

## ◆ 提质增效产品创制技术 ◆

## 微生物类脂生物刺激剂产品的应用研究及前景分析

刘 健

(中国无机盐工业协会生物刺激剂专业委员会 (CBPC), 上海 200062)

[摘要] 微生物类脂生物刺激剂作为农业领域的创新技术, 通过刺激植物免疫、增强植物抗逆、抑制病害、优化养分吸收、提升农作物品质和改善土壤微生态, 正在推动可持续农业的转型。重点阐述生物糖脂、脂肽和聚羟基脂肪酸酯 (PHA) 三类主要微生物类脂生物刺激剂产品和技术的应用现状, 分析其功效机制的研究进展及未来发展前景。

[关键词] 微生物类脂; 生物刺激剂; 可持续农业

[中图分类号] TQ449\*.4 [文献标志码] A [文章编号] 2097-4566 (2025) 08-0050-09

## Application research and prospect analysis of microbial lipid-based biostimulants products

LIU Jian

(Biostimulant Professional Committee of China Inorganic Salts Industry Association (CBPC), Shanghai 200062, China)

**Abstract:** Microbial lipid (lipoids) biostimulants, as innovative advancements in agricultural technology, are driving the transition toward sustainable agriculture by enhancing plant immunity, improving stress resistance, suppressing diseases, optimizing nutrient uptake, elevating crop quality, and promoting a healthier soil microecosystem. The current application status of three major types of microbial lipid biostimulant products and technologies—namely, glycolipids, lipopeptides, and polyhydroxyalkanoates (PHA) are described, and the latest research progress regarding their mechanisms of action, as well as their future development prospects are analyzed.

**Key words:** microbial lipid (lipoids); biostimulants; sustainable agriculture

## 0 引言

在全球农业绿色发展与可持续生产体系加快构建的背景下, 微生物功能性代谢物作为生物刺激素<sup>[1]</sup>的核心组分之一, 在增强农作物营养吸收、促进农作物生长发育、增强农作物抗逆功能、改善农作物品质及改良土壤等主效功能多方面发挥着不可替代的作用<sup>[2]</sup>。其中, 微生物类脂作为一种由微生物代谢产生的特殊脂质化合物, 因其独特的生物活性与作用机制, 已成为农业生物刺激剂产品领域的研究热点。

微生物类脂生物刺激剂是指微生物 (包括细菌、真菌、古菌、放线菌等) 细胞中, 涵盖糖脂、脂肽、磷脂、脂肪酸及其衍生物、脂肪酸聚酯等多种结构类型, 且不属于甘油三酯 (脂肪), 但又具有脂溶性的一类脂质分子。它们广泛参与生物膜构成 (表征环境微生物群落的重要标志性物质)、信号传导、能量储存、细胞识别、根际微生物群落稳态维持及抗逆性等关键生理过程, 是微生物生命活

动的重要物质基础<sup>[3-5]</sup>。作为生物表面活性剂, 增值多种化合物, 是农药/除草剂佐剂, 具有易吸收、稳定性和耐候性等很多优点<sup>[6]</sup>。

目前微生物类脂生物刺激剂产品主要集中在生物糖脂、脂肽和聚羟基脂肪酸酯 (PHA), 其农业生产和环境生态修复的应用案例不断增多, 初步作用机制也有不少报道, 多集中在抗病防效。但对植物和土壤根际生态的生物刺激过程机制及生理反应机制的深入研究还相对缺乏。这也正是微生物类脂生物刺激剂产品快速应用推广和健康发展的关键。

## 1 常见农用微生物类脂生物刺激剂原料的主要种类和生理功能

## 1.1 糖脂 (glycolipids)

糖脂是由微生物或动植物细胞合成的由疏水的

[收稿日期] 2025-07-30

[作者简介] 刘 健 (1969-), 男, 四川雅安人, 博士, 中国无机盐工业协会生物刺激剂专业委员会主任, 主要研究方向为微生物及代谢物与农业生物合理化应用综合技术。

脂肪酸链与亲水的糖基组成的两亲性类脂化合物。糖脂分子中含碳水化合物链（单糖、寡糖或多糖），通过糖苷键与脂质骨架连接，主要参与细胞识别和膜结构维持。常见有脂多糖（LPS），是革兰氏阴性菌外膜的特征成分，由脂质A（内毒素核心）、核心多糖和O-抗原组成，是细菌致病性的关键物质；甘露糖脂，真菌（如假丝酵母）的主要糖脂，参与细胞间信号传递；磷脂，某些光合细菌（如紫硫细菌）的膜成分，辅助光合作用进行<sup>[7-8]</sup>。

## 1.2 脂肽 (lipopeptide)

脂肽是由芽孢杆菌等微生物合成的由疏水的脂肪酸链与亲水的环状寡肽或线性寡肽组成的类脂类物质。微生物脂肽是一类兼具脂质和肽段结构的次级代谢产物，具有表面活性、抗菌和抗病等多种生物活性，在植物抗逆及根际微生态调控中发挥重要作用。根据其结构特征（氨基酸组成、脂肪酸链长度、环化方式等）、产生菌属及生理功能，主要种类见表1。

表1 微生物脂肽的主要种类、结构特征、产生菌属及生理功能<sup>[7-11]</sup>

Table 1 The main types, structural characteristics, genera of producing bacteria and physiological functions of microbial lipopeptide

脂肽产生菌属	脂肽类型	结构特征	主要生理功能	典型菌株
芽孢杆菌属	表面活性素	由7个氨基酸组成的环肽与 $\beta$ -羟基脂肪酸链(C13~C15)通过内酯键连接,形成环形结构,脂肪酸链长度是其变异来源(如C14 surfactin 活性最强)	(1)增强表面活性;(2)广谱抗菌,通过破坏病原菌细胞膜(如真菌菌丝、细菌细胞膜),抑制多种植物病原菌(如灰霉病菌、青枯病菌);(3)抗逆信号,在植物中可诱导系统抗性(ISR),增强作物对病虫害的防御能力	枯草芽孢杆菌、解淀粉芽孢杆菌
	伊枯草菌素	由7个氨基酸组成的环肽(含罕见的D-氨基酸)与 $\beta$ -氨基脂肪酸链(C14~C17)连接,脂肪酸链的长度和分支影响其活性	(1)强抗真菌活性,对多种丝状真菌(如白粉病菌、根腐病菌)有防效,通过插入真菌细胞膜形成通道,导致细胞内容物泄漏;(2)低细胞毒性,对植物和哺乳动物细胞毒性较低,对草莓白粉病有防效	枯草芽孢杆菌、短小芽孢杆菌
	丰原素	由10个氨基酸组成的环肽(含3个D-氨基酸)与 $\beta$ -羟基脂肪酸链(C14~C18)连接,肽链中含独特的鸟氨酸残基	(1)专一性抗真菌,尤其对卵菌纲(如疫霉菌)和子囊菌纲真菌有效,通过抑制真菌细胞膜上的麦角固醇合成发挥作用;(2)协同增效,与iturin 联用可增强抗真菌效果(如防治番茄晚疫病,联合使用防效提升显著)	枯草芽孢杆菌、环状芽孢杆菌
	芽孢菌毒素	属于伊枯草菌素家族的变种,氨基酸组成略有差异(如含天冬氨酸替代谷氨酸),脂肪酸链为C15~C17	抗真菌谱广,对水稻纹枯病菌、小麦赤霉病菌等植物病原菌抑制作用显著,常被用于水稻、小麦的生物防治	枯草芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌
假单胞菌属	粘菌素	由9个氨基酸组成的线性肽链与 $\beta$ -羟基脂肪酸链(C10~C12)连接,含多个疏水氨基酸,具有较强的亲脂性	(1)抑制植物病原菌,通过破坏真菌菌丝体(如立枯丝核菌)和细菌生物膜,减少作物根腐病发生;(2)促进植物生长,在根际形成保护膜,减少病原菌侵染,同时增强根系对水分和养分的吸收	荧光假单胞菌、铜绿假单胞菌
	绿脓菌素	由肽链与铁载体基团结合,含脂肪酸侧链,是假单胞菌的特征性脂肽类铁载体	通过整合环境中的铁离子( $Fe^{3+}$ ),争夺病原菌的铁营养,间接抑制其生长,同时参与假单胞菌与植物的共生互作	铜绿假单胞菌、恶臭假单胞菌
其他菌属	达托霉素	由13个氨基酸组成的环肽,含独特的癸酰脂肪酸链,通过硫醚键连接肽链	通过插入革兰氏阳性菌细胞膜(如金黄色葡萄球菌)形成通道,导致钾离子外流和细胞死亡	玫瑰孢链霉菌
	双霉素	由10个氨基酸组成的线性肽链与 $\beta$ -羟基脂肪酸链(C14~C16)连接,含多个极性氨基酸	强表面活性,可乳化石油烃类污染物,在环境修复中用于增强石油降解菌的降解效率	假单胞菌属某些菌株

由表1也可大致了解：芽孢杆菌脂肽以环肽结构为主，侧重抗真菌和表面活性；假单胞菌脂肽多为线性结构，参与根际微生态调控；链霉菌脂肽（如达托霉素）则是重要的抗菌功能。这种结构多样性使其在抗逆防病、环境治理（污染修复）等领域展现出不可替代的潜力，尤其是其生物可降解性和低毒性，符合绿色可持续发展的需求。

## 1.3 磷脂 (Phospholipid)

磷脂是通过生物体合成的由疏水的脂肪酸链与亲水的磷酸基团组成的类脂类物质。磷脂是微生物生物膜（如细胞膜、细胞器膜）的核心成分，由甘油骨架、脂肪酸链、磷酸基团及极性头部基团组成。常见的磷脂酰乙醇胺（PE）是细菌细胞膜的主要磷脂，如大肠杆菌中PE占磷脂总量的70%以

上；磷脂酰甘油（PG）广泛存在于细菌和真菌中，参与膜稳定性调节；磷脂酰胆碱（PC）多见于真菌（如酵母菌）和某些革兰氏阴性菌，增强膜的流动性；心磷脂（CL）在细菌和线粒体膜中富集，与能量代谢相关<sup>[7-8]</sup>。

#### 1.4 甾醇（Sterol）

在微生物类脂中，甾醇作为一类含环戊烷多氢菲骨架的环状脂类物质，具有调节细胞膜通透性及抗氧化功能，虽在细菌中罕见，但在真菌和部分特殊微生物中广泛存在，其种类与功能具有显著特异性。含8个双键的不饱和固醇，侧链含甲基和乙基取代基，化学稳定性低于植物固醇。主要功能是调节膜流动性和稳定性，在真菌中尤为丰富。常见有麦角固醇（Ergosterol），其是真菌（如酵母菌、霉菌）的特征固醇，可调节细胞膜的流动性，也是抗真菌药物（如酮康唑）的作用靶点；豆固醇（Stigmasterol），在部分真菌（如腐霉属）和光合细菌中少量存在，更多见于高等植物，但在微生物中的合成与功能具有特殊性。在微生物中参与细胞膜信号传导，尤其在真菌与植物共生过程中（如菌根真菌），豆固醇可作为信号分子促进宿主植物根系识别<sup>[7-8, 11]</sup>。

#### 1.5 萜类（Terpenoids）

萜类由异戊二烯单位聚合而成，具有抗氧化、色素合成等功能。常见有类胡萝卜素（Carotenoids）：如细菌（如红螺菌）和真菌（如链孢霉）中的 $\beta$ -胡萝卜素，可保护细胞免受氧化损伤；植烷醇（Phytanol），菌膜脂的特征成分，通过醚键与甘油连接（区别于细菌的酯键），帮助古菌适应极端环境（如高温、高盐）<sup>[7-8, 11]</sup>。

#### 1.6 鞘脂（Sphingolipid）

鞘脂以鞘氨醇（含氨基的长链醇）为骨架，替代甘油骨架，主要参与膜信号传导。多见于真菌（如酿酒酵母的鞘磷脂）和某些古菌，细菌中罕见；其结构差异是区分真菌与细菌的特征之一<sup>[7-8, 11]</sup>。

#### 1.7 聚羟基脂肪酸酯（PHA）

PHA一类可由多种微生物在自然环境中以各种脂类或糖类物质为原料在细胞内合成，并是一种可以被微生物利用在自然环境中降解的线性脂肪酸聚酯<sup>[7-8, 11]</sup>。

#### 1.8 特殊类脂（Special lipids）

特殊类脂如分枝菌酸，是放线菌（如结核分枝杆菌）的特征脂质，含超长链脂肪酸（C60~C90），形成蜡质层，赋予细菌抗酸性和致病性；古菌醚键

脂，是古菌的膜脂以醚键连接甘油与植烷醇（而非细菌的酯键），且甘油为L型（细菌为D型），使其能适应极端环境（如热泉、盐湖）<sup>[7-8, 11]</sup>。

## 2 微生物类脂生物刺激剂产品的应用研究现状

### 2.1 主要产品形态

#### 1) 农用微生物类脂制剂产品

由某一特定微生物类脂体现功能主效且以该类脂命名的制剂产品。如含糖脂制剂、农用微生物脂肽原液、农用聚羟基脂肪酸聚酯颗粒等。

#### 2) 复合农用微生物类脂产品

由2种及以上的微生物类脂组成的，或由微生物类脂与其他功能物复配而成的制剂产品。可以复合（型）制剂产品，或以功能主效进行制剂产品命名，如复合脂肪酸聚酯制剂、复合微生物类脂制剂、复合型促生长制剂等。

### 2.2 3类主要的微生物类脂概述

#### 1) 生物糖脂

鼠李糖脂<sup>[12-24]</sup>、槐糖脂<sup>[25-26]</sup>等是一类重要的生物表面活性剂。相比于化学合成的表面活性剂，其具有更优秀的理化性质及环境友好等特点，被广泛应用于微生物采油、环境污染修复等工程中。比如，鼠李糖脂可促进白腐真菌对DDTs（滴滴涕）的降解效果<sup>[15]</sup>；对铜绿假单胞菌所产糖脂生物表面活性剂性能优良、稳定性好，能够显著强化乳白耙齿菌F17对葱的降解（糖脂质量浓度为50 mg/L时，第15天葱的降解率达到了82.9%），具有良好的应用前景<sup>[20]</sup>。由于在形成胶束后能够大幅提高多环芳烃（PAHs）的表观溶解度，且毒性低，无二次污染，因而在PAHs微生物降解的研究中得到广泛关注<sup>[22]</sup>。

农业生产中，生物糖脂更多用于肥料增效、生物防治、农作物抗性和土壤修复（有利于土壤团粒结构形成）等方面<sup>[23]</sup>。据报道，随着鼠李糖脂浓度增加，Cu和Ni这2种重金属的去除率增加，且鼠李糖脂在碱性条件下对Cu和Ni的去除效果较好，最高去除率可分别高达80.77%和46.74%，这为土壤重金属含量降低提供了生物解决的参考方案<sup>[18]</sup>。

#### 2) 脂肽

微生物源脂肽（LPs）是芽孢杆菌非核糖体多肽合成酶系产生的次级代谢产物，因其广谱抑菌、低耐药性、可生物降解、安全低毒，具有抑制真菌和细菌的生长、抗病毒和抗肿瘤等多种生物活性。脂肽的活性、作用机制及其应用已有很多报道，但多限于石油化工领域，其在农业生物防治、环境治理等多个领域具有巨大的应用潜力<sup>[27-65]</sup>。

根据结构特征,将脂肽分为环状脂肽和线形脂肽;按脂肪酸链和肽链的连接方式不同,进一步将环状脂肽分为表面活性素、丰原素和伊枯草菌素3类<sup>[27, 29]</sup>。

表面活性素是由多种芽孢杆菌产生的一种重要脂肽,其由一个环七肽头基通过内脂键与链长12~17个碳原子的 $\beta$ -羟基脂肪酸连接组成,是一种非常有效的生物表面活性剂,并具有重要的生物学功能。表面活性素是由非核糖体肽合成酶催化合成,赋予了表面活性素家族成员的结构多样性<sup>[27-28]</sup>。已有的研究表明表面活性素在生物防治中的作用机制主要有以下4种方式:(1)损伤病原菌细胞膜,引起细胞膜裂解或渗透压失衡;(2)抑制病原体繁殖;(3)诱导植株系统抗性;(4)促进生防菌株的定殖或生物膜的形成。表面活性素的高度结构多样性,使其具有丰富的物理化学特性,这些特性可以与多种生物活性联系在一起,将在不同的领域有更广泛应用。随着对表面活性素生物合成及其新衍生物开发研究日益深入,将会有更多高性能和广阔应用前景的新型微生物脂肽生物刺激剂产品被研发<sup>[27, 29, 41, 49, 55, 57, 64]</sup>。

从不同生态环境,尤其是农业生产实践土壤根际或农作物分离的产脂肽微生物具有很好的产业化价值<sup>[30]</sup>。目前,已报道能产表面活性素、伊枯草菌素、丰原素、杆菌霉素和大侧柏素等多种极其敏感的抗菌环脂肽的微生物种类主要集中在芽孢杆菌<sup>[41, 55, 63]</sup>、假单胞菌<sup>[37]</sup>和少量的链霉菌<sup>[56]</sup>,并在实验室生物测试和田间试验中表现出高效、安全和广谱的抑病抗逆功效。

芽孢杆菌脂肽产生菌种主要集中在解淀粉芽孢杆菌和贝莱斯芽孢杆菌,其次是枯草芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌、甲基营养型芽孢杆菌、多粘类芽孢杆菌、苏云金芽孢杆菌和侧孢短芽孢杆菌等。(1)解淀粉芽孢杆菌脂肽对香蕉枯萎病菌<sup>[39]</sup>、玉米大斑病菌<sup>[42]</sup>、黄瓜枯萎病菌<sup>[43]</sup>、葡萄白腐病菌<sup>[43]</sup>、水稻条斑病<sup>[44]</sup>、玉米小斑病菌<sup>[45]</sup>、香蕉枯萎病菌<sup>[46]</sup>、苹果斑点落叶病菌<sup>[47]</sup>、番茄黑斑病优势病原菌<sup>[48]</sup>等都有不同程度的良好抑制作用。(2)贝莱斯芽孢杆菌脂肽对山核桃干腐病菌、苹果轮纹病菌、油菜菌核病菌、小麦根腐病菌和番茄灰霉病菌的抑制率较高<sup>[50]</sup>,对金银花叶斑病菌<sup>[51]</sup>、辣椒疫霉菌<sup>[52]</sup>、葡萄灰霉菌<sup>[53]</sup>和苹果树腐烂病菌<sup>[54]</sup>等也有不同程度的良好抑制作用。(3)枯草芽孢杆菌VD18R19产表面活性素和大侧柏素对胡椒冠幅、果枝促生及胡

椒花叶病<sup>[32]</sup>的防效极显著;枯草芽孢杆菌菌株ZF517显著拮抗疮痂链霉菌菌丝的生长,对马铃薯疮痂病的防效达58.07%,显著优于对照药剂20%噻唑锌悬浮剂的防治效果<sup>[36]</sup>,对大丽轮枝菌孢子<sup>[57]</sup>、黄色镰刀菌<sup>[58]</sup>有明显抑菌活性。(4)地衣芽孢杆菌FJAT-4产生的抑菌脂肽为丰原素和表面活性素类物质,致使尖孢镰刀菌菌丝体发育畸形,影响尖孢镰刀菌的正常生长<sup>[33]</sup>。(5)甲基营养型芽孢杆菌产生的抑菌物质伊枯草菌素类脂肽对植物病原菌玉蜀黍尾孢菌、链格菌和灰葡萄孢菌的抑制率分别为65.95%、71.04%和46.69%<sup>[34]</sup>;甲基营养型芽孢杆菌xj-C发酵液脂肽类物质提取物对桃褐腐病菌有明显抑菌效果<sup>[35]</sup>。(6)多粘类芽孢杆菌HL11和卡氏芽孢杆菌ST-1的脂肽粗提物对马铃薯致病疫霉有明显的抑制作用<sup>[59]</sup>。(7)苏云金芽孢杆菌B-R1菌株(分离于健康的番茄植株内生细菌)产生的脂肽丰原素对番茄枯萎病病原菌有较强拮抗作用;对大肠埃希菌、金黄色葡萄球菌以及尖孢镰刀菌有良好的抑制作用<sup>[38]</sup>。(8)侧孢短芽孢杆菌的脂肽对生姜根腐病病原菌(为群结腐霉)有强抑菌作用<sup>[60]</sup>。(9)假单胞菌脂肽产生菌种,如摩氏假单胞菌Pt A1是对多株青枯菌均有良好抑制作用的生防菌,基因组中含有完整的环脂肽合成基因簇xtlABC,影响菌株自身的生长及生防相关性状,该基因及其合成的次生代谢产物在抑制青枯菌中起重要作用<sup>[37]</sup>。(10)比基尼链霉菌HD-087发酵产物脂肽能够诱导稻瘟病菌菌丝体chit基因和 $\beta$ -1, 3glu基因的大量表达,从而破坏细胞壁结构,推测脂肽阻遏了稻瘟病菌的细胞自噬进程<sup>[56]</sup>。

而且,有研究表明脂肽与农药合理复配使用可对病原真菌持续抑制增效。如解淀粉芽孢杆菌产脂肽粗提物与克菌丹和代森锰锌复配对玉米大斑病菌、玉米小斑病菌、黄瓜枯萎病菌和葡萄白腐病菌等抑制活性增强<sup>[42-44]</sup>;贝莱斯芽孢杆菌对金银花叶斑病的防控效果与30%吡唑醚菌酯悬浮剂相当<sup>[51]</sup>。这为化学药剂的减施增效和抗菌脂肽的合理应用提供参考依据。

### 3) 聚羟基脂肪酸酯

PHA作为合成生物学与材料学深度融合的产物,在学术界和产业界已深入研究了30多年。作为微生物胞内合成一类线性高分子聚酯,PHA含有至少150种单体,其组成、结构及性能的多样性带来了广泛的应用前景,形成了PHA家族或组学<sup>[66]</sup>。PHA具有良好生物降解性和生物相容性,

是使用微生物作为细胞内碳和储能化合物,从可再生资源中生产的可生物降解的羟基链烷酸酯(HA)聚酯;目前在农业生产提高作物非生物胁迫抗性方面有应用案例报道<sup>[67]</sup>。

PHA合成菌株的基因工程和代谢工程优化、在开放条件下使用富集菌群发酵以及采用极端微生物合成特定PHA,以低品质废弃生物质为原料,在开放条件下利用富集菌群合成PHA的研究尤其受到关注,是废弃生物质高值资源化利用的一条重要途径<sup>[68]</sup>。利用下一代工业生物技术高效低成本地合成多样化的PHA材料有诸多进展。如重编程的假单胞菌和嗜盐单胞菌在PHA定制化低成本合成中的一些工程化技术和成果、产业化应用情况,并针对如何进一步降低生产成本及提高材料性能进行探索,以利于农业推广应用<sup>[69-70]</sup>。

未来的研究中需进一步提升PHA生产菌株的合成能力以及生产工艺的效率;有关基于富集菌群的PHA生产,需对菌群结构和功能调控进行深入研究,构建稳定高效的PHA合成菌群和工艺流程,以实现PHA的低成本合成和广泛应用<sup>[68]</sup>。

### 2.3 创新微生物类脂生物刺激剂产品的农业应用

创新微生物类脂生物刺激剂产品在农业领域的应用已从实验室走向规模化实践,以下是近年来具有代表性的具体案例:

1) 广谱抗逆促生的开创应用 由清华大学于慧敏教授团队联合北京衍微科技有限公司(以下简称衍微科技)开发的微生物类脂生物刺激剂,在全国20多个省(区、市)的40多种作物上完成测试,形成了“改土-调菌-抗逆促生”的系统性解决方案。(1)东北黑土地修复。在吉林松原的玉米田试验中,通过拌种和滴灌施用类脂制剂,土壤有机质含量提升12%,玉米苗期抗旱能力显著增强,在2024年夏季干旱期,处理组存活率达89%,较对照组提高37%,667 m<sup>2</sup>产量增加18.6%。(2)西北荒漠化治理。在宁夏毛乌素沙地的小米种植中,类脂生物肥料通过降低土壤表面张力(从72 mN/m降至48 mN/m),促进根系穿透沙层,使小米在年均降水量不足200 mm的条件下,667 m<sup>2</sup>产量达到320 kg,较传统种植模式提升53%。(3)巴林右旗盐碱地治理。向内蒙古巴林右旗捐赠的类脂生物肥料,通过调节土壤pH值(从8.5降至7.8)和改善团粒结构,使5 000亩盐碱地玉米出苗率从55%提升至82%,预计亩产增加20%。

衍微科技所开发的芽孢杆菌类脂生物刺激剂,

能够显著促进肥料吸收、调节植物代谢与生理状态、改善土壤菌群结构与肥力、增强农作物抗逆性,在全国25个地区、70余种农作物上实现了显著增产与品质改善,在四川、宁夏、黑龙江、辽宁等地的多项大田试验中已得到充分验证,具有作用浓度低、适用性广、性价比高、应用方便的优势。

2) 合成生物学驱动的精准应用 北京蓝晶生物科技有限公司利用合成生物技术开发的多生菌脂(聚羟基脂肪酸酯)产品,在农作物抗逆和土壤修复(盐碱地改良)中展现独特优势;多生菌脂(PHA)也适配复合肥、水溶肥等,可提高肥效。

## 3 微生物类脂生物刺激剂产品的综合作用机制及新进展

### 3.1 微生物类脂生物刺激剂的综合作用机制

微生物类脂生物刺激剂的作用机制是多维度、跨尺度的复杂过程。首先,微生物类脂(如糖脂、脂肽等)多具有两亲性结构(同时含亲水基团与疏水基团),改变界面活性(降低表面张力),突破生物屏障,促进养分溶解与转运,增强药剂/肥料的附着与渗透。其次,类脂分子可作为“信号分子”被植物细胞识别,通过调控激素代谢、基因表达等激活多重生理响应,促生长信号通路、抗逆信号激活。同时还通过重塑根际微生态和优化根际物理微环境,实现协同增效<sup>[31]</sup>。

### 3.2 微生物类脂生物刺激剂产品的作用机制新进展

新型微生物脂肽分子(medpeptin)的发现与机制解析为微生物类脂生物刺激剂的产品开发推广提供了科学依据<sup>[71]</sup>。中国农业科学院魏海雷团队从假单胞菌中鉴定出新型环状脂肽,其作用机制突破了传统植物免疫认知:有益假单胞菌产生的一种新型脂肽类植物免疫激发子及其调控植物免疫的功能机制。通过比较转录组和病毒诱导基因沉默(VIGS)技术,发现medpeptin通过激活植物细胞壁相关蛋白NbLRX3和NbRLK25,触发水杨酸(SA)和茉莉酸(JA)信号通路,而非依赖经典的BAK1/SGT1受体复合物。这一机制解析为设计非杀菌型免疫诱抗剂提供了全新靶点。基于该机制开发的免疫诱抗剂已在番茄、烟草等作物上验证,可使病原菌感染率降低40%~60%,且避免了传统杀菌剂对土壤微生物的破坏。

## 4 微生物类脂生物刺激剂产品面临的挑战和 application 前景

(1) 市场增长的驱动给微生物类脂生物刺激剂产品提供了广阔发展空间。2024年全球生物刺激

剂市场估计为43.6亿美元，预计2034年将达到128.5亿美元左右，2024—2034年的复合年平均增长率（CAGR）为11.42%。微生物类脂凭借其多功能性，在细分市场中占据独特地位。

(2) 多领域赋能农业可持续发展，对微生物类脂生物刺激剂产品在精准施肥、抗逆促生、土壤改良、生物农药替代等多方面提出了更高技术要求；合成生物技术加持，发酵工艺优化，助力农业碳中和及绿色农业发展。

(3) 技术突破与产业协同。利用多组学联用深入探讨脂肽合成的全局分子调控机制和加强结构域蛋白互作及分子动力学研究是提高脂肽产量和纯度以及创造新脂肽的理论基础；利用基因组学和编辑等合成生物学方法及代谢工程技术提高脂肽产量和挖掘新型脂肽靶向性的可能途径，为推进脂肽的生产和应用进程提供科学参考<sup>[64]</sup>。合成生物学手段改造非核糖体肽合成酶（NRPSs），以优化抗菌脂肽的合成效率<sup>[65]</sup>。

## 5 讨论与建议

### 5.1 不断突破技术瓶颈，抓住未来创新方向，拓展微生物类脂生物刺激剂增效策略

提高微生物类脂生物刺激剂的作用效果，需从产品本身优化（提升类脂活性与稳定性）、应用技术适配（精准匹配作物需求与环境）、环境协同调控（构建“类脂-土壤-植物-微生物”增效网络）3个维度入手，结合其作用机制（界面活性、信号调控、微生态重塑等），实现“精准释放-高效响应-协同增效”的闭环。

未来微生物类脂生物刺激剂创新方向包括精准配方设计、新型应用场景（垂直农业、采后保鲜）、碳中和路径。微生物类脂生物刺激剂增效策略可聚焦高产高活性菌株的定向筛选、发酵工艺的精准调控、剂型改良增强靶向性与抗逆性（微胶囊包埋技术、纳米乳液剂型、复配增效剂型）。

### 5.2 加快《生物刺激素 类脂》团体标准制定，精准法规适配性，引领行业科学健康发展

随着《生物刺激素 微生物功能性代谢物 通则》（T/CISIA 010—2025）<sup>[2]</sup>团体标准于2025年7月1日正式发布，对很多重要的微生物功能性代谢物，如类脂的团体标准制定就显得迫在眉睫。目前，除少数企业有相关类脂（生物糖脂、脂肽、聚酯）的企业标准外，无任何团体标准发布。该领域存在术语定义不统一、分类体系缺失、质控标准缺失等问题，导致产品功效差异显著、市场监管缺乏

依据，制约了微生物类脂生物刺激剂产品在农业中的科学应用与产业健康发展。

## 6 小结与展望

农用微生物类脂是一种多功能、安全、高效和环保的植物生长与土壤改良的生物刺激剂原料。微生物类脂生物刺激剂产品适用于各种农作物和其他植物，使用方法简单多样，方便与其他农药或肥料混合使用。微生物类脂生物刺激剂的开发与应用正从实验室走向规模化农业实践，其技术优势和生态价值显著。未来，随着合成生物学、纳米技术和物联网的深度融合，微生物类脂生物刺激剂产品将在抗逆增产、品质提升和环境修复等领域发挥核心作用。通过产学研协同解决生产稳定性、生态风险评估和法规适配性等挑战，微生物类脂有望在未来5~10年成为生物刺激剂市场的核心增长极，推动农业、环境生态等领域绿色可持续发展。

### [参考文献]

- [1] 中国无机盐工业协会.生物刺激素肽:T/CISIA 001—2024[S/OL]. [2025-07-20]. <https://www.ttbz.org.cn/StandardManage/Detail/107645/>.
- [2] 中国无机盐工业协会.生物刺激素微生物功能性代谢物通则:T/CISIA 010—2025[S/OL]. [2025-07-20]. <https://www.ttbz.org.cn/StandardManage/Detail/140337/>.
- [3] SILES J A, GOMEZ-PEREZ R, VERA R, et al. A comparison among EL-FAME, PLFA, and quantitative PCR methods to detect changes in the abundance of soil bacteria and fungi [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2024: 109557.
- [4] SU D, MARKUS L, JULIUS L, et al. Characteristics and origin of intact polar lipids in soil organic matter [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 151: 108045.
- [5] 杨明星,刘再华,孙海龙,等.基于生物标志物法的珠江流域有机碳溯源及DIC施肥效应研究[J].*地球与环境*, 2017, 45(1): 46-56.  
YANG M X, LIU Z H, SUN H L, et al. Organic Carbon Source Tracing and DIC Fertilization Effect in the Pearl River: Insights from Lipid Biomarker [J]. *Earth and Environment*, 2017, 45(1): 46-56.
- [6] RUPAL G, SRIJONI B, SOUMYA P, et al. A comprehensive review on enhanced production of microbial lipids for high-value applications [J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2021 (17): 15357-15380.
- [7] 周德庆.微生物学教程[M].北京:高等教育出版社,2011.
- [8] 李颖,美国华.微生物生理学[M].北京:科学出版社,2013.
- [9] 陈坚,堵国成,卫功元,等.微生物重要代谢产物[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [10] 战忠玲.农业微生物[M].北京:化学工业出版社,2009.
- [11] 闵九康,贺焕亮.生物质在现代农业中的重要作用[M].北京:化学工业出版社,2013.
- [12] 张嵩元,汪卫东.基因工程微生物合成鼠李糖脂表面活性剂的研究进展[J].*微生物学报*, 2021, 61(10): 3059-3075.

- ZHANG S Y, WANG W D. Recent advances in the production of rhamnolipid biosurfactant by genetically engineered microorganisms[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2021, 61(10): 3059-3075.
- [13] 崔长征, 沈萍, 张甲耀, 等. *Pseudomonas aeruginosa* W3产鼠李糖脂的结构表征及理化性质[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(10): 2030-2034.
- CUI C Z, SHEN P, ZHANG J Y, et al. Structural and physicochemical characterization of rhamnolipids produced by *Pseudomonas aeruginosa* W3[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(10): 2030-2034.
- [14] 张丽霞, 张虹, 卞立红, 等. 产表面活性剂菌株(QS-M2)的筛选及其特性研究[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2016, 21(4): 65-69.
- ZHANG L X, ZHANG H, BIAN L H, et al. Isolation and Characterization of Biosurfactant-Producing Bacteria QS-M2[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2016, 21(4): 65-69.
- [15] 肖鹏飞, 尤铁学, 宋玉珍, 等. 生物表面活性剂鼠李糖脂对白腐真菌降解DDTs的影响[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(2): 29-33.
- XIAO P F, YOU T X, SONG Y Z, et al. Effects of Biosurfactant Rhamnolipid on Biodegradation of DDTs by White Rot Fungus[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(2): 29-33.
- [16] 罗志刚, 杨欢, 齐亮. 生物表面活性剂鼠李糖脂性质的研究[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(1): 30-37.
- LUO Z G, YANG H, QI L. Study on the Properties of Rhamnolipids as Biosurfactants[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 50(1): 30-37.
- [17] 郭艳平, 林晖, 胡勇. 鼠李糖脂对17 $\alpha$ -炔雌醇生物降解过程的强化作用[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(7): 123-128.
- GUO Y P, LIN H, HU Y Y. Biodegradation Mode of 17 $\alpha$ -ethinylestradiol Affected by Rhamnolipidic Biosurfactant[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(7): 123-128.
- [18] 蓝梓铭, 莫创荣, 段秋实, 等. 鼠李糖脂对剩余污泥中铜和镍的去除[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(3): 1174-1178.
- LAN Z M, MO C R, DUAN Q S, et al. Removal of copper and nickel from excess sludge by rhamnolipid[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(3): 1174-1178.
- [19] 钟华, 曾光明, 黄国和, 等. 鼠李糖脂发酵液强化蔬菜基质好氧降解研究[J]. *环境科学与技术*, 2005(1): 9-11, 114.
- ZHONG H, ZENG G M, HUANG G H, et al. A study on enhancing aerobic biodegradation of vegetable substrate by rhamnolipid broth[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005(1): 9-11, 114.
- [20] 吴涓, 左珊珊. 糖脂类生物表面活性剂的特性及其对白腐真菌降解的强化作用[J]. *微生物学通报*, 2017, 44(6): 1286-1294.
- WU J, ZUO S S. Characteristics of glycolipids biosurfactant and its enhancement role in the biodegradation of anthracene by White Rot Fungi[J]. *Microbiology China*, 2017, 44(6): 1286-1294.
- [21] 施庆珊, 陈仪本, 欧阳友生. 微生物合成的糖脂类生物表面活性剂[J]. *精细与专用化学品*, 2006(20): 1-5.
- SHI Q S, CHEN Y B, OUYANG Y S. Glycolipids biosurfactants via microorganisms synthesis[J]. *Fine and Specialty Chemicals*, 2006(20): 1-5.
- [22] 吴洁婷, 赵若帆, 包红旭, 等. 鼠李糖脂强化多环芳烃微生物修复的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(1): 205-214.
- WU J T, ZHAO R F, BAO H X, et al. Research Progress on the Enhanced Microbial Remediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons with Rhamnolipids[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(1): 205-214.
- [23] 邢芳芳, 孟祥坤, 徐文凤, 等. 鼠李糖脂在农业上的应用研究[J]. *农业工程技术*, 2023, 43(16): 109-111.
- [24] 刘皓, 杨欢, 袁涛, 等. 脂肽-糖脂混合型生物表面活性剂的性能及助剂[J]. *化工进展*, 2013, 32(12): 2952-2956, 2960.
- LIU H, YANG H, YUAN T, et al. Characterization of a lipopeptide-glycolipid blend biosurfactant and the effect of alcohol cosurfactant[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2013, 32(12): 2952-2956, 2960.
- [25] 刘青芝, 郭学平, 朱希强. 槐糖脂的微生物合成及其应用研究进展[J]. *食品与药品*, 2009, 11(11): 51-55.
- LIU Q Z, GUO X P, ZHU X Q. Progress on Biosynthesis and Application of Sophorolipids[J]. *Food and Drug*, 2009, 11(11): 51-55.
- [26] 郭丽英, 彭富兴, 吉前华, 等. 槐糖脂的应用研究进展[J]. *食品工程*, 2023(1): 10-13.
- GUO L Y, PENG F X, JI Q H, et al. Application research progress of sophorolipid[J]. *Food Engineering*, 2023(1): 10-13.
- [27] 王俊芳, 黄秋斌, 张飘丹, 等. Surfactin的结构、生物合成及其在生物防治中的作用[J]. *生物技术通报*, 2024, 40(1): 100-112.
- WANG J F, HUANG Q B, ZHANG P D, et al. Structure and Biosynthesis of Surfactin as well as Its Role in Biological Control[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2024, 40(1): 100-112.
- [28] MANTIL E, CRIPPIN T, AVIS T J. Supported lipid bilayers using extracted microbial lipids: domain redistribution in the presence of fengycin[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2019: 94-102.
- [29] 刘向阳, 杨世忠, 牟伯中. 微生物脂肽的结构[J]. *生物技术通报*, 2005(4): 18-26.
- LIU X Y, YANG S Z, MOU B Z. Molecular Structures of Microbial Lipopeptides[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2005(4): 18-26.
- [30] 胡江春, 王楠, 潘华奇, 等. 海洋微生物抗菌脂肽及新生物农药研发[J]. *微生物学杂志*, 2013, 33(6): 1-5.
- HU J C, WANG N, PAN H Q, et al. Antimicrobial lipopeptides produced by marine microorganisms and new biopesticides research & development[J]. *Journal of Microbiology*, 2013, 33(6): 1-5.
- [31] 刘伟, 李英, 杜春梅. 微生物源脂肽的生物合成和分子调控[J]. *中国生物化学与分子生物学报*, 2022, 38(12): 1630-1639.
- LIU W, LI Y, DU C M. Biosynthesis and Molecular Regulation of Microbial Lipopeptides[J]. *Chinese Journal of Biochemistry and Molecular Biology*, 2022, 38(12): 1630-1639.
- [32] 高圣凤, 王锋, 刘爱勤, 等. *Bacillus subtilis* VD18R19脂肽类产物鉴定及其对胡椒花叶病的田间生防效果[J]. *热带农业科学*, 2019, 39(10): 89-94.
- [33] 陈梅春, 王阶平, 肖荣凤, 等. 地衣芽孢杆菌FJAT-4脂肽结构鉴定及其对尖孢镰刀菌的抑制作用[J]. *微生物学报*, 2017, 57

- (12):1924–1934.  
CHEN M C, WANG J P, XIAO R F, et al. Characterization of lipopeptides produced by *Bacillus licheniformis* FJAT-4 and their effect on *Fusarium oxysporum* [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2017, 57(12):1924–1934.
- [34] 祝林, 向文良, 张楠笛, 等. 甲基营养型芽孢杆菌拮抗玉蜀黍尾孢菌、链格菌和灰葡萄孢菌及环脂肽分析[J]. *微生物学报*, 2021, 61(3):644–654.  
ZHU L, XIANG W L, ZHANG N D, et al. Antagonism of *Bacillus methylotrophicus* against *Cercosporazeae-maydis* Tehon et Daniels, *Alternaria alternata* and *Botrytis cinerea* [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2021, 61(3):644–654.
- [35] 穆佳琪, 常昊天, 赵雨桐, 等. 桃园土壤甲基营养型芽孢杆菌 xj-C 产脂肽类及挥发性物质的分离与鉴定[J]. *北京农学院学报*, 2022, 37(3):25–30.  
MU J Q, CHANG H T, ZHAO Y T, et al. Isolation and identification of lipopeptides and volatile substances produced by *Bacillus methylotrophicus*xj-C in peach orchard soil [J]. *Journal of Beijing University of Agriculture*, 2022, 37(3):25–30.
- [36] 卫鑫辰, 刘易, 杨茹薇, 等. 马铃薯疮痂病拮抗菌 ZF517 的分离鉴定及生防效果初步研究[J]. *中国生物防治学报*, 2025, 41(2):411–422.  
WEI X C, LIU Y, YANG R W, et al. Isolation and Identification of *Bacillus subtilis* ZF517 and Its Control Effect on Potato Common Scab [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2025, 41(2):411–422.
- [37] 郑汉维, 谢文松, 牛世霖, 等. 摩氏假单胞菌环脂肽合成基因簇 xtlABC 的功能研究[J]. *中国生物防治学报*, 2024, 40(3):620–629.  
ZHENG H W, XIE W S, NIU S L, et al. Functional Study of Gene Cluster xtl ABC Producing Cyclic Lipopeptide in *Pseudomonas mosselii* Pt A1 [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2024, 40(3):620–629.
- [38] 荣哲, 吕凯旋, 王思佳, 等. 苏云金芽孢杆菌抗菌脂肽初步鉴定及抑菌活性测定[J]. *微生物学杂志*, 2023, 43(1):57–65.  
RONG Z, LYU K X, WANG S J, et al. Preliminary Identification and Antibacterial Activity of Antibacterial Lipopeptide from *Bacillus thuringiensis* [J]. *Journal of Microbiology*, 2023, 43(1):57–65.
- [39] 桑建伟, 杨扬, 陈奕鹏, 等. 内生解淀粉芽孢杆菌 BEB17 脂肽类和聚酮类化合物的抑菌活性分析[J]. *植物病理学报*, 2018, 48(3):402–412.  
SANG J W, YANG Y, CHEN Y P, et al. Antibacterial activity analysis of lipopeptide and polyketide compounds produced by endophytic bacteria *Bacillus amyloliquefaciens* BEB17 [J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2018, 48(3):402–412.
- [40] 王晶, 刘茗, 冯歌林, 等. 评价芽孢杆菌脂肽产量及底物碳利用效率的新方法[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, 36(6):1182–1189.  
WANG J, LIU M, FENG G L, et al. A new evaluation method of lipopeptide production and substrate carbon utilization efficiency using the WK1 strain of *Bacillus amyloliquefaciens* [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2019, 36(6):1182–1189.
- [41] 严婉荣, 肖敏, 陈圆, 等. 解淀粉芽孢杆菌抗菌脂肽研究进展[J]. *北方园艺*, 2018(7):162–167.  
YAN W R, XIAO M, CHEN Y, et al. Research Progress in Antimicrobial Lipopeptides of *Bacillus amyloliquefaciens* [J]. *Northern Horticulture*, 2018(7):162–167.
- [42] 余利, 王锦程, 谢亚杰, 等. 微生物源脂肽粗提物对克菌丹和代森锰锌增效活性[J]. *安徽科技学院学报*, 2022, 36(1):38–43.  
YU L, WANG J C, XIE Y J, et al. Synergistic Activity of Crude Extracts of Microbial Lipopeptides on Captan and Mancozeb [J]. *Journal of Anhui Science and Technology University*, 2022, 36(1):38–43.
- [43] 王猛, 吴含, 段海明, 等. 解淀粉芽孢杆菌 SJ1606 产脂肽粗提物协同代森锰锌对 2 种植物病菌的抑制效果[J]. *安徽农业大学学报*, 2024, 51(2):223–229.  
WANG M, WU H, DUAN H M, et al. Inhibitory effect of crude lipopeptide extracts from *Bacillus amyloliquefaciens* SJ1606 combined with mancozeb on two plant pathogens [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2024, 51(2):223–229.
- [44] 张荣胜, 王晓宇, 罗楚平, 等. 解淀粉芽孢杆菌 Lx-11 产脂肽类物质鉴定及表面活性素对水稻细菌性条斑病的防治作用[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(10):2014–2021.  
ZHANG R S, WANG X Y, LUO C P, et al. Identification of the Lipopeptides from *Bacillus amyloliquefaciens* Lx-11 and Biocontrol Efficacy of Surfactin Against Bacterial Leaf Streak [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(10):2014–2021.
- [45] 段海明, 李可文. 解淀粉芽孢杆菌 SJ06 脂肽粗提物与吡唑醚菌酯协同对玉米小斑病菌的抑制效果[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2020, 46(4):432–436.  
DUAN H M, LI K W. Synergistic inhibitory activity of crude lipopeptide extracts from *Bacillus amyloliquefaciens* strain SJ06 and pyraclostrobin against *Bipolaris maydis* [J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2020, 46(4):432–436.
- [46] 田丹丹, 周维, 李朝生, 等. 香蕉枯萎病拮抗菌 GKT04 产生的脂肽类抗生素的分离和鉴定[J]. *南方农业学报*, 2020, 51(5):1122–1127.  
TIAN D D, ZHOU W, LI C S, et al. Isolation and identification of lipopeptide antibiotic produced by *Bacillus amyloliquefaciens* GKT04 antagonistic to banana fusarium wilt [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2020, 51(5):1122–1127.
- [47] 崔皓玥, 田露, 胡乐梅, 等. 解淀粉芽孢杆菌 wxy-b3 产脂肽类物质对苹果斑点落叶病菌的抑菌活性研究[J]. *陕西科技大学学报*, 2025, 43(1):46–51.  
CUI H Y, TIAN L, HU L M, et al. Study on the antibacterial activity of lipopeptide produced by *Bacillus amyloliquefaciens* wxy-b3 against *Alternaria mali* [J]. *Journal of Shaanxi University of Science & Technology*, 2025, 43(1):46–51.
- [48] 范盈盈, 戴莹莹, 张媛媛, 等. 解淀粉芽孢杆菌脂肽提取物对番茄链格孢菌的抑菌机制研究[J]. *广东农业科学*, 2025, 52(3):1–13.  
FAN Y Y, DAI Y Y, ZHANG Y Y, et al. Study on Antifungal Mechanism of Lipopeptide Extract from *Bacillus amyloliquefaciens* Against *Alternaria alternata* in Tomato [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2025, 52(3):1–13.
- [49] 冀倩倩, 孙建东, 王健伟, 等. 渤海湾仿刺参养殖圈内贝莱斯芽孢杆菌 B-VE 的分离鉴定及其产抗菌脂肽的研究[J]. *微生物学杂志*, 2021, 41(3):21–30.

- Ji Q Q, SUN J D, WANG J W, et al. Isolation and Identification of *Bacillus velezensis* Strain B-VE from Sea Cucumber Breeding Environment in Bohai Bay and Study on Its Antimicrobial Lipopeptides [J]. *Journal of Microbiology*, 2021, 41(3):21-30.
- [50] 杨然迪, 杨怡妍, 曹灏, 等. 贝莱斯芽孢杆菌 TCS001 产脂肽类物质抑菌活性及发酵条件优化 [J]. *农药学报*, 2024, 26(3):504-516.
- YANG R D, YANG Y Y, CAO H, et al. Antifungal activity and fermentation optimization of lipopeptides produced by *Bacillus velezensis* TCS001 [J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2024, 26(3):504-516.
- [51] 崔文艳, 罗喜燕, 张佳佳, 等. 贝莱斯芽孢杆菌 B9601-Y2 对金银花叶斑病的防控效果 [J]. *中国生物防治学报*, 2024, 40(6):1347-1354.
- CUI W Y, LUO X Y, ZHANG J J, et al. Efficacy of *Bacillus velezensis* B9601-Y2 on Leaf Spot Disease of Honeysuckle [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2024, 40(6):1347-1354.
- [52] 穆晓清, 鲁耀雄, 戴良英, 等. 贝莱斯芽孢杆菌 YFB3-1 对辣椒疫霉的抑菌效果及其抑菌物质 [J]. *农业生物技术学报*, 2024, 32(4):859-872.
- MU X Q, LU Y X, DAI L Y, et al. Antibacterial Effect of *Bacillus velezensis* YFB3-1 on *Phytophthora capsici* and Its Antibacterial Substances [J]. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 2024, 32(4):859-872.
- [53] 张晓云, 王雪美, 丛蓉, 等. 防治葡萄灰霉病的贝莱斯芽孢杆菌 HMB28023 筛选及其抑菌物质 [J]. *中国生物防治学报*, 2025, 41(1):122-131.
- ZHANG X Y, WANG X M, CONG R, et al. Screening of *Bacillus velezensis* HMB28023 for Controlling Grape Gray Mold and Identification of Its Antifungal Active Compounds [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2025, 41(1):122-131.
- [54] 李紫英, 沙帅帅, 唐御忻, 等. 贝莱斯芽孢杆菌 SY01 诱导苹果树抗性基因表达及其脂肽类抑菌物质分析 [J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2024, 55(5):711-719.
- LI Z Y, SHA S S, TANG Y X, et al. Expression of Resistance Genes Induced by *Bacillus Velezensis* SY01 in Apple Trees and Analysis of its lipopeptide Inhibitory Substances [J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2024, 55(5):711-719.
- [55] 杨冰, 杜春梅. 贝莱斯芽孢杆菌次生抗生物质的研究进展 [J]. *中国生物防治学报*, 2022, 38(2):502-512.
- YANG B, DU C M. Review on Secondary Antibiotic Metabolites of *Bacillus velezensis* [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2022, 38(2):502-512.
- [56] 李珊, 杜春梅. 脂肽对稻瘟病菌几丁质酶和葡聚糖酶的影响 [J]. *植物病理学报*, 2021, 51(5):789-795.
- LI S, DU C M. Effects of lipopeptide on chitinase and glucanase of *Magnaporthe grisea* [J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2021, 51(5):789-795.
- [57] 王珺, 郭庆港, 苏振贺, 等. 脂肽类抗生素 fengycin 对大丽轮枝菌孢子萌发和微菌核形成的影响 [J]. *植物病理学报*, 2020, 50(6):739-747.
- WANG J, GUO Q G, SU Z H, et al. Effect of fengycin produced by *Bacillus subtilis* NCD-2 on the conidial germination and microsclerotia formation of *Vorticillium dahlia* [J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2020, 50(6):739-747.
- [58] 苗永美, 苗翠苹, 于庆才. 枯草芽孢杆菌 BBs-27 发酵液性质及脂肽对黄色镰刀菌的抑菌作用 [J]. *生物技术通报*, 2023, 39(9):255-267.
- MIAO Y M, MIAO C P, YU Q C. Properties of *Bacillus subtilis* Strain BBs-27 Fermentation Broth and the Inhibition of Lipopeptides Against *Fusarium culmorum* [J]. *Biotechnology Bulletin*, 2023, 39(9):255-267.
- [59] 黄满, 李焕梅, 胡靖, 等. 两株芽孢杆菌脂肽粗提物对马铃薯致病疫霉抑菌效果的研究 [J]. *食品与发酵工业*, 2025, 51(3):97-103.
- HUANG M, LI H M, HU J, et al. Study on the antibacterial effect of two *Bacillus* lipopeptide crude extracts on potato *Phytophthora infestans* [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2025, 51(3):97-103.
- [60] 李明通, 孟凡强, 周立邦, 等. 生姜根腐病的病原菌鉴定及抗菌脂肽的防治效果 [J]. *南京农业大学学报*, 2020, 43(6):1134-1142.
- LI M T, MENG F Q, ZHOU L B, et al. Identification of the pathogen of ginger root rot and the control efficiency of antifungal lipopeptides [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2020, 43(6):1134-1142.
- [61] 李兴玉, 毛自朝, 吴毅歆, 等. 芽孢杆菌环脂肽类次生代谢产物的快速检测 [J]. *植物病理学报*, 2014, 44(6):718-722.
- LI X Y, MAO Z C, WU Y X, et al. Rapid detection of cyclic lipopeptide metabolites from *Bacillus* [J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2014, 44(6):718-722.
- [62] 朱洪磊, 马超, 郭洁心, 等. 芽孢杆菌抗菌肽调控基因的 PCR 检测及其抑菌活性 [J]. *山西农业科学*, 2020, 48(3):304-308.
- ZHU H L, MA C, GUO J X, et al. PCR Detection of Regulation Gene of Antibacterial Lipopeptide from *Bacillus* sp. and Its Antifungal Activity [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2020, 48(3):304-308.
- [63] 陈莉, 张免棋, 戴婷, 等. 芽孢杆菌脂肽类抗生素的抑菌活性及其对植物病害的生物防效研究 [J]. *农业灾害研究*, 2024, 14(2):25-27.
- [64] 刘伟, 李英, 杜春梅. 微生物源脂肽的生物合成和分子调控 [J]. *中国生物化学与分子生物学报*, 2022, 38(12):1630-1639.
- LIU W, LI Y, DU C M. Biosynthesis and Molecular Regulation of Microbial Lipopeptides [J]. *Chinese Journal of Biochemistry and Molecular Biology*, 2022, 38(12):1630-1639.
- [65] 赵艺博, 丰宇, 王娟萍, 等. 抗菌脂肽的生产工艺优化及其应用进展 [J]. *生物技术*, 2025, 35(2):254-260.
- ZHAO Y B, FENG Y, WANG J P, et al. Research progress on the production process optimization and application of antimicrobial lipopeptides [J]. *Biotechnology*, 2025, 35(2):254-260.
- [66] ANJUM A, ZUBER M, ZIAKM, et al. Microbial production of polyhydroxyalkanoates (PHAs) and its copolymers: A review of recent advancements [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016:161-174.
- [67] 魏继华, 刘越, 李佳益, 等. 中短链聚羧基脂肪酸酯的低成本生产与应用 [J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(16):39-45.
- WEI J H, LIU Y, LI J Y, et al. Low-cost production and