

Research Development of Microbial Antagonists against Plant Disease

Jiamin Chen^{1,2}, Weixuan Guan³, Jieqian Zhu^{1,2}, Mi Wei^{1*}, Benzhong Fu¹, Guoyuan Li¹

¹Hubei Key Laboratory of Quality Control of Characteristic Fruits and Vegetables, College of Life Science and Technology, Hubei Engineering University, Xiaogan Hubei

²School of Life Science, Hubei University, Wuhan Hubei

³College of Chemistry and Materials, Hubei Engineering University, Xiaogan Hubei

Email: *weimi555@163.com, 1002359952@qq.com

Received: May 22nd, 2017; accepted: Jun. 9th, 2017; published: Jun. 12th, 2017

Abstract

The microbial biocontrol agents are rich in natural resources, and ecofriendly in application, it is an important factor in plant diseases management. The recent development of microbial antagonists against plant disease pathogens were reviewed in this paper, including the origins, species, and antimicrobial substances of the microbes, as well as the biocontrol mechanisms were discussed. Furthermore, we afforded that the genetic breeding and modification, and multiple microbes, would be the prospective techniques to improving the efficiency of them in research and application in the future.

Keywords

Microbial Biocontrol, Origin, Species, Active Substance, Biocontrol Mechanism

植物病害生防菌株的研究进展

陈嘉敏^{1,2}, 管维轩³, 朱洁倩^{1,2}, 魏 蜜^{1*}, 傅本重¹, 李国元¹

¹湖北工程学院, 生命科学技术学院/特色果蔬质量安全控制湖北省重点实验室, 湖北 孝感

²湖北大学, 生命科学学院, 湖北 武汉

³湖北工程学院, 化学与材料科学学院, 湖北 孝感

Email: *weimi555@163.com, 1002359952@qq.com

收稿日期: 2017年5月22日; 录用日期: 2017年6月9日; 发布日期: 2017年6月12日

摘 要

生防菌株资源丰富, 具有对环境友好的优点, 在植物病害绿色防治上具有重要作用。本文简要介绍了近*通讯作者。

年来植物病害通过生防菌进行生物防治的国内外研究进展, 包括生防菌株的来源、种类、抑菌物质以及对植物病害的生防机制, 提出了对生防菌株进行基因改造、诱变育种和菌剂复配可能成为今后技术研究的重点。

关键词

生防菌株, 来源, 种类, 抑菌物质, 生防机制

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前, 生产上大量使用化学药剂防治病害, 其效果明显, 但也存在一系列问题, 如污染环境、农药残留和产生抗药性等。生物防治是用微生物代替化学药剂通过生物之间的相互作用来抑制病原菌的生长, 从而达到防治效果。这种方法对人畜无害、可再生性强, 符合当前我国农业和环境可持续发展的要求。因此, 研究生物防治技术不仅可以减少化学防治带来的污染问题, 而且能满足人们对绿色食品安全生产的要求。

国内外很多学者对生防菌株已经展开大量的研究, 如刘畅[1]等从根际土中筛选出一株哈茨木霉 YCG-2 对烟草疫霉的防治效果最高可达 84.34%。李宛泽[2]等从发病土壤中筛选出 7 株有防治效果的细菌菌株, 其中菌株 G3 对玉米茎腐病的防治效果达 78.3%。Chen 等[3]发现生防菌株 B579 的无菌培养液可导致黄瓜枯萎病菌菌丝畸形, 抑制孢子萌发, B579 培养液灌根接种防治效果可达 73.6%。然而, 对于生防菌株的来源, 分类和防治机制目前尚未有全面的总结, 尤其针对生防菌株的抑菌物质还缺乏较为系统的归纳报道, 本研究基于前人的研究进展, 从下述几个方面进行综述, 以期为进一步开展生防菌的研究提供参考。

2. 生防菌株

2.1. 生防菌株的来源

2.1.1. 植物内生菌

植物内生菌是存在于在健康的植物组织或器官内的真菌或细菌, 在宿主植物组织内部广泛分布, 可与病菌直接作用, 且内生菌生活在植物内部, 不会受外界环境影响, 生态环境较稳定, 还会产生与宿主植物代谢物质相同或相似的活性物质, 因此能够更有效地提高植物的抗病性。除此之外, 还有专一性的特点, 只对宿主植物内的病原微生物起防治作用。因此具有作为生物农药开发的优良特性。自 1898 年 Vogl 从黑麦草种子内分离出第一株内生真菌以后, 从植物中寻找和发现新的微生物资源就引起了研究学者的广泛关注。国内外大量研究表明植物内生菌是植物土传病害防治的天然有效菌。如 Ma [4]等从石榴树中分离的一株内生枯草芽孢杆菌 NS03 对石榴干腐病有很强的拮抗作用, 抑制率达到 99.5%。Hahm [5]等也从白菜组织中分离出一株黄杆菌属内生细菌 EPB-C313, 对根肿病有一定的抑制作用。

2.1.2. 植物根际微生物

植物根际微生物是植物生防菌的主要来源, 它是指紧密环绕植物根系的区域范围内生长繁殖的微生物。

物, 其中能够防治植物病虫害、促进作物生长、增加产量的微生物被称作促生根际菌, 可合成对植物生长发育有促进作用的物质或促进植物对土壤中的营养物质的吸收利用, 对有些病原微生物有抑制作用或减轻某些植物病害。土壤中存在多种多样的微生物, 这为我们从土壤中筛选生防菌株提供了保证, 取样时应在发病地中找无发病症状或发病症状轻的植株的根际土壤, 以加大筛选出生防菌的成功率。有学者从种植商品品种且无根肿病症状的土壤中分离得到 25 株对根肿菌有抑制作用的木霉属生防菌株[6]。苏婷等[7]也从不同地区土壤中分离出生防菌株 596 株。

2.1.3. 特殊环境微生物

极端环境微生物是指在高碱、高盐、高酸、极端高低温、高压、强辐射等极端条件下生存的微生物。它们在适应极端生存环境时, 通过环境淘汰和自身进化, 使结构强且稳定, 并形成了自身独有的生物活性物质、合成或代谢途径、调控机制和遗传基因等。这些微生物为在极端恶劣的环境生存而产生的特殊生物活性物质(抗生素和极端酶等)能够在植物病害生物防治过程中起到有效的防治作用, 成为生物菌肥和生物农药研发与应用的重要菌株资源。1972 年 Okazaki 等首次从海洋分离到一株产生抗生素的嗜盐放线菌[8], 谢永丽[9]等在青海昆仑山口冻土荒漠区获得 7 株能在 4℃ 和 10℃ 低温的条件下生长的菌株, 对油菜菌核病原菌及水稻白叶枯病原菌具有显著拮抗效果。

2.2. 生防菌株的种类

2.2.1. 生防真菌

生防真菌主要包括木霉菌、毛壳菌、淡紫拟青霉菌以及厚壁孢子轮枝菌、菌根真菌、酵母菌等(见表 1)。木霉菌在根际土壤, 植物表面广泛存在, 是生物防治研究、利用最多的生防真菌, 应用前景广阔。毛壳菌对立枯丝核菌、镰刀菌、毛盘孢属、拟茎点霉属、交链孢属及葡萄孢属病原菌引起的枯萎病、根腐病、猝倒病以及斑点病等病害有明显的抑制作用[10]。其中淡紫拟青霉是拟青霉中研究最广泛的, 可有效防治植物寄生线虫, 还能够有效防治根结线虫和胞囊线虫等[11][12]。

2.2.2. 生防细菌

生防细菌主要包括芽孢杆菌属、假单胞菌属、土壤杆菌属、沙雷氏菌、巴斯德菌属等(见表 2)。生防细菌中研究最多的是芽孢杆菌属, 其抑菌广谱性好, 对植物根、茎、叶、花和果等部位发生的病害都有抑制作用, 范围非常广, 是理想的生防菌株。

2.2.3. 生防放线菌

放线菌是人们最早研究发现具有生防效果的微生物并应用到生产中, 其生防作用主要靠菌株产生生物活性物质, 这种微生物资源在生物防治上用途广泛, 实际应用性好。其中链霉菌属和其相似类群在植物病害生物防治中是最主要的资源。而链霉菌是抗生素产生菌的主要来源, 其中约 80% 的活性物质产生的抗生素应用在农业生产上。链霉菌制成的可用菌剂已有多种被应用于实际生产, 如链霉素、井冈霉素、农抗 120、多效霉素、S-921 等。可抑制多种病原菌, 如葡萄孢菌、杨树腐烂病菌、灰霉病菌以及白菜软腐病菌等[29]。

2.2.4. 病毒的弱毒株系

病毒的弱毒株系可通过人工诱变进行筛选, 其生防原理是将没受病毒侵染的植株接种弱毒株系, 植株没有不好的症状表现, 而且还能对受侵害的强株系产生抗性, 使之不会受病毒侵害或症状减轻, 达到防治作用。使用病毒的弱毒株系来抑制病毒病已有研究并用于实践, 如曹赐生[30]研究发现防治稻白叶枯病的弱毒株 75-1。

Table 1. Main biocontrol fungi and control objects**表 1.** 主要生防真菌及防治对象

主要真菌	防治对象	参考文献
木霉菌	番茄、观赏百合、黄瓜的立枯病、猝倒病、根腐病、灰霉病、霜霉病以及小麦的纹枯病等	[13]
毛壳菌	苹果炭疽病、杨树腐烂病、苹果树腐烂病、玉米大斑病等	[14]
淡紫拟青霉菌以及厚壁孢子轮枝菌	南方根结线虫、番茄根结线虫、大豆孢囊线虫等	[12] [15] [16]
酵母菌	苹果和草莓灰霉病、青霉病、梨毛霉病菌等	[17] [18]
菌根真菌	根结线虫病、翠菊黄化植原体等	[19] [20]

Table 2. Main biocontrol bacteria and control objects**表 2.** 主要生防细菌及防治对象

主要细菌	防治对象	参考文献
芽孢杆菌	番茄枯萎病、黄瓜枯萎病、西瓜枯萎病、青椒枯萎病、辣椒疫霉病、番茄青枯病、苹果腐烂病等	[21]
假单胞菌	香蕉枯萎病、烟草花叶病、番茄灰霉病等	[22] [23]
土壤杆菌	桃、樱桃、玫瑰等果树根癌病、香石竹萎焉病、小麦全蚀病等	[24]
沙雷氏菌	向日葵菌核病、生姜青枯病、烟草花叶病毒等	[25] [26] [27]
巴斯德菌	根结线虫	[28]

2.2.5. 噬菌体

噬菌体是可以感染细菌、真菌、放线菌或螺旋体等微生物的病毒，噬菌体的特异性强，只对宿主菌进行裂解，且不会破坏一些正常菌群；噬菌体可产生大量的子代噬菌体，但增殖周期较短，可快速、有效的治疗疾病；在噬菌体将病原菌裂解之后形成空斑，噬菌体会随着病原菌的死亡而自动消除，不会对宿主造成危害[31]。如 Fujiwara 等[32]发现噬菌体 Φ RSL1 对抑制青枯病有显著作用。

3. 生防菌株的防治机制

生防菌株的生防机制多种多样，如拮抗作用、寄生作用、竞争作用、诱导抗性等。由于大量的生防菌株都是在实验室中获得，而农田中的环境条件多种多样，不排除是有两种或者多种防治机制共同作用或其中一种机制在植物不同生长阶段或不同部位起相应作用。

3.1. 拮抗作用

拮抗作用是指在同一空间一种或多种微生物在生存过程中，通过同化作用分泌的抗菌物质(抗生素、细胞壁降解酶类、细菌素和其它抗菌蛋白及挥发性抑菌物质)改变其生存环境，从而抑制有害病原物的生长或发展或直接杀死另一种微生物的现象[33]。Avinash 和 Alya [34] [35]分别对 2 种蜡状芽孢杆菌的代谢产物进行了研究，证明其代谢产物对其他的病原体产生拮抗作用，起到生物防治的作用；Yanez-Mendizabal [36]等研究发现，由枯草芽孢杆菌 CPA-8 代谢所产生的类丰宁素家族的脂肽对桃褐腐病菌也具有显著的拮抗作用($P < 0.05$)。

3.2. 寄生作用

重寄生现象是指生防菌侵入到病原菌体内，生防菌株分泌的某些活性物质被病原菌物识别后，会紧

密缠绕病菌的菌丝生长，并产生形似吸盘的附着胞状分枝吸附于病原菌的菌丝上，通过分泌胞外水解酶(几丁质酶、葡聚糖酶、纤维素酶、半纤维素酶、脂酶和淀粉酶等)降解病原菌细胞壁，穿透病原菌菌丝吸取病菌的营养，或使菌丝断裂或解体，使其生长受阻或细胞死亡[37]。除了几丁质酶和葡聚糖酶外，蛋白酶也能起到降解病原菌的和消解植物细胞壁的重要作用，使病原菌的酶钝化，阻止病原菌侵入植物细胞，从根本上抑制病原菌的侵染。如杨蕾[38]等发现菌株 YGF9 和 LX6F2 产生的葡聚糖酶和蛋白酶，均可导致病原菌芽管、孢子变短、扭曲畸形，使孢子失去侵袭能力，从而抑制杨树溃疡病。

3.3. 竞争作用

竞争作用是指一种或多种微生物群体间在共同生存条件下的对资源不足而发生的争夺现象。主要包括空间竞争和营养竞争，其中空间竞争，是指可在植株体内定植生长繁殖快、对植株无害的生防菌株，使其布满植株容易感染病菌的位置形成保护膜，间接有效地抑制病原微生物的定殖与侵染，从而抑菌抗病。Timmusk [39]等在研究拟南芥病害菌时，发现两株多粘类芽孢杆菌 B1 和 B2，这两个菌株可以在拟南芥根部细胞间隙定殖，并形成生物保护膜，有效地防止病菌的侵入；营养竞争，是指接种生长快、耗营养的生防菌，但不侵害健康部位，导致病原菌营养缺乏而受抑制。营养竞争发现较少，Shoda [40]发现有些生防菌株可以分泌一种铁载体与植物病原菌竞争铁元素，造成病原菌营养不足，从而抑制病原菌的生长，达到防治作用。

3.4. 诱导抗性

诱导植物产生抗性是生防细菌发挥生防作用的一个重要方面，植物本身具有一定的抗病性，生防菌株可以激发抗病潜能增强植物抗病性，或通过自身合成多种不同的生长激素来促进植物其根系的生长，且在极低浓度下就可产生明显的生理效应并影响植物的生长态势，从而起到防止病害发生的作用，间接防治病害发生。赵玉华[41]等发现从樟树中筛选出一株内生枯草芽孢杆菌 EBS05，能诱导烟草系统抗性。还有研究发现生防菌株 TB2 和赤腐病菌均能诱导甘蔗叶片中的防御酶活性增强[42]。

4. 生防菌株抑菌物质

4.1. 核糖体合成的抗菌物质

4.1.1. 细菌素

细菌素是细菌产生的对其他微生物具有抗生作用的代谢产物，主要成分是小分子量蛋白质，这类物质对同源种或相近种的细菌具有特异性的抑菌效果。当细菌素与细菌结合并进入细菌细胞后，细菌素可以通过扰乱蛋白质合成，破坏脱氧核糖核酸稳定性以及能量流出或膜的完整性等方式杀死病原菌。Foldes 等[43]从谷类的根际分离到 1 株枯草芽孢杆菌 IFS201，其对食品腐败病原菌中的霉菌、酵母、细菌都有一定的抑制作用。李金云[44]等发现生防菌 E26 所产生的细菌素对茄科青枯病菌、番茄疮痂病菌、水稻白叶枯病菌、棉花细菌性角斑病菌和白菜软腐病菌等均有较好的抑制作用。

4.1.2. 酶类

大多病原真菌细胞壁含有几丁质、蛋白酶、脂酶和 β -1,3-葡聚糖等。很多生防菌就通过分泌几丁质酶和 β -1,3-葡聚糖酶降解破坏其细胞壁，它们的协同作用较强，通过水解 $\beta(1\rightarrow3)$ 糖苷键，破坏病原真菌的细胞壁而达到抗菌防病作用。目前，研究较多的微生物代谢酶类有几丁质酶、 β -1,3-葡聚糖酶、蛋白酶、纤维素酶等。如 Ashwini [45]等从辣椒根际分离的一株枯草芽孢杆菌 OGC1，通过分泌几丁质酶、纤维素酶、葡聚糖酶和其他溶真菌等活性物质对病原菌菌丝溶解和真菌细胞壁降解，对辣椒炭疽病进行防治。Zhao [46]等从小麦籽粒和植物花药中分离出的枯草芽孢杆菌 SG6 对禾谷镰刀菌引起的赤霉病抑制率达

87.9%，研究表明 SG6 的抗真菌活性可能与几丁质酶相关。

4.1.3. 其他活性蛋白质类

近年来我国有很多分离纯化出未知拮抗蛋白的报道，李晶[47]等研究发现，从枯草芽孢杆菌 B29 菌株分离纯化得到抗菌蛋白 B29I，分子质量约为 42.30 ku，该蛋白可使黄瓜枯萎病菌孢子的萌发时间推迟，并可抑制菌丝的生长。对其进行质谱分析，获得该蛋白的肽指纹图谱，初步确定该蛋白为一种新蛋白。余惠荣[48]等对生防菌株 B8 产生的抑菌物质进行了分离纯化得到分子量约在 11.2 kDa 的抑菌蛋白。通过比对匹配后，推测此抑菌蛋白可能是一种新的物质。

4.2. 非核糖体合成的抗菌物质

4.2.1. 脂肽类

脂肽类的作用原理是其对细胞膜结构特性的影响，使病原菌的细胞膜通透性发生变化来抑制其生长。其中表面活性素还具有抗病毒、抗真菌和抗细菌活性，逐渐受到农业、工业和医疗应用方面的关注。张华[49]等研究发现菌株 B10-26 发酵液对芝麻茎点枯病菌的抑菌率达到 90% 以上，初步推测该菌株所产生的抑菌活性物质是脂肽类抗生素。王继良[50]等从枯草芽孢杆菌 SYL-6 菌株的发酵上清液中提取出一种脂肽类化合物对致病疫霉、梨生囊孢壳、尖镰孢菌黄瓜专化型、尖镰孢菌萎蔫专化型、灰葡萄孢以及立枯丝核菌等多种植物病原真菌具有明显的抑制作用。

4.2.2. 多肽类

多肽抗生素有线状、环状和分支环状 3 类，短杆菌肽和伊短菌素是短芽孢杆菌产生的线状抗真菌。短肽短杆菌肽 S 和短杆菌酪肽是短芽孢杆菌产生的环状短肽抗生素，分支的环肽抗生素包括多黏菌素、八肽霉素，它们主要作用于细菌。如汤谷月[51]等发现辣椒榕杆菌 X2-3 产生的抗菌物质对蛋白酶 K 不敏感、耐热，推测可能是一种环形肽。陈洁梅[52]等发现解淀粉芽孢杆菌 KN-BL-1 能产生具有抑菌作用的多肽类物质，通过质谱法发现了不同分子量的多肽，还需对有抑菌作用的多肽进一步研究确认。

4.2.3. 其他类别物质

还有一些其他类别物质未被鉴定，如 Tamehiro [53]等在 168 菌株细胞中积累的一种未被发现的磷脂类抗生素，对一些真菌如白念珠菌、黑曲霉、红色毛癣菌等有显著的抑菌活性。

5. 展望

研究至今，无论国内还是国外都已筛选出大量的生防菌株，很多是被直接用来在大田防治病害，其活性和效果稳定性都会降低。只有通过发酵、提取和纯化其抗菌物质，才能将生防菌株变成真正应用于农田的有效生物农药。另外，仅仅通过自然选育和人工分离筛选生防菌株已不能满足现今需求，为了加强生防菌株的活性物质和拮抗性物质，我们使用基因工程技术对生防菌株进行基因改造或进行诱变育种使微生物的遗传物质发生改变，已成为获得新型高效生防菌株的重要手段。这种方法可以使生防菌株广谱性增强、遗传更稳定、活性更持久、损伤轻，更易获得优质新种质[54]。如张鸿[55]等将带有 GFP 绿色荧光蛋白基因的 T-DNA 随机插入到蔓割病菌基因组中，获得 711 个突变体。经过致病力筛选，获得了 3 株非致病突变体，均可和蔓割病菌发生营养竞争作用。顾鹏飞[56]用离子注入法，筛选出性状优良的高效生防菌株 CM-5。由此可见，利用基因工程手段或诱变育种获得高抗的植物植株是将来生防技术的一个研究方向。

还有研究表明，生防菌剂的复配效果比单一生防菌剂的生防效果要好，生防菌可以不同种类间复配，也可以与次生代谢产物复配，多种生物因子间的复配可以使防治系统多功能化，提高生防的效果和稳定

性。甘良[57]等发现将三株生防菌株 153、SC11、SF6 复配相比单菌株对西瓜枯萎病拮抗效果更显著,并有一定的促生效果。因此,对生防菌株的基因改造、诱变育种和菌剂复配的研究将有可能成为今后研究的重点。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(31600055);湖北省自然科学基金项目(2016CFB204);特色果蔬质量安全控制湖北省重点实验室开放基金重点资助项目(2016K07)。

参考文献 (References)

- [1] 刘畅, 许家来, 郭凯, 等. 烟草黑胫病生防菌的筛选鉴定及发酵条件优化[J]. 江苏农业科学, 2016, 45(5): 167-170.
- [2] 李宛泽, 郭月霞, 王忠武. 玉米茎腐病生防菌的筛选鉴定及最佳培养条件研究[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(3): 148-149.
- [3] Chen, F., Wang, M., Zheng, Y., *et al.* (2010) Quantitative Changes of Plant Defense Enzymes and Phytohormone in Biocontrol of Cucumber Fusarium Wilt by *Bacillus Subtilis*, B579. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, **26**, 675-684. <https://doi.org/10.1007/s11274-009-0222-0>
- [4] Ma, Y., Tan, X., Liu, J., *et al.* (2015) Identification of an Endophytic Biocontrol Strain NS03 and Its Efficacy in Controlling Pomegranate Dry Fruit Rot Disease. *Acta Horticulturae*, **1089**, 145-151.
- [5] Hahm, S.S., Kim, J.T., Han, K.S., *et al.* (2012) Biocontrol Efficacy of Endophytic Bacteria *Flavobacterium hercynim* EPB-C313 for Control of Chinese Cabbage Clubroot. *Research in Plant Disease*, **18**, 210-216. <https://doi.org/10.5423/RPD.2012.18.3.210>
- [6] Cheah, L.H., Page, B.B.C., Cheah, L.H., *et al.* (1997) *Trichoderma* SPP. for Potential Biocontrol of Clubroot of Vegetable Brassicas. *Proceedings of the New Zealand Plant Protection Conference*. Christchurch, 11-13 August 1997, 150-153.
- [7] 苏婷, 路梅, 周青, 等. 抗不同生化型青枯菌的生防菌筛选鉴定及其活性分析[J]. 植物保护学报, 2010, 37(5): 431-435.
- [8] Okazaki, T. and Okami, Y. (1972) Studies on Marine Microorganisms. II. Actinomycetes in Sagami Bay and Their Antibiotic Substances. *Journal of Antibiotics*, **25**, 461-466. <https://doi.org/10.7164/antibiotics.25.461>
- [9] 谢永丽, 马莉贞, 徐志伟, 等. 冻土荒漠区分离低温适生 PGPR 菌的鉴定及其抗菌促生特性[J]. 中国生物防治学报, 2014, 30(1): 94-100.
- [10] Kloepper, J.W., Leong, J., Teintze, M., *et al.* (1980) Enhanced Plant Growth by Siderophores Produced by Plant Growth-Promoting Rhizobacteria. *Nature*, **286**, 885-886. <https://doi.org/10.1038/286885a0>
- [11] 赵培静, 任文彬, 缪承杜, 等. 淡紫拟青霉研究进展与展望[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(30): 9672-9674.
- [12] 王昌家, 宋超英, 张新德, 等. 淡紫拟青霉菌料防治大豆胞囊线虫的后效研究[J]. 中国生物防治学报, 1997, 13(1): 26-28.
- [13] 陈捷, 龚恺, 高永东, 等. 木霉菌在玉米病害生物防治中的作用机制及应用(英文)[J]. 菌物学报, 2014, 33(6): 1154-1167.
- [14] 许秀兰, 黄晓丽, 张翅, 等. 云杉内生优势毛壳菌的筛选及其生防机制研究[J]. 中国生物防治学报, 2014, 30(4): 511-519.
- [15] 林茂松, 沈素文. 厚壁孢子轮枝菌防治南方根结线虫研究初报[J]. 中国生物防治学报, 1994, 10(1): 7-10.
- [16] 聂海珍, 孙漫红, 李世东, 等. 棉隆与淡紫拟青霉联合防治番茄根结线虫病的效果评价[J]. 植物保护学报, 2016, 43(4): 689-696.
- [17] 范青, 田世平, 徐勇. 丝孢酵母对苹果采后灰霉病和青霉病抑制效果的影响[J]. 中国农业科学, 2001, 34(2): 163-168.
- [18] 程根武, 王勇, 杨秀荣, 等. 拮抗酵母菌用于产后病害生物防治的研究进展[J]. 天津农业科学, 2002, 8(1): 44-46.
- [19] Vos, C., Claerhout, S., Mkandawire, R., *et al.* (2012) Arbuscular Mycorrhizal Fungi Reduce Root-Knot Nematode Penetration through Altered Root Exudation of Their Host. *Plant & Soil*, **354**, 335-345. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1070-x>
- [20] Kamińska, M., *et al.* (2010) Effect of Arbuscular Mycorrhizal Fungi Inoculation on Aster Yellows Phytoplasma-In-

- fected Tobacco Plants. *Scientia Horticulturae*, **125**, 500-503. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.04.027>
- [21] 郭珺, 武爱莲, 闫敏, 等. 芽孢杆菌 Pb-4 菌株鉴定及其抑菌活性的研究[J]. 华北农学报, 2016, 31(2): 224-230.
- [22] 严婉荣, 赵廷昌, 肖彤斌, 等. 生防细菌在植物病害防治中的应用[J]. 基因组学与应用生物学, 2013(4): 533-539.
- [23] 常琳, 肖琦, 童蕴慧, 等. *gacS* 基因在荧光假单胞菌 FD6 防治番茄灰霉病中的功能分析[J]. 园艺学报, 2014, 41(4): 681-686.
- [24] 程亮, 游春平, 肖爱萍. 拮抗细菌的研究进展[J]. 江西农业大学学报, 2003, 25(5): 732-737.
- [25] 王靖, 苏志芳, 李亚珍, 等. 内生黏质沙雷氏菌 LIEH92 对向日葵菌核病的防治效果及其防病机制研究[J]. 植物保护, 2016, 42(1): 73-80.
- [26] 李霞, 张小平, 李欣. 一株拮抗姜瘟根际青枯假单胞杆菌的沙雷氏菌的分离与鉴定[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(20): 4841-4844.
- [27] 毕建华, 杨金广, 欧阳明安, 等. 黏质沙雷氏菌次生代谢物对 TMV 的抑制机理[J]. 中国农业科学, 2014, 47(5): 912-922.
- [28] 肖珺, 邹潇潇, 黄惠琴, 等. 海南岛胡椒地穿刺巴斯德芽菌鉴定与多样性分析[J]. 广东农业科学, 2014, 41(17): 134-139.
- [29] 钟伏付, 苏娜, 杨廷宪, 等. 魔芋品种选育与改良研究进展[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(3): 446-449.
- [30] 曹赐生, 王海华. 稻白叶枯菌弱毒株诱导的系统抗性——兼论与防御酶活性的变化[J]. 吉首大学学报(自科版), 2000, 21(2): 58-62.
- [31] 吴伟胜, 李玉保, 王守荣, 等. 大肠杆菌噬菌体的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(8): 8-11.
- [32] Fujiwara, A., Fujisawa, M., Hamasaki, R., et al. (2011) Biocontrol of *Ralstonia solanacearum* by Treatment with Lytic Bacteriophages. *Applied & Environmental Microbiology*, **77**, 4155-4162. <https://doi.org/10.1128/AEM.02847-10>
- [33] 梁雪杰, 张婷婷, 乔俊卿, 等. 番茄土传病害拮抗菌的筛选、评价及鉴定[J]. 西南农业学报, 2014, 27(3): 1096-1103.
- [34] Sunder, A.V., Kumar, A., Naik, N. and Pundle, A.V. (2012) Characterization of a New *Bacillus cereus*, ATUAVP1846 Strain Producing Penicillin V Acylase, and Optimization of Fermentation Parameters. *Annals of Microbiology*, **62**, 1287-1293. <https://doi.org/10.1007/s13213-011-0374-7>
- [35] Sellami-Kamoun, A., Ghorbel-Frikha, B., Haddar, A. and Nasri, M. (2011) Enhanced *Bacillus cereus*, BG1 Protease Production by the Use of Sardinelle (*Sardinella aurita*) Powder. *Annals of Microbiology*, **61**, 273-280. <https://doi.org/10.1007/s13213-010-0134-0>
- [36] Yanez-Mendizabal, V., Zeriuoh, H., Vinas, I., et al. (2012) Biological Control of Peach Brown Rot (*Monilinia* spp.) by *Bacillus subtilis* CPA-8 Is Based on Production of Fengycin-Like Lipopeptides. *European Journal of Plant Pathology*, **132**, 609-619. <https://doi.org/10.1007/s10658-011-9905-0>
- [37] 贾丽苑, 贾雨, 黄建新. 拮抗菌应用于微生物杀菌剂的研究现状及展望[J]. 安徽农学通报, 2012, 18(10): 49-52.
- [38] 杨蕾, 周国英, 梁军. 2 种生防菌株对杨树溃疡病原葡萄座腔菌的抑制作用[J]. 林业科学, 2015, 51(8): 67-73.
- [39] Timmusk, S., Grantcharova, N. and Wagner, E.G. (2005) *Paenibacillus polymyxa* Invades Plant Roots and Forms Biofilms. *Applied & Environmental Microbiology*, **71**, 7292-7300. <https://doi.org/10.1128/AEM.71.11.7292-7300.2005>
- [40] Shoda, M. (2000) Bacterial Control of Plant Diseases. *Journal of Bioscience & Bioengineering*, **89**, 515-521. [https://doi.org/10.1016/S1389-1723\(00\)80049-3](https://doi.org/10.1016/S1389-1723(00)80049-3)
- [41] 赵玉华, 周蕊, 李俊州, 等. 内生细菌 EBS05 对烟草诱导抗性的信号转导途径研究[J]. 植物病理学报, 2014, 44(5): 527-535.
- [42] 梁艳琼, 唐文, 吴伟怀, 等. 生防菌 TB2 对甘蔗叶片抗病相关酶活的诱导作用[J]. 福建农业学报, 2016, 31(6): 620-625.
- [43] Foldes, T., Banhegyi, I., Herpai, Z., Varga, L. and Szigeti, J. (2000) Isolation of *Bacillus* Strains from the Rhizosphere of Cereals and *in Vitro* Screening for Antagonism against Phytopathogenic, Food-Borne Pathogenic and Spoilage Micro-Organisms. *Journal of Applied Microbiology*, **89**, 840-846. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2000.01184.x>
- [44] 李金云, 王慧敏, 王建辉. 根癌病生防菌 E26 菌株产生细菌素的初步研究[J]. 中国农业科学, 2004, 37(12): 1860-1865.
- [45] Ashwini, N. and Srividya, S. (2014) Potentiality of *Bacillus subtilis* as Biocontrol Agent for Management of Anthracnose Disease of Chilli Caused by *Colletotrichum gloeosporioides* OGC1. *3 Biotech*, **4**, 127-136. <https://doi.org/10.1007/s13205-013-0134-4>
- [46] Zhao, Y., Selvaraj, J.N., Xing, F., et al. (2014) Antagonistic Action of *Bacillus subtilis* Strain SG6 on *Fusarium gra-*

minearum. *PLoS ONE*, **9**, e92486. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0092486>

- [47] 李晶, 赵晓宇, 张先成, 等. 生防枯草芽孢杆菌 B29 菌株抗菌蛋白的质谱分析[J]. 黑龙江科学, 2010(2): 29-30.
- [48] 余惠荣, 李悦, 李晓菲, 等. 孢短芽孢杆菌 B8 抑菌物质的理化性质及其分离纯化[J]. 沈阳农业大学学报, 2015, 46(4): 398-403.
- [49] 张华, 赵辉, 王鹏涛, 等. 解淀粉芽孢杆菌 B10-26 抑菌物质的稳定性研究与初步分离纯化[J]. 河南农业科学, 2014, 43(5): 93-96.
- [50] 王继良, 杨金库, 冯争光, 等. 枯草芽孢杆菌 SYL-6 脂肽类化合物的分离与稳定性分析[J]. 现代农业科技, 2015(23): 114-115.
- [51] 汤谷月, 刘朝霞, 赵宝梅, 等. 小麦纹枯病菌拮抗菌株 X2-3 的鉴定及其抗菌特性分析[J]. 山东农业科学, 2016, 48(5): 93-97.
- [52] 陈洁梅, 张灿辉, 艾田, 等. 解淀粉芽孢杆菌 KN-BL-1 及其发酵豆粕产抗菌肽类物质的研究[J]. 中国生物工程杂志, 2014, 34(10): 61-66.
- [53] Tamehiro, N., Okamotohosoya, Y., Okamoto, S., *et al.* (2002) Bacilysocin, a Novel Phospholipid Antibiotic Produced by *Bacillus subtilis* 168. *Antimicrobial Agents & Chemotherapy*, **46**, 315-320. <https://doi.org/10.1128/AAC.46.2.315-320.2002>
- [54] 蔡作新, 郑传伟, 田伟波, 等. 氮离子注入诱变选育恩拉霉素高产菌株[J]. 工业微生物, 2015(3): 58-61.
- [55] 张鸿, 林志坚, 林赵淼, 等. T-DNA 随机插入法获得甘薯蔓割病菌非致病生防菌株[J]. 中国生物防治学报, 2016, 32(5): 610-618.
- [56] 顾鹏飞, 吴刚, 胡永红, 等. 低能 N⁺注入选育凝结芽孢杆菌高效生防菌株[J]. 河南农业科学, 2016, 45(5): 87-90.
- [57] 甘良, 蓝星杰, 戴蓬博, 等. 放线菌混合菌剂对西瓜枯萎病的防治作用研究[J]. 中国生物防治学报, 2015, 31(4): 516-523.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: amb@hanspub.org