

李 涛,张朝辉,郭雅雯,等. 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.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.10.008

国内外微生物肥料研究进展及展望

李 涛^{1,2}, 张朝辉³, 郭雅雯¹, 田 香¹, 许晓莞¹, 邱立友¹

(1. 河南农业大学农业部农业微生物酶工程重点实验室,河南郑州 450002; 2. 三门峡职业技术学院食品园林学院,河南三门峡 472000; 3. 河南科技学院生命科技学院,河南新乡 453000)

摘要:化肥施用在保障粮食作物高产过程中始终发挥着重要作用,但也带来严重的环境及土地污染问题,阻碍了粮食生产的可持续发展。因此,如何减少化肥用量,寻找环境友好型的化肥替代品是当前科学研究的重要课题。微生物肥料具有绿色健康无污染的特点,是化学肥料最优质的替代品,许多研究表明其能够有效改善土壤中氮、磷、钾等元素的利用率,可提升作物抗逆能力,提高农产品质量及产量,并显著抑制土壤中植物病原菌的毒害作用等。从微生物肥料国内外发展现状、作用机制、当前存在问题及发展前景几个方面来介绍当前微生物肥料的研究进展,并对其未来发展策略进行展望。一方面为微生物肥料在农业生产中的深入开发和应用提供了理论依据,另一方面为微生物肥料未来的研发指明了方向。

关键词:微生物肥料;固氮;溶磷;解钾;植物激素;抗逆性;抗病性;未来研究方向

中图分类号: S144 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)10-0037-05

我国以世界 7% 的耕地养活了占世界 19% 的人口,提高粮食产量是解决粮食问题的重中之重,施用化肥在保障粮食

作物高产过程中始终发挥着重要作用,因此我国主要农作物单位面积施肥量一直居于世界前列,多个地区化肥使用量严重超标^[1]。化肥滥施带来严重的氮磷钾比例失衡,土壤板结、盐碱化,营养成分降低,地下水污染等一系列问题^[2]。微生物菌肥作为一种新型作物肥料能够很好地解决这些问题,现阶段微生物肥料已在各个国家及地区得到广泛应用,并取得良好效果。为使人们更深入地了解微生物肥料的发展现状、作用机制、当前问题及未来发展前景,有必要对微生物肥料研究进展进行详细介绍,为其今后在农业生产中的深入开

收稿日期:2018-01-22

基金项目:河南省科技攻关项目(编号:162102110009)。

作者简介:李 涛(1983—),女,河南三门峡人,博士研究生,讲师,主要从事农业生物技术及酶工程研究。E-mail: litao83929@163.com。

通信作者:邱立友,博士,教授,博士生导师,主要从事微生物学及食用菌工程技术研究。E-mail: qliyou@henau.edu.cn。

Smc5/6 complex in replication through natural pausing sites and endogenous DNA damage tolerance[J]. Molecular Cell, 2015, 60(6):835-846.

[41] 靳全文. 裂殖酵母核仁蛋白 Dnt1 通过调控集缩素蛋白(Condensin)实现抑制姊妹染色体的错误分离[C]//中国细胞生物学学会全体会员代表大会暨第十二次学术大会论文集. 北京, 2011:146.

[42] Murray J M, Carr A M. Smc5/6: a link between DNA repair and unidirectional replication? [J]. Nature Reviews Molecular Cell Biology, 2008, 9(2):177-182.

[43] Jeppsson K, Carlborg K K, Nakato R, et al. The chromosomal association of the Smc5/6 complex depends on cohesion and predicts the level of sister chromatid entanglement[J]. PLoS Genetics, 2014, 10(10):e1004680.

[44] Palecek J J, Gruber S. Kite proteins: a superfamily of SMC/kleisin partners conserved across Bacteria, Archaea, and Eukaryotes [J]. Structure, 2015, 23(12):2183-2190.

[45] Andrews E A, Palecek J, Sergeant J, et al. Nse2, a component of the Smc5-6 complex, is a SUMO ligase required for the response to DNA damage[J]. Molecular and Cellular Biology, 2005, 25(1):185-196.

[46] de Piccoli G, Cortes - Ledesma F, Ira G, et al. Smc5 - Smc6 mediate

DNA double-strand-break repair by promoting sister-chromatid recombination[J]. Nature Cell Biology, 2006, 8(9):1032-1034.

[47] Zabradý K, Adamus M, Vondrova L, et al. Chromatin association of the SMC5/6 complex is dependent on binding of its NSE3 subunit to DNA[J]. Nucleic Acids Research, 2016, 44(3):1064-1079.

[48] Harvey S H, Sheedy D M, Cuddihy A R, et al. Coordination of DNA damage responses via the Smc5/Smc6 complex[J]. Molecular and Cellular Biology, 2004, 24(2):662-674.

[49] Ström L, Lindroos H B, Shirahige K, et al. Postreplicative recruitment of cohesin to double-strand breaks is required for DNA repair[J]. Molecular Cell, 2004, 16(6):1003-1015.

[50] Ünal E, Arbel - Eden A, Sattler U, et al. DNA damage response pathway uses histone modification to assemble a double-strand break-specific cohesin domain[J]. Molecular Cell, 2004, 16(6):991-1002.

[51] Lindroos H B, Ström L, Itoh T, et al. Chromosomal association of the Smc5/6 complex reveals that it functions in differently regulated pathways[J]. Molecular Cell, 2006, 22(6):755-767.

[52] Copsey A, Tang S M, Jordan P W, et al. Smc5/6 coordinates formation and resolution of joint molecules with chromosome morphology to ensure meiotic divisions[J]. PLoS Genetics, 2013, 9(12):e1004071.

发和应用提供理论依据。

不同微生物菌肥中所含的微生物不同,相应肥效也各不相同。固氮、硅酸盐及溶磷菌肥主要是通过活体菌在植物根际的活动提高土壤中的氮、磷、钾利用率。促生菌肥一般是指植物根际促生细菌(plant growth-promoting rhizobacteria,简称 PGPR)菌剂,近年来对其研究较为广泛,能有效提高作物抗逆能力等^[3],降低作物的染病率从而提高作物产量。光合作用肥料能够显著提高作物的光合作用效率,提升作物品质及产量^[4]。单一微生物肥料功能有限,可将不同菌剂复配组合,提高微生物多样性的同时使其功能更加全面。

1 国内外微生物肥料发展现状

1.1 国际微生物肥料发展

长期生产实践中人们发现,种植豆类植物不仅可以培肥地力,而且可以提高农产品产量。早在 1886 年, Hellriegel 等发现豆科植物能够固氮;1888 年,荷兰学者 Beijerinck 分离纯化得到根瘤菌;1889 年波兰学者 Wski 将纯培养的根瘤菌接种到豆科植物上,形成根瘤^[5]。1895 年法国学者 Noble 首次在欧美推广根瘤菌制剂“Nitrigen”的微生物肥料产品,自此微生物肥料产生^[6]。1935 年前苏联学者从土壤中分离出解磷菌,其在田间试验中能够有效提高土壤的含磷量,最多可达到 42%^[7]。20 世纪 60 年代后各国争相将固氮菌运用于禾本科植物种植中,其中意大利、比利时、德国等国家在将其接种至玉米的试验中发现其可以替代一部分化肥,替代率达到 20%~30%。20 世纪 70 年代,巴西学者 Dtibereine 开创了联合固氮,1980 年, Kloepper 等发现一些微生物能够产生噬铁素,对土壤病原菌的传播有抑制作用,大量试验也证明 PGPR 菌剂能够分泌铁载体抑制植物病原菌^[8]。1972 年,国际农业组织同时成立了有机农业运动国际联盟(I-FOAM)和绿色食品国际协会组织,发展至 1990 年,已有会员 300 多个,分布于世界 60 多个国家。这些国际组织还提出可持续农业概念,要生产绿色食品必须有相应的生物肥料和有机肥料,目前国际上已有 70 多个国家生产、应用和推广使用生物肥料。2017 年,孟山都和诺维信公司组建的“生物农业联盟”推出 2 款新产品:一种为玉米微生物种衣剂,其活性成分为土壤中的一种真菌,该真菌在玉米植株的根部周围生长,帮助植株提升吸收土壤营养的效率;另一种产品则可促进土壤中有益微生物的生长,帮助大豆植株的营养吸收,改善大豆植株的健康状况。近年来,随着生物技术及分子生物学的不断发展,对不同菌种抗逆及促生机制的持续探索,新型促生菌不断涌现,不同菌组合的复合型生物菌肥正在探索当中,不久的将来将可以取代化学肥料。

1.2 国内微生物肥料发展

我国非常重视微生物菌肥的开发及利用,对这一领域的研究始于 20 世纪 30 至 40 年代。20 世纪 30 年代末张宪武开始对大豆根瘤菌进行研究,20 世纪 40 年代初陈华葵等在紫云英根瘤菌研究过程中发现了有效根瘤和无效根瘤,20 世纪 50 年代首次从国外引进一批细菌肥料,包括固氮菌、溶磷细菌及解钾菌,20 世纪 60 年代开始使用抗生素肥和固氮蓝绿藻肥,20 世纪 70 至 80 年代开始使用囊泡-丛枝(vesicular arbuscular,简称 VA)菌根,20 世纪 90 年代先后推广使用联合

固氮菌肥、PGPR 菌剂、解钾菌肥及光合作用菌肥等^[9]。进入 21 世纪后,逐渐由功能单一的菌肥发展为复合型菌肥,陆续出现了基因工程菌肥、作基肥、有机无机复合菌肥、生物有机肥及菌粉型微生物接种剂肥料等。20 世纪末,我国微生物肥料使用面积逐渐增加且效果显著,在不同作物上平均增产最高达 32%;近年来,我国微生物肥料企业总数已经达到 1 000 个以上,年产值 200 亿元,平均年产量达到 1 000 万 t,大田累计应用面积达到 $1.33 \times 10^9 \text{ hm}^2$ ^[10]。微生物肥料使用量增长迅速但总量偏小,不足我国肥料使用量的 3%,这与我国对微生物肥料的重视不足有关,且目前市场上微生物肥料所使用的菌种性状不好,企业在研发时对菌种选育投入少,使得菌种来源杂乱,微生物肥料产品质量参差不齐,影响其在生产中的推广,因此继续深入研发地域广适性的作物专用微生物肥料意义重大。

2 微生物菌肥作用机制

2.1 促进氮磷钾元素的吸收利用

2.1.1 固氮作用 根瘤菌类、自生固氮菌类和联合固氮菌类都可通过自身生命活动将空气中的氮进行固定,将其转化为植物可利用的氮源。微生物肥料中经常使用的有固氮菌属、氮单胞菌属、绿豆根瘤菌和苜蓿根瘤菌等。固氮菌(*Azotobacter*)在水稻生长的氮固定过程中发挥重要作用,可用作小麦、大麦、燕麦等各类作物的生物肥料^[11-12];许多研究揭示了固氮弧菌属(*Azoarcus*)、固氮螺菌属(*Azospirillum*)和伯克氏菌属(*Burkholderia*)是如何进入植株根部定殖及增加作物氮素含量的。刘剑君等从烤烟根际分离到一株固氮菌株,将其施用后发现能使烤烟杀青样中氮含量得到提高^[13]。席琳乔等利用¹⁵N 同位素稀释法对接种到燕麦上的固氮菌的固氮能力进行测定,结果显示可提高燕麦的全氮含量、固氮百分率及固氮量^[14];曹云海在探究固氮菌对非豆科植物作用的试验中发现,在小麦、玉米生长过程中施用固氮菌肥,可分别使小麦、玉米增产 11.69%、13.57%^[15]。

2.1.2 溶磷作用 土壤中的解磷微生物在生长繁殖过程中会产生一些酸类和酶类物质,如乳酸、柠檬酸、草酸、甲酸、磷酸酶等,能够提高植物对磷的利用效率,改善植物营养条件;同时还可以改善土壤结构,提高土壤有机质含量,改良盐碱地等,对充分发挥土壤生态肥力、保持现代农业可持续发展等均具有重要作用。已有报道称微球菌属(*Micrococcus*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)和黄杆菌属(*Flavobacterium*)均具有良好的溶磷能力^[16-17];叶杆菌属(*Phyllobacterium*)可溶解磷从而促进草莓品质的提高^[18],溶磷根瘤菌可促进野胡萝卜和莴苣(*Lactuca sativa*)的生长^[19];豆科根瘤菌(*Rhizobium leguminosarum*)菌株 PETP01 及 *R. leguminosarum* 菌株 TPV08 溶磷的同时可作为辣椒和番茄生长的促生菌^[20]。冯瑞章等分别给燕麦接种 10 种溶磷菌剂,结果证明该菌剂对燕麦氮、磷吸收有一定的促进作用^[21];李晓举等将分离自烤烟根际的解钾菌株 Po4 制成菌肥,在烤烟移栽的过程中施入,发现不同生长期烤烟叶片中磷的平均含量提高 19.13%,同时烤烟的产量、产值和均价也均高于对照^[22]。邵春花等在解磷菌剂盆栽及大田施用效果探究试验中,用解磷菌剂处理青菜,发现其主根长和根系鲜质量与不接

种菌剂的对照相比分别增加 16.3% ~ 29.8% 和 58.3% ~ 62.5%, 地上部分鲜质量、干质量和生物量分别较对照增加 23.5% ~ 41.1%、15.8% ~ 24.9% 和 24.6% ~ 41.6%^[23]。

2.1.3 解钾作用 解钾菌能分解土壤中的难溶性矿物质, 将其转化为易溶性物质, 以利于植物吸收利用^[24]。土壤中解钾细菌种类有胶质芽孢杆菌、多黏芽孢杆菌等, 它们可将云母、钾长石分解转化成可溶性 K^+ 。据报道, 解葡聚糖类芽孢杆菌 (*Paenibacillus glucanolyticus*) 可使黑胡椒干质量增加^[25]; 土壤芽孢杆菌 (*Bacillus edaphicus*) 可增加小麦吸钾量^[26]; 将胶质芽孢杆菌 (*Bacillus mucilaginosus*) 和巨大芽孢杆菌 (*Bacillus megaterium*) 同时接种可促进茄子、辣椒和黄瓜的生长^[27]; 苏丹草上接种解钾菌 *B. mucilaginosus* 可显著提高其生物量^[28]。盛下放了解钾菌株 NBT 的研究显示, 该菌能破坏钾长石晶格结构, 释放其中的钾元素供水稻利用^[29]。张朝辉等将分离自烤烟根际的解钾菌 KO_3 制成菌肥施用到烤烟栽培的过程中发现, 钾元素有效性提高 27.08%, 烤烟产量、产值各提高 7.38%、5.47%^[30]。

2.2 微生物代谢产物可直接或间接调节植物生长

植物生长发育可受微生物产生的植物激素、维生素及酚类物质的影响。目前, 已知的植物激素主要有生长素 (IAA)、赤霉素 (GA)、细胞分裂素 (CTK) 和乙烯 (ethylene) 等。部分细菌在植物根部分泌的生长素在低浓度下能够有效促进根部生长, 现已证实 80% 的根际细菌能产生 IAA。分泌 IAA 的主要有假单胞菌、黄单胞菌、固氮螺菌、粪产碱杆菌以及根瘤菌等。生长素产生菌芽孢杆菌属 (*Bacillus* spp.) 可对马铃薯生长产生积极影响^[31]。Verma 等报道, 内寄生的链霉菌属菌株可产生 IAA, 是潜在的植物生长促进剂^[32]。产 IAA 的菌根菌可促进甜椒、莴苣、番茄等作物的生长^[33]。赤霉素能促进植物茎叶、侧芽的生长, 诱导植物开花, 但对根的生长一般没有影响, 高浓度下还可能抑制植物根部生长, 仅有极少报道认为某些细菌能产生 GA。接种 GA 产生菌蜡样芽孢杆菌可促进红辣椒生长, 将 GA 产生菌鞘氨醇单胞菌 LK11 接种于西红柿植株可明显促进其生长^[34]。细胞分裂素能促进植物细胞分裂及体积增大, 同时可预防植株衰老。研究发现, 褐球固氮菌、巨大芽孢杆菌可产生 CTK 从而促进黄瓜生长, 这一结果得到 Ortiz - Castro 等^[35]的证实。乙烯作为一种能够帮助植物抗逆的激素, 逆境条件下过量产生反而会导致植物生长发育受阻或死亡。1 - 氨基环丙烷 - 1 - 羧酸 (ACC) 是合成植物乙烯的前体物质, ACC 脱氨酶产生菌能够降解植物合成的 ACC, 生成氨和 α - 酮丁酸, 可作为植物生长的氮源和碳源, 从而间接促进植物生长发育。豆科根瘤菌可产生 ACC 脱氨酶, 促进胡椒和番茄植株的生长。Ahmad 等发现, ACC 脱氨酶产生菌——根瘤菌和假单胞菌在受盐影响的条件下, 可改善绿豆生长、生理及质量^[36]。Sokolova 等曾报道, 2 种含有 ACC 脱氨酶的假单胞菌株可以改善小麦作物生长和产量, 含有不同水平的氮磷钾营养成分^[37]。程雁等在探索双孢菇覆土栽培机制的研究中发现, 在双孢菇栽培过程中接入 ACC 脱氨酶产生菌可显著提高双孢菇产量, 且能够促进双孢菇提前出菇^[38]。刘建国等用生物菌肥对水稻种子萌发前期进行浸种处理, 可显著提高水稻种子的发芽势, 且对其幼苗期根系生长有明显的促进作用^[39]。

2.3 提高植株抗逆性

许多微生物可以提高作物抗旱、抗极端温度、湿度、pH 值和抗重金属毒害等能力, 从而提高作物在胁迫条件下的生存能力。荧光假单胞菌 MSP - 393 可作为许多生长在沿海生态系统盐土中的农作物生长所需的 PGPR 菌剂。在盐胁迫条件下, 用根瘤菌培育的花生品种与施用氮肥具有相同的氮利用效率。Liddycoat 等研究发现, 假单胞菌可提高水淹状态下芦笋的发芽率; 恶臭假单胞菌 Rs - 198 可增加 Mg^{2+} 、 K^+ 和 Ca^{2+} 的吸收, 减少 Na^+ 的吸收, 同时提高内源性吲哚乙酸的产量, 从而提高盐胁迫下棉花种子的萌发率^[40-41]。El - Akhal 等发现, 碱性芽孢杆菌, 多黏芽孢杆菌和草分支杆菌可产生钙土, 高温和高盐条件下可提高玉米生长和养分吸收^[42]。吴江利等在研究微滴灌生物菌肥对荒漠沙中棉花生长的影响中发现, 菌肥处理组棉花发芽时间比对照组提前 12 ~ 24 h, 发芽率提高 1.59% ~ 27.70%, 且明显表现出对干旱高温胁迫环境的抗逆^[43]。微生物肥料之所以能够提高棉花种子的发芽率, 可能是由于微生物代谢产物改变了土壤微环境中的 pH 值, 而 pH 值直接影响与发芽相关酶的活性。重金属锰 (Mn) 对植物生长有毒害作用, 土壤经高温蒸汽灭菌后 Mn 含量提高了 15 倍, 接种 VA 菌种后可提高植物对 Mn 的抗性。

2.4 提高植株抗病性

2.4.1 产生病原菌抗生素 微生物菌肥中有益菌产生的生防物质是植物抵抗病虫害的重要来源, 目前已知微生物菌肥产生的常见抗生素约有 20 种, 另外还有吩嗪、硝基吡咯菌素、藤黄绿脓菌素、托酚酮、2,4 - 二乙酰藤黄酚、苯二酚等不同类型的抗生素。这些物质可抑制土壤病原菌的生长与繁殖, 增强植物致病能力。假单胞菌可产生抑制小麦病原菌高曼诺氏菌的抗生素, 蜡样芽孢杆菌 UW85 可防治苜蓿猝倒病, 微生物分泌的含氮氰化物可以击退那些吃树叶的食草动物。Kumar 等报道称费氏中华根瘤菌 KCC5 和荧光假单胞菌 LPK2 产生的几丁质酶和 β - 葡糖酶可防治由潮湿镰刀菌导致的枯萎病^[44]。假单胞菌和芽孢杆菌可产生抑制玉米病原真菌的嗜铁素。顾金刚等发现, RB - 42 和 RB - 89 菌体、无菌发酵液能够抑制烟草黑胫病原菌菌丝生长、游动孢子囊产生及游动孢子的萌发, 其作用机制是菌株产生抗生素类物质从而抑制病原菌的生长^[45]。席淑雅等从烤烟根际分离得到 2 株菌株 AO3 和 BO4, 平板测定发现其对烟草角斑病、青枯病和赤星病病原菌有抑制作用, 将其制成菌肥后不仅可提高种子发芽率, 还可以提高其产量^[46]。阎淑珍等在研究中也发现, 泾阳链霉菌 R1、R2 产生的代谢物质能显著抑制棉花枯萎病菌、棉花黄萎病菌、油菜菌核病菌及草莓灰霉病菌的生长^[47]。方敦煌等在试验中筛选到拮抗烟草赤星病菌株 AM6, 其产生的抗菌物质粗提取液稀释 100 倍后在田间防效仍可达 80.3%^[48]。陈芳等在研究中发现, 与仅施无机肥的田块相比, 施用微生物菌肥可显著降低甜瓜根结线虫病的发病率, 最高防治率可达 81.14%^[49]。

2.4.2 诱导植物系统抗性 植物的系统抗病性可在一定环境条件或微生物诱导下产生。诱导系统抗性 (ISR) 即植物被环境中非生物或生物因子激活而产生的系统抗性, 包括病原体激发产生的系统获得性抗性 (SAR)。一些由真菌培养液过滤物介导的 ISR 能有效减轻植物致病真菌引起的黄瓜炭疽

病、西红柿炭疽病,也可减轻黄瓜叶病毒病。陈玉国等在烟草中施用沃益多微生物菌肥发现,其对烟草病毒病、黑胫病和根结线虫病的防效可分别达 47.13%、36.06% 和 65.62%^[50]。当前对 ISR 产生机制的研究仍相对薄弱,而 ISR 对微生物抑病促生作用意义重大,今后这也将成为微生物菌肥研究的热点方向之一。

2.5 其他机制

微生物菌肥中的一些益生菌与土壤病原菌之间竞争生态位、营养物质及一些必需营养元素等也能在一定程度上抑制植物病害的发生。微生物在作物根际的定殖使有益微生物大量聚集形成优势菌群,从而减少土壤中植物病原菌的入侵。施用微生物肥料不仅可提高土壤的生物多样性,微生物在土壤中的活动也使土壤中的有机质含量增加;其次一些微生物生命活动可提高钙(Ca)、锌(Zn)、Mn、铜(Cu)、铁(Fe)、硼(B)等元素的有效性,为作物生长提供一些特殊的必需矿质元素,从而促进植株生长。

3 微生物肥料当前存在的问题

微生物肥料应用历史虽然很长,但是仍有许多不明确和未解决的理论问题,当前在这些方面很少有立项课题,很多研究往往仅限于菌株分离、增产原因分析及大田试验,对于真正涉及微生物肥料本身,如作用机制、肥料生产最佳、最合理的工艺条件的探讨,微生物肥料施用后在土壤和根际的定殖及存活、与土壤中同类或异类微生物的生存竞争、菌剂生态行为以及影响肥效的制约因子等问题的探讨和了解欠缺。韩华雯等在探究不同促生菌株组合对紫花苜蓿产量和品质的影响过程中发现,微生物肥料进行复配的效果明显优于单一的微生物肥料,不同菌种组合导致的促生效果也不相同^[51]。张辉等研究发现,复合微生物肥料能显著提高土壤中一些酶的活性,促进有机质分解及养分的释放^[52]。王永龙等研究表明,基施复合微生物肥料的小麦氮肥利用率明显提高,增产效果比较显著,且对小麦纹枯病有较好的防治效果^[53]。单玉梅等也发现,复合微生物肥料对土壤的物理状况和养分平衡起到了很大的促进作用^[54]。另外,生产上存在着严重的菌株退化问题,致使微生物肥料质量及大田施用效果并不稳定,应在生产过程中不断地进行菌株复壮及筛选。再次,微生物肥料产品存在诸多质量问题,杂菌率偏高、有效活菌含量较低、产品有效期短、产品组合不合理甚至同一类产品质量差距很大,这也严重影响了微生物肥料市场开拓和农民使用的积极性。因此,应进一步加大微生物肥效的稳定性研究,这是解决微生物肥料推广问题的关键所在。

4 微生物肥料未来发展前景

当前国内外都在大力倡导发展绿色农业,生产和销售绿色食品,因此进一步开发和利用微生物肥料前景广阔,拥有巨大的潜在市场。前文中已反复论述施用生物、有机肥料才可保证农产品生产品质,然而也要全面正确地认识微生物肥料,了解到与化肥相比它的肥效发挥相对缓慢。因此,今后应开发微生物与有机、无机复混肥料,菌种复配肥料,选育出耐高温抗逆性强的芽孢杆菌制作菌剂,采用生物技术手段构建高效工程菌等。进一步深入探究微生物肥料的作用机制,加大

工艺设备完善力度,优化生产工艺条件及流程,增加产品质量及稳定性,不断加大微生物肥料的推广和使用。

参考文献:

- [1] 杨帆,孟远夺,姜义,等. 2013 年我国种植业化肥施用状况分析[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(1):217-225.
- [2] 张海亮. 西北某地区农村化肥污染问题的调查研究[J]. 中国集体经济,2016(33):16-17.
- [3] 王义,贺春萍,郑肖兰,等. 土壤解磷微生物研究进展[J]. 安徽农学通报,2009 15(9):60-63.
- [4] 史清亮,贺跃武,马玉珍,等. 光合细菌在农业上的应用研究[J]. 山西农业科学,2000,28(2):3-6.
- [5] 房春红. 根瘤菌与大豆、土壤间相互适应性研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2007.
- [6] 曾玲玲,崔秀辉,李清泉,等. 微生物肥料的研究进展[J]. 贵州农业科学,2009,37(9):116-119.
- [7] 梁绍芬,姜瑞波. 解磷微生物肥料的作用和应用[J]. 土壤肥料,1994(2):46-48.
- [8] Furina E K, Bonartseva G A. The effect of combined and separate inoculation of alfalfa plants with *Azospirillum lipoferum* and *Sinorhizobium meliloti* on denitrification and nitrogen-fixing activities[J]. Applied Biochemistry & Microbiology,2007,43(3):286-291.
- [9] 陈文新,汪恩涛. 中国根瘤菌[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [10] 佚名. 中国微生物肥料市场容量达 1400 万吨[N]. 中国农资,2015-9-18(36).
- [11] Sahoo R K, Ansari M W, Dangar T K, et al. Phenotypic and molecular characterisation of efficient nitrogen-fixing *Azotobacter* strains from rice fields for crop improvement[J]. Protoplasma, 2014,251(7):511-523.
- [12] Wani S A, Chand S, Ali T. Potential use of *Azotobacter chroococcum* in crop production[J]. Curr Agri Res,2013(1):35-38.
- [13] 刘剑君,王豹祥,张朝辉. 一株具有固氮功能的烟草根际微生物的鉴定及其初步效应[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(5):1237-1242.
- [14] 席琳乔,张德罡,姚拓. N 同位素稀释法测定燕麦根际固氮菌固氮量的研究[J]. 核农学报,2007,21(4):417-420.
- [15] 曹云海. 非豆科作物施用固氮菌肥的肥效试验[J]. 甘肃农业,2015(11):93-94.
- [16] Dastager S G, Deepa C K, Pandey A. Isolation and characterization of novel plant growth promoting *Micrococcus* sp NII-0909 and its interaction with cowpea[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2010,48(12):987-992.
- [17] Pindi P K, Satyanarayana S D V. Liquid microbial consortium - a potential tool for sustainable soil health[J]. J Biofertil Biopest 2012(3):1-9.
- [18] Flores - Felix J D, Silva L R, Rivera L P, et al. Plants probiotics as a tool to produce highly functional fruits: the case of phyllobacterium and vitamin C in strawberries[J]. PLoS One,2015,10:e0122281.
- [19] Jos Ñ D. Flores F Ñ, Esther M Ñ, et al. Use of *Rhizobium leguminosarum* as a potential biofertilizer for *Lactuca sativa* and *Daucus carota* crops[J]. Journal of Plant Nutrition & Soil Science, 2013,176(6):876-882.
- [20] Garcia - Fraile P, Carro L, Robledo M, et al. *Rhizobium* promotes non-legumes growth and quality in several production steps: towards

- a biofertilization of edible raw vegetables healthy for humans[J]. *PLoS One*,2012,7:e38122.
- [21]冯瑞章,龙瑞军,姚拓,等. 溶磷菌对燕麦生物量及植株氮、磷含量的影响[J]. *水土保持学报*,2009,23(2):188-192.
- [22]李晓举,吴风光,王豹祥,等. 一株烤烟根际解磷细菌的鉴定及其在烤烟生产中的应用[J]. *河南农业科学*,2011,40(6):66-70.
- [23]郜春花,王岗,董云中,等. 解磷菌剂盆栽及大田施用效果[J]. *山西农业科学*,2003,31(3):40-43.
- [24]Shanware A S, Kalkar S A, Trivedi M M. Potassium solubilisers: occurrence, mechanism and their role as competent biofertilizers[J]. *Int J Curr Microbiol App Sci*,2014(3):622-629.
- [25]Sangeeth K P, Bhair S, Srinivasan V. *Paenibacillus glucanolyticus*, a promising potassium solubilizing bacterium isolated from black pepper (*Piper nigrum* L.) rhizosphere[J]. *J Spic Aromat Crops* 2012,21:118-124.
- [26]Sheng X F, He L Y. Solubilization of potassium-bearing minerals by a wild-type strain of *Bacillus edaphicus* and its mutants and increased potassium uptake by wheat[J]. *Canadian Journal of Microbiology*,2006,52(1):66-72.
- [27]Han H S, Supanjani S, Lee K D. Effect of co-inoculation with phosphate and potassium solubilizing bacteria on mineral uptake and growth of pepper and cucumber[J]. *Plant Soil and Environment*, 2006,52(3):130-136.
- [28]Basak B B, Biswas D R. Influence of potassium solubilizing microorganism (*Bacillus mucilaginosus*) and waste mica on potassium uptake dynamics by sudan grass (*Sorghum vulgare* Pers.) grown under two Alfisols[J]. *Plant and Soil*,2009,317(1/2):235-255.
- [29]盛下放,黄为一. 硅酸盐细菌 NBT 菌株解钾机理初探[J]. *土壤学报*,2002,39(6):863-871.
- [30]张朝辉,王豹祥,席淑雅,等. 一株烤烟根际解钾细菌的鉴定及其在烤烟生产中的应用[J]. *浙江农业学报*,2011,23(3):553-558.
- [31]Ahmed A, Hasnain S. Auxin-producing *Bacillus* sp.: auxin quantification and effect on the growth of *Solanum tuberosum*[J]. *Pure & Applied Chemistry*,2010,82(1):313-319.
- [32]Verma V C, Singh S K, Prakash S. Bio-control and plant growth promotion potential of siderophore producing endophytic *Streptomyces* from *Azadirachta indica* A. Juss[J]. *Journal of Basic Microbiology*, 2011,51(5):550-556.
- [33]Garcia-Fraile P, Carro L, Robledo M, et al. *Rhizobium* promotes non-legumes growth and quality in several production steps: towards a biofertilization of edible raw vegetables healthy for humans[J]. *PLoS One*,2012,7:e38122.
- [34]Khan A L, Waqas M, Kang S M, et al. Bacterial endophyte *Sphingomonas* sp. LK11 produces gibberellins and IAA and promotes tomato plant growth[J]. *J Microbiol*,2014,52:689-695.
- [35]Ortiz-Castro R, Díaz-Pérez C, Martínez-Trujillo M, et al. Transkingdom signaling based on bacterial cyclodipeptides with auxin activity in plants[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*,2011,108(17):7253-7258.
- [36]Ahmad M, Zahir Z A, Khalid M, et al. Efficacy of *Rhizobium* and *Pseudomonas* strains to improve physiology, ionic balance and quality of mung bean under salt-affected conditions on farmer's fields[J]. *Plant Physiology & Biochemistry*,2013,63:170-176.
- [37]Sokolova M G, Akimova G P, Vaishlia O B. Effect of phytohormones synthesized by rhizosphere bacteria on plants[J]. *Prikl Biokhim Mikrobiol*,2011,47(3):302-307.
- [38]程雁,王景茂,张岩,等. 应用 1-氨基环丙烷-1-羧酸脱氨酶产生菌提高双孢蘑菇产量[J]. *河南科学*,2015,33(10):1750-1755.
- [39]刘建国,朱云娜,乔冬. 生物菌肥对水稻种子发芽的效应研究[J]. *安徽农业科学*,2014,42(36):12857-12859.
- [40]Liddycoat S M, Greenberg B M, Wolyn D J. The effect of plant growth-promoting rhizobacteria on asparagus seedlings and germinating seeds subjected to water stress under greenhouse conditions[J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 2009, 55(4):388-394.
- [41]Yao L, Wu Z, Zheng Y, et al. Growth promotion and protection against salt stress by *Pseudomonas putida* Rs-198 on cotton[J]. *Eur J Soil Biol* 2010,46(1):49-54.
- [42]El-Akhal M R, Rincón A, Cobadl P T, et al. Effects of salt stress and rhizobial inoculation on growth and nitrogen fixation of three peanut cultivars[J]. *Plant Biology*,2013,15(2):415-421.
- [43]吴江利,罗学刚,李宝强,等. 微滴灌生物菌肥对荒漠沙中棉花生长的影响[J]. *安徽农业科学*,2015,43(13):87-90.
- [44]Kumar H, Bajpai V K, Dubey R C, et al. Wilt disease management and enhancement of growth and yield of *Cajanus cajan* (L.) var. Manak by bacterial combinations amended with chemical fertilizer[J]. *Crop Protection*,2010,29(6):591-598.
- [45]顾金刚,方敦煌,李天飞,等. 两株荧光假单胞杆菌菌株对烟草黑胫病病原菌的抑制作用[J]. *中国生物防治学报*,2004,20(1):76-78.
- [46]席淑雅,毕庆文,王豹祥,等. PGPR 菌肥在烤烟漂浮育中的应用[J]. *中国烟草学报*,2009,15(6):53-57.
- [47]阎淑珍,杨启银,陈育如. 复合微生物肥对植物土传病原真菌的抑制作用[J]. *中国生物防治*,2004,20(1):49-52.
- [48]方敦煌,李天飞,沐应祥,等. 拮抗细菌 GP13 防治烟草黑胫病的田间应用[J]. *云南农业大学学报*,2003,18(1):48-51.
- [49]陈芳,肖同建,朱震,等. 生物有机肥对甜瓜根结线虫病防治的田间防治效果研究[J]. *植物营养与肥料学报*,2011,17(5):1262-1267.
- [50]陈玉国,王海涛,李小杰,等. 沃益多微生物菌肥对烤烟生长发育和抗病性的影响[J]. *中国烟草科学*,2015,36(3):63-67.
- [51]韩华雯,孙丽娜,姚拓,等. 不同促生菌株组合对紫花苜蓿产量和品质的影响[J]. *草业学报*,2013,22(5):104-112.
- [52]张辉,李维炯,倪永珍. 生物有机无机复合肥效应的初步研究[J]. *农业环境科学学报*,2004,20(1):37-40.
- [53]王永龙,叶华斌,阚磊. 小麦施用生物有机无机复合肥的增产效果[J]. *江苏农业科学*,1997(2):42-43.
- [54]单玉梅,温超,陈海军,等. 复合微生物肥料对科尔沁区天然打草场土壤理化性质的影响[J]. *北方农业学报*,2017(2):54-57.