进行专业化培训，以指导农民将菌肥科学地应用于实际生产。

## 5 展望

作为一种绿色、环保、安全、高效的新型肥料，微生物菌肥对农田生态环境及农业绿色发展具有重大意义。因此，研究微生物菌肥在植物减肥增效中的应用，在掌握菌肥增效提质作用机制的同时，可以为改善生态环境、农业生产中合理利用菌肥提高果实产量和品质提供理论依据，并对进一步加强菌肥通过减施化肥实现果实增产提质的创新应用进行展望，以推动新形势下农业的可持续发展。

可以预见，随着科技的发展、科研理论的创新，微生物菌肥将以更高效、更稳定、更个性化的崭新面貌发挥作用，并被广大农民接纳，大规模应用于生产实践，造福现代农业和

生态环境。未来,在微生物菌肥的理论研究和应用技术已基本成熟的基础上,或将通过基因编辑等生物技术作用于研究对象,直接复刻菌肥的功能,并且更加稳定、持久地发挥功效,最大限度地实现植物种植减肥增效,助力农业绿色发展。

## REFERENCES

- [1] MENG JX, ZHANG XY, HAN XS, FAN B. Application and development of biocontrol agents in China[J]. *Pathogens*, 2022, 11(10): 1120.
- [2] 农业农村部. 农业农村部关于印发《到 2025 年化肥减量行动方案》和《到 2025 年化学农药减量行动方案》的通知[J]. 中华人民共和国农业农村部公报, 2022(12): 11-19.  
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Circular of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs on printing and distributing the Action Plan for Chemical Fertilizer Use Reduction by 2025 and the Action Plan for Chemical Pesticides Use Reduction by 2025[J]. *Gazette of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China*, 2022(12): 11-19 (in Chinese).
- [3] 何燕燕. 微生物菌肥在农业生产中的价值和应[J]. *工业微生物*, 2023, 53(2): 8-10.  
HE YY. Research on the value and application of microbial fertilizer in agricultural production[J]. *Industrial Microbiology*, 2023, 53(2): 8-10 (in Chinese).
- [4] 戴美松, 王月志, 蔡丹英, 施泽彬, 孙钧. 我国微生物菌肥登记现状及其在果树减肥增效中的应用[J]. *浙江农业科学*, 2021, 62(2): 241-246.  
DAI MS, WANG YZ, CAI DY, SHI ZB, SUN J. Registration status of microbial fertilizer and its application in fertilizer reduction with efficiency increase on fruit tree in China[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2021, 62(2): 241-246 (in Chinese).
- [5] 仝倩倩, 祝英, 崔得领, 赵毅, 陈玉坤, 王治业, 熊友才. 我国微生物肥料发展现状及在蔬菜生产中的应用[J]. *中国土壤与肥料*, 2022(4): 259-266.  
TONG QQ, ZHU Y, CUI DL, ZHAO Y, CHEN YK, WANG ZY, XIONG YC. The development status of microbial fertilizer in China and its application in vegetable planting[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(4): 259-266 (in Chinese).
- [6] 李涛, 张朝辉, 郭雅雯, 田香, 许晓莹, 邱立友. 国内外微生物肥料研究进展及展望[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(10): 37-41.  
LI T, ZHANG ZH, GUO YW, TIAN X, XU XW, QIU LY. Research progress and prospect of microbial fertilizer at domestic and abroad[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(10): 37-41 (in Chinese).
- [7] 张旭奇, 刘文钰. 生物菌肥作用机制研究进展[J]. *现代农业科技*, 2023(23): 163-165, 169.  
ZHANG XQ, LIU WY. Research progress on the mechanism of biological bacterial fertilizer[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2023(23): 163-165, 169 (in Chinese).
- [8] 李辉, 杨海霞, 孙焱, 王彬娜, 郝羽, 柴静, 王金凤. 中国农用微生物菌肥登记情况及在草莓中的应用进展[J]. *农业工程技术*, 2022, 42(19): 90-94.  
LI H, YANG HX, SUN Y, WANG BN, HAO Y, CHAI J, WANG JF. Registration of agricultural microbial fertilizer in China and its application progress in strawberries[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2022, 42(19): 90-94 (in Chinese).
- [9] 刘云峰, 杨宁, 温丹, 王晓, 孙凯宁, 王克安, 于占东. 微生物菌肥在果树上的应用研究[J]. *安徽农业科学*, 2022, 50(7): 11-15.  
LIU YF, YANG N, WEN D, WANG X, SUN KN, WANG KA. Research progress on application of microbial fertilizers to horticultural crops[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2022, 50(7): 11-15 (in Chinese).
- [10] 李钦, 王引权, 彭桐, 荔淑楠, 姚阳阳. 微生物菌肥的研究进展及其在中药材生产中的应用[J]. *农业与技术*, 2020, 40(19): 1-4.  
LI Q, WANG YQ, PENG T, LI SN, YAO YY. Research progress of microbial bacterial fertilizer and its application in Chinese herbal medicine production[J]. *Agriculture and Technology*, 2020, 40(19): 1-4 (in Chinese).
- [11] LIU ZZ, AWASTHI MK, ZHAO JF, LIU G, SYED A, AL-SHWAIMAN HA, FANG J. Unraveling impacts of inoculating novel microbial agents on nitrogen conversion during cattle manure composting: core microorganisms and functional genes[J]. *Bioresource Technology*, 2023, 390: 129887.
- [12] LIU LY, LIU S, ZHU SR, ZHOU XY, MA YS, PAN NG, LI D, LI Y, LI CT. Effects of different concentrations of biological maturity agents on



- nitrogen and microbial diversity of *Auricularia heimuer* residue compost[J]. *Bioresource Technology*, 2023, 388: 129641.
- [13] TANG Y, CHE YJ, BAI XY, WANG ZY, GU SY. Effects of application of phosphate and phosphate-solubilizing bacteria on bacterial diversity and phosphorus fractions in a Phaeozems[J]. *Heliyon*, 2023, 9(12): e22937.
- [14] DAS PP, SINGH KR, NAGPURE G, MANSOORI A, SINGH RP, AHMAD GHAZI I, KUMAR A, SINGH J. Plant-soil-microbes: a tripartite interaction for nutrient acquisition and better plant growth for sustainable agricultural practices[J]. *Environmental Research*, 2022, 214(Pt 1): 113821.
- [15] 王晓艳. 不同菌肥对油茶叶内源激素及氮磷钾含量和林下土壤理化性质的影响[J]. *江苏林业科技*, 2021, 48(5): 28-32, 38.
- WANG XY. Effects of different bacterial fertilizers on soil properties, leaf endogenous hormones and N, P, K contents in *Camellia oleifera* Abel[J]. *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology*, 2021, 48(5): 28-32, 38 (in Chinese).
- [16] 袁雅文. 有益微生物作用机理及微生物菌肥的应用前景[J]. *杂交水稻*, 2022, 37(4): 7-14.
- YUAN YW. Action mechanism of beneficial microorganisms and application prospect of microbial fertilizers[J]. *Hybrid Rice*, 2022, 37(4): 7-14 (in Chinese).
- [17] RASHEEDA SM, MARY SONALI J, KUMAR PS, RANGASAMY G, GAYATHRI KV, PARTHASARATHY V. *Rhizobium mayense* sp. nov., an efficient plant growth-promoting nitrogen-fixing bacteria isolated from rhizosphere soil[J]. *Environmental Research*, 2023, 220: 115200.
- [18] 徐云龙, 周游, 汪军, 郭立佳, 黄俊生, 杨腊英. 一株自生固氮菌的分离鉴定及其对不同品种香蕉的促生特性[J]. *热带作物学报*, 2024, 45(5): 936-943.
- XU YL, ZHOU Y, WANG J, GUO LJ, HUANG JS, YANG LY. Isolation and identification of a nitrogen fixing bacteria and its growth promoting characteristics on different banana varieties[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2024, 45(5): 936-943 (in Chinese).
- [19] SHEN SL, LI YH, CHEN MB, HUANG J, LIU F, XIE SJ, KONG LP, PAN Y. Reduced cadmium toxicity in rapeseed *via* alteration of root properties and accelerated plant growth by a nitrogen-fixing bacterium[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 449: 131040.
- [20] CHENG YY, NARAYANAN M, SHI XJ, CHEN XP, LI ZL, MA Y. Phosphate-solubilizing bacteria: their agroecological function and optimistic application for enhancing agro-productivity[J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 901: 166468.
- [21] 温佳旭, 陈雪丽, 肖洋, 万书明, 孙磊, 方海瑞. 土壤中主要溶磷菌种类及其作用机制[J]. *北方园艺*, 2023(14): 139-145.
- WEN JX, CHEN XL, XIAO Y, WAN SM, SUN L, FANG HR. Major phosphorus-dissolving bacteria species in soils and mechanisms of action[J]. *Northern Horticulture*, 2023(14): 139-145 (in Chinese).
- [22] SARIKHANI MR, KHOSHRU B, GREINER R. Isolation and identification of temperature tolerant phosphate solubilizing bacteria as a potential microbial fertilizer[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2019, 35(8): 126.
- [23] KOCZORSKI P, FURTADO BU, BAUM C, WEIH M, INGVARSSON P, HULISZ P, HRYNKIEWICZ K. Large effect of phosphate-solubilizing bacteria on the growth and gene expression of *Salix* spp. at low phosphorus levels[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1218617.
- [24] 刘岱松, 王义伟, 蔡柯, 张晓亮, 张自豪, 马俊锋, 苗春雨, 刘猛, 徐传强, 郑玉欣, 胡佳丽, 曹媛媛. 根际解钾菌的筛选及其对烟草钾素吸收的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2023, 50(4): 557-562.
- LIU DS, WANG YW, CAI K, ZHANG XL, ZHANG ZH, MA JF, MIAO CY, LIU M, XU CQ, ZHENG YX, HU JL, CAO YY. Isolation of potassium-solubilizing rhizobacteria and the effects on potassium absorption of tobacco plants[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2023, 50(4): 557-562 (in Chinese).
- [25] 王乙富, 朱新开. 解钾菌对盐胁迫下小麦种子萌发和幼苗生长的促进作用及其机制分析[J]. *分子植物育种*, 2023, 21(17): 5761-5767.
- WANG YF, ZHU XK. Promotion of wheat seed germination and seedling growth under salt stress by KSB and analysis of its mechanism[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2023, 21(17): 5761-5767 (in Chinese).
- [26] MUTHURAJA R, MUTHUKUMAR T. Co-inoculation of halotolerant potassium solubilizing *Bacillus licheniformis* and *Aspergillus violaceofuscus* improves tomato growth and potassium uptake in different soil types under salinity[J]. *Chemosphere*, 2022, 294: 133718.
- [27] FENG JN, CHEN LL, XIA TY, RUAN YN, SUN XL, WU T, ZHONG Y, SHAO XD, TANG ZX. Microbial

- fertilizer regulates C:N:P stoichiometry and alleviates phosphorus limitation in flue-cured tobacco planting soil[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 10276.
- [28] PARK I, SEO YS, MANNAA M. Recruitment of the rhizo-microbiome army: assembly determinants and engineering of the rhizosphere microbiome as a key to unlocking plant potential[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1163832.
- [29] 赖锬阳, 肖建才, 王红阳, 邱金镇, 万修福, 闫滨滨, 康传志, 孙楷, 张燕, 郭兰萍. 微生物菌肥调控药用植物品质形成的作用机制及应用与展望[J]. *中国中药杂志*, 2024, 49(4): 912-923.
- LAI KY, XIAO JC, WANG HY, QIU JZ, WAN XF, YAN BB, KANG CZ, SUN K, ZHANG Y, GUO LP. Mechanism and application prospects of microbial fertilizers in regulating quality formation of medicinal plants[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2024, 49(4): 912-923 (in Chinese).
- [30] PU RF, WANG PP, GUO LP, LI MH, CUI XM, WANG CX, LIU Y, YANG Y. The remediation effects of microbial organic fertilizer on soil microorganisms after chloropicrin fumigation[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 231: 113188.
- [31] AFANADOR-BARAJAS LN, NAVARRO-NOYA YE, LUNA-GUIDO ML, DENDOOVEN L. Impact of a bacterial consortium on the soil bacterial community structure and maize (*Zea mays* L.) cultivation[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 13092.
- [32] ZHAO YG, LU GX, JIN X, WANG YC, MA K, ZHANG HJ, YAN HL, ZHOU XL. Effects of microbial fertilizer on soil fertility and alfalfa rhizosphere microbiota in alpine grassland[J]. *Agronomy*, 2022, 12(7): 1722.
- [33] 岳宏忠, 张东琴, 侯栋, 李亚莉, 姚拓, 黄书超. 微生物菌肥部分替代化肥对设施黄瓜产量和土壤细菌群落结构的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(7): 118-126, 137.
- YUE HZ, ZHANG DQ, HOU D, LI YL, YAO T, HUANG SC. Effects of partial substitution of chemical fertilizer by microbial fertilizer on yield of cucumber and soil bacterial community structure in greenhouse[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2022, 50(7): 118-126, 137 (in Chinese).
- [34] 肖娴, 桂一峰, 朱艳, 符菁, 朱雪松, 朱显, 赵远. 微生物菌肥对水稻土壤细菌群落结构与活性的影响[J]. *西南农业学报*, 2021, 34(10): 2174-2181.
- XIAO X, GUI YF, ZHU Y, FU J, ZHU XS, ZHU X, ZHAO Y. Effects of microbial inoculations on structure and activity of paddy soil bacterial community[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 34(10): 2174-2181 (in Chinese).
- [35] LI XQ, LI DY, JIANG YG, XU J, REN XX, ZHANG Y, WANG H, LU QJ, YAN JL, AHMED T, LI B, GUO K. The effects of microbial fertilizer based *Aspergillus brunneoviolaceus* HZ23 on pakchoi growth, soil properties, rhizosphere bacterial community structure, and metabolites in newly reclaimed land[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1091380.
- [36] 孟庆英, 杨晓贺, 姚亮亮, 张茂明, 邱磊, 王自杰, 丁俊杰, 朱宝国. 秸秆与微生物菌肥配施对盐碱稻田土壤团聚体及真菌群落多样性的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2022(8): 25-30.
- MENG QY, YANG XH, YAO LL, ZHANG MM, QIU L, WANG ZJ, DING JJ, ZHU BG. Effects of combined application of straw and microbial fertilizer on soil aggregates and fungal community diversity of rice field saline alkali soil[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2022(8): 25-30 (in Chinese).
- [37] FU CY, MA WR, QIANG BB, JIN XJ, ZHANG YX, WANG MX. Effect of chemical fertilizer with compound microbial fertilizer on soil physical properties and soybean yield[J]. *Agronomy*, 2023, 13(10): 2488.
- [38] PENG YY, ZHANG H, LIAN JS, ZHANG W, LI GH, ZHANG JF. Combined application of organic fertilizer with microbial inoculum improved aggregate formation and salt leaching in a secondary salinized soil[J]. *Plants*, 2023, 12(16): 2945.
- [39] RILLIG MC, MULLER LAH, LEHMANN A. Soil aggregates as massively concurrent evolutionary incubators[J]. *The ISME Journal*, 2017, 11(9): 1943-1948.
- [40] NAYAK M. Microbial fertilizer effect in soil enhancement[J]. *Journal of Microbial & Biochemical Technology*, 2021, 13(4): 1.
- [41] ZHOU N, MU MJ, YANG M, ZHOU Y, MA MG. The effect of microbial fertilizer on the growth, rhizospheric environment and medicinal quality of *Fritillaria taipaiensis*[J]. *Horticulturae*, 2021, 7(11): 500.
- [42] 冯世鑫, 蒋妮, 陈乾平, 蒋水元, 唐辉. 微生物菌肥对罗汉果根结线虫和土壤酶活性的影响[J]. *热带农业科学*, 2021, 41(4): 73-78.
- FENG SX, JIANG N, CHEN QP, JIANG SY, TANG H. Effects of compound microbial fertilizer on root-knot nematode disease of *Siraitia grosvenorii* and soil enzyme activity[J]. *Chinese Journal of Tropical*

- Agriculture, 2021, 41(4): 73-78 (in Chinese).
- [43] ZHANG LQ, HU J, LI C, CHEN YY, ZHENG LG, DING D, SHAN SF. Synergistic mechanism of iron manganese supported biochar for arsenic remediation and enzyme activity in contaminated soil[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 347: 119127.
- [44] 程鸿燕, 张大琪, 黄斌, 任立瑞, 郝宝强, 靳茜, 颜冬冬, 王秋霞, 曹堃程. 微生物菌肥对熏蒸剂处理后土壤微生态的影响研究进展[J]. 农药学报, 2020, 22(5): 734-741.
- CHENG HY, ZHANG DQ, HUANG B, REN LR, HAO BQ, JIN X, YAN DD, WANG QX, CAO AC. Research progress on the effect of microbial fertilizers on soil microecology after soil fumigation[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2020, 22(5): 734-741 (in Chinese).
- [45] 庞勋, 梁冉, 刘继国, 张翰林, 郭瑞阳, 耿亚菲, 刘兆东, 耿立清, 王艳芹. 生物有机肥对农田土壤特性、作物产量与品质影响的研究进展[J]. 土壤科学, 2023, 11(2): 100-106.
- PANG X, LIANG R, LIU JG, ZHANG HL, GUO RY, GENG YF, LIU ZD, GENG LQ, WANG YQ. Research progress on effects of bio-organic fertilizer on soil characteristics of farmland, crop yield and quality[J]. Hans Journal of Soil Science, 2023, 11(2): 100-106 (in Chinese).
- [46] GARCIA-LEMONS AM, GROßKINSKY DK, STOKHOLM MS, LUND OS, NICOLAISEN MH, ROITSCH TG, VEIERSKOV B, NYBROE O. Root-associated microbial communities of *Abies nordmanniana*: insights into interactions of microbial communities with antioxidative enzymes and plant growth[J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 1937.
- [47] MAKARE BT, AREMU AO, GRUZ J, MAGADLELA A. Phenolic acids and plant antioxidant capacity enhance growth, nutrition, and plant-microbe interaction of *Vigna unguiculata* L. (walp) grown in acidic and nutrient-deficient grassland and savanna soils[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2023, 23(1): 190-203.
- [48] FIRA D, DIMKIĆ I, BERIĆ T, LOZO J, STANKOVIĆ S. Biological control of plant pathogens by *Bacillus* species[J]. Journal of Biotechnology, 2018, 285: 44-55.
- [49] CHOE SG, MAENG HR, PAK SJ, SONG NAM U. Production of *Bacillus thuringiensis* biopesticide using penicillin fermentation waste matter and application in agriculture[J]. Journal of Natural Pesticide Research, 2022, 2: 100012.
- [50] SUBEDI A, MINSAVAGE GV, JONES JB, GOSS EM, ROBERTS PD. Exploring diversity of bacterial spot associated *Xanthomonas* population of pepper in southwest Florida[J]. Plant Disease, 2023, 107(10): 2978-2985.
- [51] FATIMA R, MAHMOOD T, MOOSA A, ASLAM MN, SHAKEEL MT, MAQSOOD A, SHAFIQ MU, AHMAD T, MOUSTAFA M, AL-SHEHRI M. *Bacillus thuringiensis* CHGP12 uses a multifaceted approach for the suppression of *Fusarium oxysporum* f. sp. *ciceris* and to enhance the biomass of chickpea plants[J]. Pest Management Science, 2023, 79(1): 336-348.
- [52] 郝大志, 王咏坤, 陈捷, 辛舟生, 高永东. 海藻渣复配微生物菌剂防治黄瓜苗期枯萎病的协同增效作用[J]. 中国生物防治学报, 2022, 38(1): 97-107.
- HAO DZ, WANG YK, CHEN J, XIN ZS, GAO YD. Synergistic effect of seaweed residue combined with microbial inoculum on cucumber *Fusarium* wilt control[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2022, 38(1): 97-107 (in Chinese).
- [53] SHARMA G, MATHUR V. Modulation of insect-induced oxidative stress responses by microbial fertilizers in *Brassica juncea*[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2020, 96(4): f1aa040.
- [54] SHI WC, LI MC, WEI GS, TIAN RM, LI CP, WANG B, LIN RS, SHI CY, CHI XL, ZHOU B, GAO Z. The occurrence of potato common scab correlates with the community composition and function of the geocaulosphere soil microbiome[J]. Microbiome, 2019, 7(1): 14.
- [55] SHI WC, SU GY, LI MC, WANG B, LIN RS, YANG YT, WEI T, ZHOU B, GAO Z. Distribution of bacterial endophytes in non-lesion tissues of potato and their response to potato common cab[J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 616013.
- [56] NIU SQ, GAO Y, ZI HX, LIU Y, LIU XM, XIONG XQ, YAO QQ, QIN ZW, CHEN N, GUO L, YANG YZ, QIN P, LIN JZ, ZHU YH. The osmolyte-producing endophyte *Streptomyces albidoflavus* OsiLf-2 induces drought and salt tolerance in rice via a multi-level mechanism[J]. The Crop Journal, 2022, 10(2): 375-386.
- [57] ZHAO HG, ZHAO J, LI LJ, YIN CY, CHEN Q, NIE XX, PANG JH, WANG LX, LI EZ. Effect of nitrogen application and microbial fertilizer on nitrogen conversion processes in saline farmland[J]. Water, 2023, 15(15): 2748.
- [58] LI Y, FANG F, WEI JL, WU XB, CUI RZ, LI GS, ZHENG FL, TAN DS. Humic acid fertilizer improved

- soil properties and soil microbial diversity of continuous cropping peanut: a three-year experiment[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 12014.
- [59] 王启尧, 赵庚星, 赵永昶, 杨婧文, 张术伟, 李涛, 李建伟, 潘登, 涂强. 滨海盐渍棉田施用微生物菌肥的降盐效果及棉花长势响应[J]. *华北农学报*, 2021, 36(S1): 267-274.
- WANG QY, ZHAO GX, ZHAO YC, YANG JW, ZHANG SW, LI T, LI JW, PAN D, TU Q. Effect of microbial bacterial fertilizer on reducing salt and cotton growth in coastal saline cotton field[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2021, 36(S1): 267-274 (in Chinese).
- [60] 刘月, 杨树青, 张万锋, 娄帅. 微咸水灌溉下微生物菌肥对盐渍土理化性质和细菌群落的影响[J]. *环境科学*, 2023, 44(8): 4585-4598.
- LIU Y, YANG SQ, ZHANG WF, LOU S. Effects of microbial fertilizer on physicochemical properties and bacterial communities of saline soil under brackish water irrigation[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(8): 4585-4598 (in Chinese).
- [61] LIU HW, BRETTELL LE, QIU ZG, SINGH BK. Microbiome-mediated stress resistance in plants[J]. *Trends in Plant Science*, 2020, 25(8): 733-743.
- [62] LIU J, LI H, YUAN ZY, FENG JJ, CHEN SH, SUN GZ, WEI ZH, HU TT. Effects of microbial fertilizer and irrigation amount on growth, physiology and water use efficiency of tomato in greenhouse[J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 323: 112553.
- [63] MISRA S, CHAUHAN PS. ACC deaminase-producing rhizosphere competent *Bacillus* spp. mitigate salt stress and promote *Zea mays* growth by modulating ethylene metabolism[J]. *3 Biotech*, 2020, 10(3): 119.
- [64] WEI GS, LI MC, SHI WC, TIAN RM, CHANG CY, WANG ZR, WANG NX, ZHAO GX, GAO Z. Similar drivers but different effects lead to distinct ecological patterns of soil bacterial and archaeal communities[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2020, 144: 107759.
- [65] KAUR J, PANDOVE G. Understanding the beneficial interaction of plant growth promoting rhizobacteria and endophytic bacteria for sustainable agriculture: a bio-revolution approach[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2023, 46(14): 3569-3597.
- [66] VERMA P, CHANDRA P, RAI AK, KUMAR A, PRAJAPAT K, SUNDHA P, BASAK N, MANN A, SAHARAN BS, BEDWAL S, YADAV RK. Native rhizobacteria suppresses spot blotch disease, improves growth and yield of wheat under salt-affected soils[J]. *Plant Stress*, 2023, 10: 100234.
- [67] DAVE K, GOTHALWAL R, SINGH M, JOSHI N. Facets of rhizospheric microflora in biocontrol of phytopathogen *Macrophomina phaseolina* in oil crop soybean[J]. *Archives of Microbiology*, 2021, 203(2): 405-412.
- [68] 何建清, 张格杰. 植物根际促生菌肥代替部分化肥对黑青稞生长、产量和品质的影响[J]. *河南农业科学*, 2022, 51(7): 93-101.
- HE JQ, ZHANG GJ. Effects of plant growth promoting rhizobacteria(PGPR) fertilizer instead of part of chemical fertilizer on growth, yield and quality of black highland barley[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2022, 51(7): 93-101 (in Chinese).
- [69] NONG Q, MALVIYA MK, SOLANKI MK, LIN L, XIE JL, MO ZH, WANG ZP, SONG XP, HUANG X, LI CN, LI YR. Integrated metabolomic and transcriptomic study unveils the gene regulatory mechanisms of sugarcane growth promotion during interaction with an endophytic nitrogen-fixing bacteria[J]. *BMC Plant Biology*, 2023, 23(1): 54.
- [70] PAVLICEVIC M, ELMER W, ZUVERZA-MENA N, ABDELRAHEEM W, PATEL R, DIMKPA C, O'KEEFE T, HAYNES CL, PAGANO L, CALDARA M, MARMIROLI M, MAESTRI E, MARMIROLI N, WHITE JC. Nanoparticles and biochar with adsorbed plant growth-promoting rhizobacteria alleviate *Fusarium* wilt damage on tomato and watermelon[J]. *Plant Physiology and Biochemistry: PPB*, 2023, 203: 108052.
- [71] HAN JJ, SHEN XA, YANG F, WANG F, QIN CY, ZOU DY, HU QY, LIN JX, WANG JH. Research progress on the mechanism of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) mediated mineral elements uptake by plants[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(6): 1609.
- [72] NOPPHAKAT K, RUNSAENG P, KLINNAWEE L. *Acaulospora* as the dominant arbuscular mycorrhizal fungi in organic lowland rice paddies improves phosphorus availability in soils[J]. *Sustainability*, 2021, 14(1): 31.
- [73] SATO T, HACHIYA S, INAMURA N, EZAWA T, CHENG WG, TAWARAYA K. Secretion of acid phosphatase from extraradical hyphae of the arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus clarus* is regulated in response to phosphate availability[J]. *Mycorrhiza*, 2019, 29(6): 599-605.
- [74] SHETEIWY MS, EL-SAWAH AM, KOBAE Y, BASIT F, HOLFORD P, YANG HS, EL-KEBLAWY A,

- ABDEL-FATTAH GG, WANG SC, ARAUS JL, KORANY SM, ALSHERIF EA, AbdELGAWAD H. The effects of microbial fertilizers application on growth, yield and some biochemical changes in the leaves and seeds of guar (*Cyamopsis tetragonoloba* L.)[J]. Food Research International, 2023, 172: 113122.
- [75] 卢德, 李韬, 林强, 邱长玉, 罗坚, 石华月, 赖艳梅, 李乙, 曾燕蓉. 微生物菌肥对果桑初果期的叶片光合性能和果实品质的影响分析[J]. 广西蚕业, 2022, 59(3): 12-17.
- LU D, LI T, LIN Q, QIU CY, LUO J, SHI HY, LAI YM, LI Y, ZENG YR. Effect of microbial bacterial fertilizer on photosynthetic performance of leaves and fruit quality of mulberry at early fruit stage[J]. Guangxi Sericulture, 2022, 59(3): 12-17 (in Chinese).
- [76] 玄志友. HPS 微生物菌肥提升阿克苏冰糖心苹果品质及产量[J]. 中国果业信息, 2022, 39(9): 62.
- XUAN ZY. HPS microbial fertilizer improves the quality and yield of Aksu rock candy apple[J]. China Fruit News, 2022, 39(9): 62 (in Chinese).
- [77] 刘政典, 任珂, 卢瑜璐, 孙鹏程, 封明军, 郭彩萍, 江峰, 王新建. HPS 微生物菌肥对阿克苏冰糖心苹果品质及产量的影响[J]. 现代园艺, 2022, 45(9): 14-16, 20.
- LIU ZD, REN K, LU YJ, SUN PC, FENG MJ, GUO CP, JIANG F, WANG XJ. Effect of HPS microbial fertilizer on the quality and yield of Aksu rock candy apple[J]. Contemporary Horticulture, 2022, 45(9): 14-16, 20 (in Chinese).
- [78] 王爱玲, 段国琪, 田时敏, 梁哲军, 张建诚. 减氮配施微生物菌肥对“富士”苹果品质和光合特性的影响[J]. 北方园艺, 2022(18): 16-22.
- WANG AL, DUAN GQ, TIAN SM, LIANG ZJ, ZHANG JC. Effects of combined application of microbial fertilizer on quality and photosynthetic characteristics of ‘fuji’ apple[J]. Northern Horticulture, 2022(18): 16-22 (in Chinese).
- [79] 周进. 微生物菌肥配施对葡萄土壤养分和品质的影响[J]. 北方园艺, 2020(24): 51-56.
- ZHOU J. Effects of microbial bacterial manure combined with reduced fertilizer on soil nutrients and quality of grapes in greenhouse[J]. Northern Horticulture, 2020(24): 51-56 (in Chinese).
- [80] 石慧敏, 陆蓝翔, 王焱, 贺丽娜, 王小月, 叶建仁. 五种促生微生物菌肥对巨峰葡萄生长和果实品质的影响[J]. 分子植物育种, 2023. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220916.1222.040.html>.
- SHI HM, LU LX, WANG Y, HE LN, WANG XY, YE JR. Effects of five growth-promoting microbial fertilizers on growth and fruit quality of Jufeng grape[J]. Molecular Plant Breeding, 2023. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220916.1222.040.html> (in Chinese).
- [81] DEMIR H, YALÇI HK, KATGICI A. Ameliorative effects of microbial fertiliser on yield and quality parameters of curly lettuce and cucumber with fertiliser saving[J]. Folia Horticulturae, 2023, 35(1): 91-106.
- [82] MI S, ZHANG XN, WANG YH, MA YD, SANG YX, WANG XH. Effect of different fertilizers on the physicochemical properties, chemical element and volatile composition of cucumbers[J]. Food Chemistry, 2022, 367: 130667.
- [83] 赵怡红, 杨玉萍, 令娟丽, 刘永超. 微生物菌肥在草莓生产上应用试验[J]. 基层农技推广, 2020, 8(6): 27-29.
- ZHAO YH, YANG YP, LING JL, LIU YC. Application of microbial bacterial fertilize in strawberry production[J]. Primary Agricultural Technology Extension, 2020, 8(6): 27-29 (in Chinese).
- [84] 穆凯代斯罕·伊萨克. HPS 微生物菌肥对库尔勒香梨园土壤、叶片和果实品质的影响研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学硕士学位论文, 2022.
- Mukaidaisiyisake. Effects of HPS microbial fertilizer on soil, leaf and fruit quality in Korla fragrant pear orchard[D]. Alaer: Master’s Thesis of Tarim University, 2022 (in Chinese).
- [85] 谢昶琰, 王迪, 安祥瑞, 吴中营, 王东升, 魏树伟, 王少敏, 董园园, 徐阳春, 董彩霞. 滴灌减量施肥对梨树体养分及果实产量、品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(6): 1526-1533.
- XIE CY, WANG D, AN XR, WU ZY, WANG DS, WEI SW, WANG SM, DONG YY, XU YC, DONG CX. Effects of drip irrigation and reducing fertilization on tree nutrient, fruit yield and quality of pear[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2021, 37(6): 1526-1533 (in Chinese).
- [86] STAMFORD NP, FELIX F, OLIVEIRA W, SILVA E, CAROLINA S, ARNAUD T, FREITAS AD. Interactive effectiveness of microbial fertilizer enriched in N on lettuce growth and on characteristics of an Ultisol of the rainforest region[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 247: 242-246.
- [87] WANG QY, ZHAO MR, WANG JQ, HU BY, CHEN QJ, QIN Y, ZHANG GQ. Effects of microbial inoculants on agronomic characters, physicochemical properties and nutritional qualities of lettuce and celery in hydroponic cultivation[J]. Scientia Horticulturae, 2023, 320: 112202.

- [88] 任瑞敏, 张传伟, 曹鑫, 李响, 姜俊海, 陈姗姗. 微生物菌肥对大叶芹生长发育及产量品质的影响[J/OL]. 吉林农业大学学报, 2023. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/22.1100.s.20230714.1855.003.html>.  
REN RM, ZHANG CW, CAO X, LI X, JIANG JT, CHEN SS. The effect of microbial fertilizer on the growth, yield and quality of *Spuriopinella brachycarpa* (Kom.) Kitag[J/OL]. Journal of Jilin Agricultural University, 2023. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/22.1100.s.20230714.1855.003.html> (in Chinese).
- [89] 王夫同. 微生物菌肥在设施番茄种植中的应用效果研究[J]. 农业工程技术, 2023, 43(4): 37-38.  
WANG FT. Study on the application effect of microbial bacterial fertilizer in greenhouse tomato planting[J]. Agricultural Engineering Technology, 2023, 43(4): 37-38 (in Chinese).
- [90] 武杞蔓, 刘朋宇, 张颖, 李玥莹. 微生物菌肥对番茄生长、品质及糖代谢相关酶的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(24): 125-130.  
WU QM, LIU PY, ZHANG Y, LI YY. Influences of microbial agents on tomato growth, quality and enzymes related to sugar metabolism[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(24): 125-130 (in Chinese).
- [91] 张学刚, 王连林, 龙素霞, 湛毅强, 张丽英, 陈铁成. 功能性微生物菌肥对小麦生物学性状、营养品质的影响研究[J]. 肥料与健康, 2023, 50(4): 48-55.  
ZHANG XG, WANG LL, LONG SX, ZHAN YQ, ZHANG LY, CHEN TC. Study on the effect of functional microbial fertilizer on biological characteristics and nutritional quality of wheat[J]. Fertilizer & Health, 2023, 50(4): 48-55 (in Chinese).
- [92] 徐淑英. 新型肥料对水稻福香占产量及米质的影响[J]. 中国稻米, 2023, 29(3): 109-111, 114.  
XU SY. Effects of new fertilizations on yield and grain quality of rice variety Fuxiangzhan[J]. China Rice, 2023, 29(3): 109-111, 114 (in Chinese).
- [93] 曹秋艳, 李海渤, 冯慧敏, 付龙威, 刘堂茂, 王斌. 施用微生物菌肥对无花果鲜食品质和贮藏特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(3): 807-813.  
CAO QY, LI HB, FENG HM, FU LW, LIU TM, WANG B. Effect of applying microbial fertilizer on fresh-eating quality and storage characteristics of figs[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2023, 39(3): 807-813 (in Chinese).
- [94] PYLAK M, OSZUST K, FRĄC M. Review report on the role of bioproducts, biopreparations, biostimulants and microbial inoculants in organic production of fruit[J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2019, 18(3): 597-616.
- [95] 张鸿雁, 林国莉, 李如莲, 纪晓琦. 番茄果腐病拮抗菌的筛选及对番茄的防腐保鲜作用[J]. 生物技术通报, 2022, 38(3): 69-78.  
ZHANG HY, LIN GL, LI RL, JI XQ. Screening of antagonist against tomato fruit rot and their preservation qualities on tomato[J]. Biotechnology Bulletin, 2022, 38(3): 69-78 (in Chinese).
- [96] LIU X, GAO Y, YANG HY, LI LM, JIANG YS, LI Y, ZHENG JX. *Pichia kudriavzevii* retards fungal decay by influencing the fungal community succession during cherry tomato fruit storage[J]. Food Microbiology, 2020, 88: 103404.
- [97] SHI Y, YANG QY, ZHAO QH, DHANASEKARAN S, AHIMA J, ZHANG XY, ZHOU SQ, DROBY S, ZHANG HY. *Aureobasidium pullulans* S-2 reduced the disease incidence of tomato by influencing the postharvest microbiome during storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 185: 111809.
- [98] 孙文财. 微生物菌肥在农业生产中应用的必要性[J]. 农业开发与装备, 2021(4): 224-225.  
SUN WC. Necessity of application of microbial bacterial fertilizer in agricultural production[J]. Agricultural Development & Equipments, 2021(4): 224-225 (in Chinese).
- [99] 徐国祗, 李频道. 花生减肥增效试验报告[J]. 现代农业, 2020(5): 44-45.  
XU GZ, LI PD. Experimental report on reducing weight and increasing efficiency of peanut[J]. Modern Agriculture, 2020(5): 44-45 (in Chinese).
- [100] LIU JA, SHU AP, SONG WF, SHI WC, LI MC, ZHANG WX, LI ZZ, LIU GR, YUAN FS, ZHANG SX, LIU ZB, GAO Z. Long-term organic fertilizer substitution increases rice yield by improving soil properties and regulating soil bacteria[J]. Geoderma, 2021, 404: 115287.
- [101] SONG WF, SHU AP, LIU JA, SHI WC, LI MC, ZHANG WX, LI ZZ, LIU GR, YUAN FS, ZHANG SX, LIU ZB, GAO Z. Effects of long-term fertilization with different substitution ratios of organic fertilizer on paddy soil[J]. Pedosphere, 2022, 32(4): 637-648.
- [102] 陈文东, 黄平, 王开金, 聂秀竹, 洪明勇, 张孝秀, 王永刚. 复合微生物菌剂在昭通苹果化肥减量增效中的应用效果初探[J]. 耕作与栽培, 2023, 43(4): 57-60.  
CHEN WD, HUANG P, WANG KJ, NIE XZ, HONG MY, ZHANG XX, WANG YG. Preliminary study on the application effect of compound microbial agents in

- the reduction and increase of apple fertilizer in Zhaotong[J]. *Tillage and Cultivation*, 2023, 43(4): 57-60 (in Chinese).
- [103] GONG HR, LI J, SUN MX, XU XB, OUYANG Z. Lowering carbon footprint of wheat-maize cropping system in North China Plain: through microbial fertilizer application with adaptive tillage[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 268: 122255.
- [104] WANG N, WANG XX, CHEN L, LIU HJ, WU YF, HUANG M, FANG LC. Biological roles of soil microbial consortium on promoting safe crop production in heavy metal(loid) contaminated soil: a systematic review[J]. *The Science of the Total Environment*, 2024, 912: 168994.
- [105] REN ZM, CHENG R, CHEN P, XUE YY, XU H, YIN Y, HUANG GT, ZHANG W, ZHANG LH. Plant-associated microbe system in treatment of heavy metals-contaminated soil: mechanisms and applications[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2023, 234(1): 39.
- [106] WANG X, HU K, XU Q, LU LF, LIAO SJ, WANG GJ. Immobilization of Cd using mixed *Enterobacter* and *Comamonas* bacterial reagents in pot experiments with *Brassica rapa* L.[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(24): 15731-15741.
- [107] SHI KX, RADHAKRISHNAN M, DAI XL, ROSEN BP, WANG GJ. NemA catalyzes trivalent organoarsenical oxidation and is regulated by the trivalent organoarsenical-selective transcriptional repressor NemR[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(9): 6485-6494.
- [108] 吴多基, 林小兵, 胡祖武, 魏宗强, 吴建富. 炭基微生物菌剂对红壤性水稻土-水稻系统中 Cd 行为的影响[J]. *核农学报*, 2023, 37(10): 2079-2087.
- WU DJ, LIN XB, HU ZW, WEI ZQ, WU JF. Effects of biochar-based microbial agent on the behavior of Cd in red paddy soil-rice system[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2023, 37(10): 2079-2087 (in Chinese).
- [109] 何明皇, 习文祥, 王丹, 潘红忠, 祝贤彬, 刘紫薇. 微生物菌肥对养殖底泥中重金属含量和微生物群落结构及功能的影响[J]. *安全与环境工程*, 2023, 30(3): 234-243.
- HE MH, XI WX, WANG D, PAN HZ, ZHU XB, LIU ZW. Effect of microbial fertilizer on heavy metal content, microbial community structure and function in aquacultural sediment[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2023, 30(3): 234-243 (in Chinese).
- [110] 霍乾伟, 李天元, 张闻, 宋繁永, 王加宁, 陈贯虹. 微生物修复石油污染土壤影响因素分析[J]. *现代化工*, 2022, 42(S2): 83-87, 93.
- HUO QW, LI TY, ZHANG W, SONG FY, WANG JN, CHEN GH. Analysis on influencing factors of microbial remediation of petroleum contaminated soil[J]. *Modern Chemical Industry*, 2022, 42(S2): 83-87, 93 (in Chinese).