



## 专论与综述

## 芽孢杆菌与杀菌剂复配防治植物病害的研究进展

黄慧婧 罗坤\*

湖南农业大学植物保护学院 湖南 长沙 410128

**摘要:** 芽孢杆菌属包含多种植物病原物的拮抗菌, 可广泛用于植物病害防治。然而单独利用生防菌进行生物防治常由于环境因素影响而无法达到较好的防治效果, 可通过与低剂量杀菌剂复配使用来提高防治效率。本文对生防芽孢杆菌与杀菌剂复配使用进行植物病害综合防治的研究现状、防效、研究方法等进行综述, 芽孢杆菌与杀菌剂复配使用不仅保障了防治效果, 还大大减少了化学农药的施用。

**关键词:** 生防菌, 杀菌剂, 芽孢杆菌, 植物病害, 农药减量化

## Research progress in the control of plant diseases by the combination of *Bacillus* and fungicides

HUANG Huijing LUO Kun\*

College of Plant Protection, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China

**Abstract:** *Bacillus* spp. contains a variety of antagonistic bacterias of plant pathogens, which can be widely used in the control of plant diseases. However, the use of biocontrol bacteria alone for biological control is often unable to achieve a better control effect due to the influence of environmental factors, and the control efficiency can be improved by combined use with low-dose fungicides. The research status, control effects and research methods of integrated control of plant diseases by the combination of biocontrol *Bacillus* and fungicides were reviewed in this paper. The combined use of *Bacillus* and fungicides can not only ensure the control effect, but also can greatly reduce the application of chemical pesticides.

**Keywords:** biocontrol bacteria, fungicides, *Bacillus*, plant diseases, pesticide reduction

植物病害带来的巨大经济损失一直影响着我国农业发展, 植物病害防治是我国农业生产中一项重要的工作。目前, 化学防治依然是防治植物病害的主要方式。随着化学药剂的大规模施用, 环境污染与日俱增, 病原微生物抗性的产生不可避免, 同

时食品安全问题日益受到关注。随着农药减量化观点的提出, 生物防治的作用更加受到期待。植物病害的拮抗微生物对其具有抗生作用、竞争作用、重寄生作用、诱导植物系统抗性拮抗机制<sup>[1]</sup>。利用拮抗菌防治植物病害具有安全环保、对病原菌高度

**Foundation item:** Science-Technology Project of Hunan Tobacco Company Changsha Branch (20-21A05)

\*Corresponding author: E-mail: luokun08@126.com

**Received:** 07-05-2020; **Accepted:** 23-06-2020; **Published online:** 20-10-2020

基金项目: 湖南省烟草公司长沙市公司科技项目(20-21A05)

\*通信作者: E-mail: luokun08@126.com

收稿日期: 2020-05-07; 接受日期: 2020-06-23; 网络首发日期: 2020-10-20

特异性等优点<sup>[2]</sup>, 有利于可持续发展。在植物病害的生防菌中, 木霉属(*Trichoderma* spp.)、芽孢杆菌属(*Bacillus* spp.)、假单胞菌属(*Pseudomonas* spp.)等较为常见<sup>[3]</sup>。除此之外, 还有一些不常见的生防菌也正在被不断研究, 例如罗坤等<sup>[4]</sup>筛选出一株伯克氏属(*Burkholderia* sp.)拮抗细菌对番茄青枯病的防治具有重要意义。

芽孢杆菌属生防菌对多种植物病原物具有拮抗效应, 可用于多种植物病害的防治工作。然而, 由于受环境条件的多变性和土壤系统的复杂性影响, 单用生物防治难以有效防治植物病害<sup>[5]</sup>。生防菌与杀菌剂复配使用可弥补二者各自的局限性和弊端, 成为一种切实可行且环境友好的防治方法。生防菌与杀菌剂的相容可通过耐药生防菌株的选育来实现, 获得耐药菌株可用含药培养基对特定杀菌剂的天然耐药性拮抗菌株进行筛选<sup>[6]</sup>, 或通过紫外线诱变<sup>[7]</sup>等多种方式。利用生防菌与杀菌剂共同作用, 可有效实现对植物病害的综合防治。

## 1 杀菌剂复配的协同作用

在防治植物病害时, 当 2 种或 2 种以上处理共同作用的防效大于它们各自单独作用的防效之和时, 这些处理方式之间具有协同作用(增效作用)。国内外已有大量利用协同作用复配药剂的成功案例。Colby 曾介绍常用于评价除草剂复配协同作用的 Gowing 法并将其简化, 同样适用于杀菌剂复配所产生效应的判断: 当 2 种杀菌剂复配时该模型为“ $E=X+Y-XY/100$ ”, 其中  $X$  为  $a$  剂量的药剂 A 单独使用时对病原菌的防效,  $Y$  为  $b$  剂量的药剂 B 单独使用时对病原菌的防效, 计算所得  $E$  为预期防效; 当实际防效大于  $E$  时, 2 种杀菌剂之间具有协同作用, 反之为拮抗作用<sup>[8]</sup>。Wadely 提出的增效系数法也常用于评价复配杀菌剂中不同药剂间的互作: 增效系数 ( $SR$ )= $EC_{50(\text{exp})}/EC_{50(\text{obs})}$ ,  $EC_{50(\text{exp})}=(x+y)/[x/EC_{50(x)}+y/EC_{50(y)}]$ ; 其中  $x$ 、 $y$  分别为药剂  $X$ 、药剂  $Y$  的浓度,  $EC_{50(x)}$ 、 $EC_{50(y)}$  分别为药剂  $X$  和药剂  $Y$  的半最大效应浓度,  $EC_{50(\text{exp})}$ 、 $EC_{50(\text{obs})}$  分别为复配

药剂的预期半最大效应浓度与实际半最大效应浓度; 当  $SR>1.5$  时混配药剂中的不同药剂间表现为协同作用,  $0.5\leq SR\leq 1.5$  时表现为相加作用,  $SR<0.5$  时则表现为拮抗作用<sup>[9]</sup>。此外, 共毒系数法<sup>[10]</sup>、Horsfall 法<sup>[11]</sup>、等效线法<sup>[12]</sup>等也可用于杀菌剂复配效果的评价。利用生防菌与杀菌剂之间的协同作用可提高对植物病害的防治效率, 一方面使生防菌的防治效果更加稳定, 另一方面可显著减少农药用量<sup>[13]</sup>, 实现防效与环保的双赢。

## 2 芽孢杆菌在植物病害防治中常见的作用机制

从国内外学者的大量研究中可了解到生防芽孢杆菌具有多样的防病机制, 可通过一种或多种防病机制作用于植物病害。如表 1 所示, 这些作用机制实现的防病效果与杀菌剂的防病效果有些相同, 有些与之互补。

在芽孢杆菌对多种植物病害的抑制作用中, 竞争作用、抗生素作用、促进植物生长和诱导系统抗性(Induced Systemic Resistance, ISR)是比较常见的防病机制。

### 2.1 竞争作用

竞争作用是生防类芽孢杆菌常见的一种拮抗机制。生防菌可通过夺取营养和占据优势空间位点阻止病原菌从植物的自然孔口和伤口入侵, 干扰病原菌在植物体内与根际的定殖。刘丁在研究萎缩芽孢杆菌(*B. atrophaeus*)对黄曲霉(*Aspergillus flavus*)的抑制机理中发现, 无菌上清液与高压灭菌后培养液的抑菌率(分别为 27.10%与 19.19%)明显低于培养原液与菌体悬浮液的抑菌率(分别为 79.80%与 71.72%), 说明在萎缩芽孢杆菌对黄曲霉的拮抗关系中存在明显的竞争作用<sup>[21]</sup>。一些生防菌能通过形成生物膜来夺取病原菌入侵所必需的侵染位点, 使植物免受病害侵袭。Luo 等 2018 年在研究工业生防菌多粘芽孢杆菌(*B. polymyxa*) HY96-2 菌株的生防机理时, 发现其具有能通过调控群体感应引起生物膜形成的 *LuxS* 基因<sup>[22]</sup>。还有一些拮抗菌能产生嗜铁

表 1 芽孢杆菌与杀菌剂的作用机制  
Table 1 Mechanisms of action of *Bacillus* and fungicides

防治因子 Factors of prevention	作用机制 Mechanisms of action	
	对病原物 To the pathogens	对寄主植物 To the host plants
杀菌剂 Fungicides	影响细胞壁结构 <sup>[14]</sup> , 破坏细胞膜通透性 <sup>[15]</sup> By affecting the structure of the cell wall <sup>[14]</sup> and destroying the permeability of the cell membrane <sup>[15]</sup> 抑制毒素形成 <sup>[16]</sup> By inhibiting the formation of toxins <sup>[16]</sup> 影响必需蛋白的合成 <sup>[17]</sup> By affecting the synthesis of essential proteins <sup>[17]</sup> 抑制呼吸代谢与能量合成 <sup>[18]</sup> By inhibiting respiratory metabolism and energy synthesis <sup>[18]</sup>	诱导系统抗性(诱导病程相关蛋白的合成 <sup>[19]</sup> ) By inducing systemic resistance (by inducing the synthesis of pathogenesis-related proteins <sup>[19]</sup> ) 降低植物对病原菌的敏感程度 <sup>[20]</sup> By reducing the sensitivity of plants to pathogens
生防芽孢杆菌 Biocontrol <i>Bacillus</i>	竞争作用 Competitive effect 抗生素作用 Antibiosis	诱导系统抗性 Induced systemic resistance, ISR 促进植物生长 Growth-promotion effect

素, 大量夺取病原菌生长环境中的铁离子, 致使病原菌无法成功定殖。陈思宇在水稻纹枯病拮抗菌的筛选与研究中, 得到的 11 株拮抗菌(其中 10 株均为芽孢杆菌属)都能产生嗜铁素<sup>[23]</sup>, 可见产生嗜铁素是生防芽孢杆菌一种常见的拮抗机制。王涤非等从柿树根部分离出一株地衣芽孢杆菌, 通过铬天青 S (Chrome Azurol S, CAS) 平板检测发现其具有较强的产嗜铁素能力, 有望用于生物防治<sup>[24]</sup>。

2.2 抗生素作用

生防芽孢杆菌的代谢产物中通常存在多种溶菌物质与抗菌物质, 包括核糖体合成的抗菌蛋白(几丁质酶、葡聚糖酶、细菌素等)与非核糖体合成的抗生素(包括伊枯草菌素、芬枯草菌素、枯草菌脂肽)等<sup>[25]</sup>。Maachia 等研究得出, 枯草芽孢杆菌 B27 与 B29 菌株能产生  $\beta$ -1,3 葡聚糖酶与几丁质酶, 参与病原菌的溶解, 对葡萄灰霉病与白粉病具有良好的防控效果<sup>[26]</sup>。除了产生细胞壁降解酶, 脂肽类抗生素也是生防芽孢杆菌常见的代谢产物。Nikolić 等以乙酸乙酯萃取法对 2 株解淀粉芽孢杆菌(*B. amyloliquefaciens*)与一株短小芽孢杆菌(*B. pumil*)培养上清液中的脂肽进行提取, 所得脂肽粗提物(Crude Lipopeptide Extracts, CLEs)对丁香假单胞菌

(*Pseudomonas syringae*)有明显抑制作用<sup>[27]</sup>。Dimkić 等在实验中证实这 3 株芽孢杆菌培养上清液的 CLEs 主要由表面活性素、丰源素 A 和伊枯草菌素 A 组成<sup>[28]</sup>。一些能分泌多种次生代谢产物的芽孢杆菌已成功商业化, 例如能产生抗菌脂肽(表面活性物质、伊枯草菌素、丰源素)、聚酮(大乳蛋白、杆菌烯和艰难素)和挥发物(3-羟基丁酮/2,3-丁二醇)的解淀粉芽孢杆菌 FZB42 菌株<sup>[29]</sup>。

2.3 促进植物生长

一些生防菌在抑制病原菌的同时, 还能合成多种生长激素类物质促进植物生长。芽孢杆菌的代谢物中常见的促生物质有吲哚乙酸(Indoleacetic Acid, IAA)、脱落酸(Absciscic Acid, ABA)、细胞分裂素(Cytokinins)、赤霉素(Gibberellin, GA3)和亚精胺(Sperdimine)等<sup>[30]</sup>。Valenzuela-Ruiz 等分离出一株对小麦根腐病具有潜在生防作用的副地衣芽孢杆菌(*B. paralicheniformis*) TRQ65 菌株并对其基因组进行测序, 发现其不仅有合成抗生素的相关基因, 还具备合成生长素的能力, 通过盆栽试验验证其促生作用确实存在<sup>[31]</sup>。除了合成生长激素, 一些芽孢杆菌还能以解钾、解磷、固氮<sup>[32]</sup>的途径实现对植物的促生作用, 或通过诱导植物生长相关基因表达等方

式<sup>[33]</sup>促进植物生长。

## 2.4 诱导系统抗性(Induced Systemic Resistance, ISR)

随着对植物诱导抗性的不断深入研究,国内外研究者们发现大量植物内生菌与根围促生菌(Plant Growth-Promoting Rhizobacteria, PGPR)能诱导植物获得系统抗性。ISR 在芽孢杆菌的生物防治中也是一种常见的防病机制,不仅安全可靠、对多种病原菌有效,而且具有持久的抗病效果<sup>[34]</sup>。芽孢杆菌一般通过诱导植物产生病程相关蛋白或诱导植物细胞壁结构变化等途径实现 ISR<sup>[35]</sup>。Liu 等 2019 年提出,一株解淀粉芽孢杆菌在大豆疫病的防治中可通过诱导活性氧暴发、NO 生成(NO 可提高植物抗逆性,在 ISR 中发挥重要作用)、胼胝质沉积和木质化来诱导大豆获得系统抗性<sup>[36]</sup>。有研究表明,芽孢杆菌还可诱导与几丁质酶、 $\beta$ -1,3 葡聚糖酶等有关的病程相关蛋白迅速表达<sup>[37]</sup>。

## 3 芽孢杆菌与杀菌剂复配防治植物病害

生防菌与杀菌剂的复配展现了生防剂与化学药剂间潜在的相容性。低剂量杀菌剂的使用在一定程度上抑制病原菌的同时可帮助生防菌稳定定殖,成为优势菌种<sup>[38]</sup>。芽孢杆菌对多种外界有害因子具有较强的耐受性和广谱的抑菌能力,分布空间广泛,而且大多数芽孢杆菌对人体无害。目前已有许多研究将芽孢杆菌与杀菌剂复配,包括枯草芽孢杆菌、多粘芽孢杆菌、解淀粉芽孢杆菌、蜡状芽孢杆菌(*B. cereus*)等多个菌种,这些研究经过验证能成功用于防治多种植物病害,其应用前景得到越来越广的拓展。

### 3.1 防治真菌性植物病害

在植物病害中,真菌病害所占比例最高,真菌杀菌剂是防治植物病害最为通用的类型。由于杀菌剂具有专一性,大部分真菌杀菌剂通常不会对细菌有效,这使得生防细菌与各种真菌杀菌剂复配具有较大的相容可能性。在国内外对芽孢杆菌与杀菌剂复配防治植物病害的研究中,用于防治真菌性病害

的研究占了极大一部分比例。Ji 等通过体外培养与盆栽试验研究了氟醚菌酰胺与甲基营养型芽孢杆菌 TA-1 菌株复配对番茄灰霉病的防效,体外培养试验结果表明,氟醚菌酰胺与甲基营养型芽孢杆菌 TA-1 菌株复配对灰霉菌菌丝生长的抑制效果明显强于二者单独使用的抑制效果;而盆栽试验同样展现出协同作用:联合施用  $10^8$  CFU/mL 的甲基营养型芽孢杆菌 TA-1 与  $50 \text{ g/hm}^2$  氟醚菌酰胺的防效可达到 70.16%,较单独施用  $10^8$  CFU/mL 的甲基营养型芽孢杆菌 TA-1 菌株(防效为 58.80%)和单独使用  $50 \text{ g/ha}$  氟醚菌酰胺(防效为 56.10%)有明显提高<sup>[39]</sup>。Kim 等将解淀粉芽孢杆菌 JCK-12 菌株与杀菌剂联合使用对小麦赤霉病进行防治,实验结果表明 JCK-12 菌株的加入对化学杀菌剂起到增敏作用,温室防效达到 96.40%,田间防效达到 91.00%<sup>[40]</sup>。为防治番茄镰刀菌根腐病,Omar 等将一株巨大芽孢杆菌制成  $10^6$  CFU/mL 菌悬液与多菌灵复配,当多菌灵浓度为  $10 \mu\text{g/mL}$  时防效可达 84.00%<sup>[41]</sup>。陈志谊等将枯草芽孢杆菌 Bs-916 菌株与井冈霉素复配防治水稻纹枯病的研究影响甚广,研究表明,井冈霉素在复配剂中减少了一半的剂量,却能对水稻纹枯病实现更佳的防治效果;低剂量的井冈霉素不仅能与芽孢杆菌形成协同的防治效果,还能帮助芽孢杆菌更好地定殖<sup>[42]</sup>。毕秋艳等将一株生防枯草芽孢杆菌与啞菌酯复配防治葡萄霜霉病,结果表明该组合的菌药间具有协同作用,防效达 91.06%–98.92%,在防效相当的前提下减少了约 1/3 的啞菌酯剂量,显然可实现农药减量化防治<sup>[43]</sup>。谢立等将枯草芽孢杆菌 Czk-1 菌株与根康复配用于防治橡胶根部病害的试验同样展现出明显的协同效果:当用  $6.46 \times 10^7$  CFU/mL 的菌株发酵液与浓度为  $0.625 \text{ } 3 \mu\text{g/mL}$  的根康以 7:3 (体积比)复配时对橡胶红根病菌的抑制效果最佳(防效达 76.66%),当用  $2.33 \times 10^8$  CFU/mL 的菌株发酵液与浓度为  $0.052 \text{ } 2 \mu\text{g/mL}$  的根康以 7:3 复配时对橡胶褐根病的抑制效果最佳(防效达 89.32%)<sup>[44]</sup>。还存在一些芽孢杆菌能与不止一种杀菌剂复配成功

的案例,例如 Krishnamoorthy 等将解淀粉芽孢杆菌 B15 菌株与肟菌酯·戊唑醇和多菌灵 2 种杀菌剂都复配成功,用于防治甘蓝菌核病的田间防效分别达到 78.55% 和 75.75%<sup>[45]</sup>。当生防菌种无法耐药且能产生具有明显拮抗作用的代谢产物时,可通过将发酵上清液与杀菌剂复配实现增效<sup>[46]</sup>。还有许多芽孢杆菌与杀菌剂复配防治真菌性植物病害的实例,具体信息如表 2 所示。

3.2 防治细菌性植物病害

目前,芽孢杆菌与杀菌剂复配防治细菌性植物病害的研究实例较少。这可能与芽孢杆菌和杀细菌剂相容难度较大有关,但依然可以通过驯化筛选、紫外诱导、离子束诱变、原生质融合等方式获得耐药

生防菌株<sup>[51]</sup>。Peng 等将枯草芽孢杆菌 B-001 菌株与噻森铜复配用于防治番茄青枯病:在盆栽试验中,灌根处理的 2 个复配组(50 mg/L 噻森铜&10<sup>8</sup> CFU/mL 与 100 mg/L 噻森铜&10<sup>8</sup> CFU/mL)均表现出协同作用,防效明显高于单独施用杀菌剂或生防菌;田间试验结果显示,200 mg/kg 噻森铜与 B-001 菌株复配防效相当于单独使用 400 mg/kg 噻森铜的药效,而显著高于单独使用 200 mg/kg 噻森铜的药效<sup>[52]</sup>。黄小琴等以解淀粉芽孢杆菌 Bs2-4 菌株筛选出与其相容性较好的杀菌剂硫酸链霉素,复配施用对烟草青枯病的防效明显高于单独使用生防菌或杀菌剂的处理,在减少农药剂量的同时表现出良好的防治效果<sup>[53]</sup>。于宏安等通过培养皿对峙试验、离体果控

表 2 芽孢杆菌与杀菌剂复配防止植物病害的具体配方及防效  
Table 2 Specific formula and control effect of the combination of *Bacillus* and fungicides to prevent plant diseases

Strains	Fungicides	Concentration/Dose of biocontrol bacterias and fungicides	Diseases control	to Control effects
<i>Bacillus methylotrophicus</i> TA-1	Fluopimomide	10 <sup>8</sup> CFU/mL & 50 g/hm <sup>2</sup>	Tomato gray mold	Field control effect 70.16% <sup>[39]</sup>
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> JCK-12	Almuri	500-fold dilution of fermentation broth of JCK-12 & 4 000-fold dilution of Almuri	<i>Fusarium</i> head blight	Field control effect 91.00% <sup>[40]</sup>
<i>Bacillus megaterium</i> c96	Carbendazim	10 <sup>6</sup> CFU/mL & 10 µg/mL	<i>Fusarium</i> crown and root rot of tomato	Greenhouse control effect 84.00% <sup>[41]</sup>
<i>Bacillus subtilis</i> Bs-916	Jinggangmycin	10 <sup>10</sup> CFU/mL & 2.5% Jinggangmycin 4.5 kg/hm <sup>2</sup>	Rice sheath blight	Field control effect 82.10%–82.30% <sup>[42]</sup>
<i>Bacillus subtilis</i> HMB-20428	Azoxystrobin	10 <sup>8</sup> CFU/mL & 0.080 µg/mL	Grape downy mildew	Greenhouse control effect 98.92% <sup>[43]</sup>
<i>Bacillus subtilis</i> Czk-1	“Gen Kang”	6.46×10 <sup>7</sup> CFU/mL & 0.625 3 µg/mL (7:3)	Rubber red root	Vitro culture control effect 76.66%
		2.33×10 <sup>8</sup> CFU/mL & 0.052 2 µg/mL (7:3)	Rubber brown root	Vitro culture control effect 89.32% <sup>[44]</sup>
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> B15	Nativo	10 mL/L & 1.5 g/L	Head rot of cabbage	Field control effect 78.55%
	Carbendazim	10 mL/L & 2 g/L		Field control effect 75.75% <sup>[45]</sup>
<i>Bacillus subtilis</i> H158	Azoxystrobin	10 <sup>8</sup> CFU/mL & 56.25 g.a.i/hm <sup>2</sup>	Rice sheath blight	Field control effect 83.60%
	Pyraclostrobin			Field control effect 81.50%
	Trifloxystrobin			Field control effect 79.10% <sup>[47]</sup>
<i>Bacillus subtilis</i> NJ-18	Kresoxim-methyl	5.0×10 <sup>7</sup> CFU/mL & 225 g.a.i/hm <sup>2</sup>	Rice sheath blight	Field control effect 92.7%–100.00% <sup>[48]</sup>
<i>Bacillus subtilis</i> C <sub>10-1</sub>	Prochloraz	10 <sup>7</sup> CFU/mL & 0.1 mg/L	<i>Fusarium</i> oxysporum wilt of banana	Vitro culture control effect 94.96% <sup>[49]</sup>
<i>Bacillus subtilis</i> RB14-C	Flutolanil	30 mL fermentation broth of RB14-C & 94 µg flutolanil (per basin)	Damping-off of tomato	Greenhouse control effect 70.00% <sup>[50]</sup>

病试验、田间试验验证了地衣芽孢杆菌(*Bacillus licheniformis*)复配苯噻酮对脐橙溃疡病的防效, 田间防效可达 74.2%<sup>[54]</sup>。

#### 4 芽孢杆菌与杀菌剂复配的研究方法

在进行生防菌与杀菌剂复配试验时, 首先要进行相容性测定<sup>[55]</sup>以获得相容性最佳的菌药组合与菌药配比, 或通过诱变、驯化等方法获得耐药生防菌株。驯化选育一般先将生防菌置于含有较低浓度杀菌剂的平板中培养, 然后挑取长势较好的菌落接种至杀菌剂浓度按梯度提高的平板, 经过层层梯度不断选育, 最后获得耐药菌株<sup>[56]</sup>。诱变选育则通过物理、化学等因素诱导生防菌株具备耐药性。何文艳通过自然驯化、亚硝基胍(Nitrosoguanidin, NTG)诱变、循环选育获得耐井岗霉素的生防蜡状芽孢杆菌, 用于防治水稻纹枯病<sup>[57]</sup>。于春生等通过紫外-氯化锂复合诱变使生防菌获得了对多菌灵的较强耐受性, 有望进行后续的菌药混配<sup>[58]</sup>。除了使生防菌产生耐药性, 提高生防菌对病原菌的拮抗活性也可通过诱变实现。Chen 等以常压等离子射流(Atmospheric Pressure Plasma Jet, APPJ)作为诱变原, 筛选出一株能产生高量抗生素且对禾谷镰刀菌(*Fusarium graminearum*)具有强生防性能的枯草芽孢杆菌突变菌株, 可成为一株很有前途的生防菌用于农业生产<sup>[59]</sup>。

在获得耐药生防菌株后, 往往还需要通过体外培养试验(常用抑菌圈法或对峙法)、盆栽试验、田间试验来评价菌株与杀菌剂复配的实际防效以及菌药间的互作<sup>[60]</sup>。可先通过体外培养试验确定防效较好的菌药浓度配比范围作为盆栽试验与田间试验的基础<sup>[39]</sup>。各组处理通常分为仅施生防菌、仅施杀菌剂、菌药联用, 以不施生防菌与杀菌剂作为空白对照; 杀菌剂浓度根据田间推荐剂量逐级减少配制, 试验时还可分喷雾组与灌根组来测试不同施药方式对防效的影响<sup>[52]</sup>, 有时还需对生防菌的定殖能力进行测试<sup>[61]</sup>。处理 2-3 周后对各组植物发病等级进行统计, 计算病情指数与防效<sup>[62]</sup>, 再判断菌药间

互作效应, 用 SPSS 软件分析显著性差异<sup>[63]</sup>。由于不确定生防菌与杀菌剂复配的稳定性的, 还需通过重复试验来验证复配剂是否具备持续稳定的防效。

#### 5 展望

在植物病害防治中, 随着人们对高效环保防治方式的不断探索, 许多新型药剂正不断被开发。虽然化学防治依然是植物病害防治的主要方式, 但农药减量化已成为可持续发展的必然趋势。将生防菌与杀菌剂复配, 一方面可大大降低农药成本, 减少农药残留、农药对植物的负面影响以及农药对人体的安全风险<sup>[64]</sup>, 同时避免病原菌抗药性的产生; 另一方面可提升生防菌防治效果的稳定性, 发挥生防菌与杀菌剂的协同作用。芽孢杆菌作为一类抗逆性极强的常用生防菌, 可抑制多种植物病原物, 目前已逐渐被用于与各种杀菌剂复配的研究, 适应于新型药剂的开发趋势, 具有十足的应用潜力与广阔的发展前景。芽孢杆菌与农药复配产品正不断被开发<sup>[65]</sup>, 但能实际推广应用于农业生产的还为数不多, 可能是由于杀菌剂类型、芽孢杆菌特性和病害的多样性以及田间较为复杂的环境因素致使防效无法在各地区田间都实现稳定。如何保持长久稳定的田间防效是一个关键性问题。充分考虑气候与施药时间、剂型选择、生防菌与杀菌剂的匹配程度等因素, 并通过大范围的田间调查与长时间的反复验证也许能解决这一问题。除此之外, 有关生防菌与杀菌剂之间协同作用机制的研究还较为稀少, 进一步研究此方面问题或许能更大程度地发挥菌药间协同作用的优势。

#### REFERENCES

- [1] Liu YL, Yu Y, Lei HX, Cui LL, Zhang XJ, Wu JY, Guo J. Research progress on mechanism of bio-control factors for plant diseases and its application[J]. China Plant Protection, 2019, 39(3): 23-28 (in Chinese)  
刘亚苓, 于营, 雷慧霞, 崔丽丽, 张新静, 吴健勇, 郭靖. 植物病害生防因子的作用机制及应用进展[J]. 中国植保导刊, 2019, 39(3): 23-28
- [2] Wang C, Guo JH, Xi YG, Tian W. Research progress on application of antagonistic bacteria in biological control of

- plant diseases[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(18): 1-6 (in Chinese)
- 王超, 郭坚华, 席运官, 田伟. 拮抗细菌在植物病害生物防治中应用的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(18): 1-6
- [3] Liu CY, Xu RR, Ji HL, Chang ZL. Isolation, screening and identification of an endophytic fungus and the detection of its antifungal effects[J]. Journal of Plant Protection, 2015, 42(5): 806-812 (in Chinese)
- 刘彩云, 许瑞瑞, 季洪亮, 常志隆. 一株生防内生真菌的分离筛选、鉴定及抑菌特性[J]. 植物保护学报, 2015, 42(5): 806-812
- [4] Luo K, Hu LF, Liu KL, Liu XY, Bai LY. Screening and identification of antagonistic bacteria against tomato bacterial wilt[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(10): 171-172, 272 (in Chinese)
- 罗坤, 胡利锋, 刘开林, 刘祥英, 柏连阳. 番茄青枯病菌拮抗细菌的筛选及鉴定[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(10): 171-172, 272
- [5] Gu CY, Su XY, Yang X, Zang HY, Chen Y, Wang XF. Synergistic effect of antagonistic bacteria WH1G and prochloraz against strawberry anthracnose[J]. Plant Protection, 2018, 44(2): 184-189, 226 (in Chinese)
- 谷春艳, 苏贤岩, 杨雪, 臧昊昱, 陈雨, 王学峰. 解淀粉芽胞杆菌 WH1G 与咪鲜胺协同防治草莓炭疽病[J]. 植物保护, 2018, 44(2): 184-189, 226
- [6] Guo J, Tang LL, Zhao SM, Li SJ, Kang YB. Sensitivity of tobacco pathogens and their biocontrol strains to dimethomorph[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2020, 49(4): 87-92 (in Chinese)
- 郭敬, 汤玲玲, 赵世民, 李淑君, 康业斌. 烟草病原菌及其生防菌株对烯酰吗啉的敏感性[J]. 河南农业科学, 2020, 49(4): 87-92
- [7] Wang SW, Ji Q, Zhu TH. Resistance of *Metarhizium rileyi* UV mutation to dichlorvos[J]. Plant Protection, 2019, 45(6): 185-191 (in Chinese)
- 王诗玮, 纪琪, 朱天辉. 紫外线诱变莱氏绿僵菌对敌敌畏的耐药性[J]. 植物保护, 2019, 45(6): 185-191
- [8] Colby SR. Calculating synergistic and antagonistic responses of herbicide combinations[J]. Weeds, 1967, 15(1): 20-22
- [9] Dou JX, Geng ZY, Zhao JL, Sun GB. Joint-toxicity measurement of pydiflumetofen and tebuconazole to *Fusarium pseudogramineae*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(13): 136-139 (in Chinese)
- 窦君霞, 耿忠义, 赵京岚, 孙国波. 氟唑菌酰胺和戊唑醇对假禾镰刀菌联合毒力测定[J]. 中国农学通报, 2020, 36(13): 136-139
- [10] Gu ZY, Chen ZY, Liu YZ. Analysis the similarities and differences between synergic ratio and co-toxicity coefficient and study the standard evaluating the combined action of fungicide mixture[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Science, 2016, 32(6): 1262-1267 (in Chinese)
- 顾中言, 陈志谊, 刘卹洲. 分析增效系数和共毒系数的异同及探讨杀菌剂混用联合作用的评判[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(6): 1262-1267
- [11] Ye HC, Feng G, Yang JH, Wang Y, Yan C, Zhang J. Synergistic interaction of the mixtures of pyraclostrobin with cyprodinil or copper abietate on mango stem end rot caused by *Botryodiplodia theobroma* Pat[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2016, 36(10): 37-42 (in Chinese)
- 叶火春, 冯岗, 杨佳何, 王瑶, 闫超, 张静. 吡唑醚菌酯与噁菌环胺、松脂酸铜复配对芒果蒂腐病菌的毒力增效[J]. 热带农业科学, 2016, 36(10): 37-42
- [12] Li PY, Li Y, Yang T, Tian PF, Tian GY, Ge XZ. Inhibition of berberine with other components on *Botrytis cinerea*[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2019, 58(1): 56-60, 110 (in Chinese)
- 李朋钰, 李映, 杨涛, 田平芳, 田国英, 葛喜珍. 小檗碱与多种成分复配及其对番茄灰霉病的抑制作用[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(1): 56-60, 110
- [13] Anand T, Chandrasekaran A, Kuttalam S, Senthilraja G, Samiyappan R. Integrated control of fruit rot and powdery mildew of chilli using the biocontrol agent *Pseudomonas fluorescens* and a chemical fungicide[J]. Biological Control, 2010, 52(1): 1-7
- [14] Liu X. A preliminary study on the mechanism of the effect of benzenone on *Magnaporthe grisea*[D]. Shenyang: Master's Thesis of Shenyang University of Chemical Technology, 2019 (in Chinese)
- 刘雪. 苯丙酮对水稻稻瘟病菌作用机制初探[D]. 沈阳: 沈阳化工大学硕士学位论文, 2019
- [15] Yang XL, Liu AP, Liu MH, He L, Ren YG, Liu XP, Li LZ, Fu L, Li JM, Li QH. Fungicidal mechanism of action of a new fungicide HNPC-A3107[J]. Fine Chemical Intermediates, 2019, 49(6): 17-19, 38 (in Chinese)
- 杨小龙, 柳爱平, 刘民华, 何莲, 任叶果, 刘兴平, 李立中, 傅黎, 李建明, 李谦和. 新型杀菌剂 HNPC-A3107 杀菌机制初步研究[J]. 精细化工中间体, 2019, 49(6): 17-19, 38
- [16] Zhang CQ. Mechanism of a novel fungicide JS399-19 against *Fusarium graminearum*[D]. Hangzhou: Doctoral Dissertation of Zhejiang University, 2016 (in Chinese)
- 张承启. 新型杀菌剂氟唑菌酯对禾谷镰刀菌的作用机制研究[D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2016
- [17] Xiao JH, Pang F, Ni RQ, Chi NY, Wang MY. Research progress in biological and chemical control mechanisms of *Botrytis cinerea*[J]. China Vegetables, 2019(9): 18-23 (in

- Chinese)  
肖景惠, 逢飞, 倪瑞琪, 迟乃玉, 王梦雨. 植物灰葡萄孢菌生物防治与化学防治机理的研究进展[J]. 中国蔬菜, 2019(9): 18-23
- [18] He L, Yuan HZ, Tang JF, Yang DB, Yan XJ. Preliminary studies on the action mechanism of the novel fungicide LH-2010A against *Phytophthora capsici*[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2016, 18(2): 185-193 (in Chinese)  
何玲, 袁会珠, 唐剑锋, 杨代斌, 闫晓静. 新型杀菌剂氟醚菌酰胺对辣椒疫霉的作用机制初探[J]. 农药学学报, 2016, 18(2): 185-193
- [19] Zhu LL. Study on the resistance induced by several chemicals against powdery mildew in tomato[D]. Harbin: Master's Thesis of Northeast Agricultural University, 2014 (in Chinese)  
朱路路. 几种化学诱导剂对番茄白粉病抗性的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学硕士学位论文, 2014
- [20] Zhang HS. Antifungal spectrum and mechanism of action of LH-2010A[D]. Tai'an: Master's Thesis of Shandong Agricultural University, 2013 (in Chinese)  
张化霜. 氟醚菌酰胺的杀菌谱及作用机制的初步研究[D]. 泰安: 山东农业大学硕士学位论文, 2013
- [21] Liu D. Study on interact of *Bacillus atrophaeus* to *Aspergillus flavus*[D]. Ya'an: Master's Thesis of Sichuan Agricultural University, 2013 (in Chinese)  
刘丁. 萎缩芽孢杆菌(*Bacillus atrophaeus*)抑制黄曲霉的作用研究[D]. 雅安: 四川农业大学硕士学位论文, 2013
- [22] Luo YC, Cheng YJ, Yi JC, Zhang ZJ, Luo Q, Zhang DJ, Li YG. Complete genome sequence of industrial biocontrol strain *Paenibacillus polymyxa* HY96-2 and further analysis of its biocontrol mechanism[J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 1520
- [23] Chen SY. Screening and evaluation of antagonistic organisms against *Rhizoctonia solani*[D]. Nanjing: Master's Thesis of Nanjing Agricultural University, 2013 (in Chinese)  
陈思宇. 水稻纹枯病菌拮抗细菌的筛选与防治作用研究[D]. 南京: 南京农业大学硕士学位论文, 2013
- [24] Wang DF, Hou CM, Zhang KP, Wang J, Ai CX, Yu XM. Isolation and identification of *Bacillus licheniformis* CAS20 producing siderophore from persimmon rhizosphere[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2019, 51(4): 65-68 (in Chinese)  
王涤非, 侯长明, 张坤鹏, 王洁, 艾呈祥, 余贤美. 柿树根际嗜铁细菌地衣芽孢杆菌 CAS20 的分离鉴定[J]. 山东农业科学, 2019, 51(4): 65-68
- [25] Zheng LL. Study in inhibitory metabolic products produced by *Bacillus firmus*[D]. Ya'an: Master's Thesis of Sichuan Agricultural University, 2007 (in Chinese)  
郑凌凌. 坚强芽孢杆菌抗菌代谢产物的研究[D]. 雅安: 四川农业大学硕士学位论文, 2007
- [26] Maachia B, Rafik E, Chérif M, Nandal P, Mohapatra T, Bernard P. Biological control of the grapevine diseases 'grey mold' and 'powdery mildew' by *Bacillus* B27 and B29 strains[J]. Indian Journal of Experimental Biology, 2015, 53(2): 109-115
- [27] Nikolić I, Berić T, Dimkić I, Popović T, Lozo J, Fira D, Stanković S. Biological control of *Pseudomonas syringae* pv. *aptata* on sugar beet with *Bacillus pumilus* SS-10.7 and *Bacillus amyloliquefaciens* (SS-12.6 and SS-38.4) strains[J]. Journal of Applied Microbiology, 2019, 126(1): 165-176
- [28] Dimkić I, Stanković S, Nišavić M, Petković M, Ristivojević P, Fira D, Berić T. The profile and antimicrobial activity of *Bacillus* lipopeptide extracts of five potential biocontrol strains[J]. Frontiers in Microbiology, 2017, 8: 925
- [29] Lin C, Tsai CH, Chen PY, Wu CY, Chang YL, Yang YL, Chen YL. Biological control of potato common scab by *Bacillus amyloliquefaciens* Ba01[J]. PLoS One, 2018, 13(4): e0196520
- [30] Dai XH. Study on the mechansim of *Bacillus amyloliquefaciens* LX-11 against *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzicola* and promote the growth of rice[D]. Nanjing: Master's Thesis of Nanjing Agricultural University, 2015 (in Chinese)  
戴秀华. 解淀粉芽孢杆菌 LX-11 防治水稻细菌性条斑病的促生、控病机理研究[D]. 南京: 南京农业大学硕士学位论文, 2015
- [31] Valenzuela-Ruiz V, Robles-Montoya RI, Parra-Cota FI, Santoyo G, Del Carmen Orozco-Mosqueda M, Rodríguez-Ramírez R, de Los Santos-Villalobos S. Draft genome sequence of *Bacillus paralicheniformis* TRQ65, a biological control agent and plant growth-promoting bacterium isolated from wheat (*Triticum turgidum* subsp. *durum*) rhizosphere in the Yaqui Valley, Mexico[J]. 3 Biotech, 2019, 9(11): 436
- [32] Sun H. Research on PGPR for biological control against soybean cyst nematode[D]. Shenyang: Doctoral Dissertation of Shenyang Agricultural University, 2009 (in Chinese)  
孙华. 应用根际促生细菌防治大豆胞囊线虫病的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学博士学位论文, 2009
- [33] Wang S. Plant growth promotion and control of plant disease with *Bacillus* spp. and lipopeptide[D]. Nanjing: Doctoral Dissertation of Nanjing Agricultural University, 2009 (in Chinese)  
王帅. 芽孢杆菌及其脂肽类化合物防治植物病害和促进植物生长的研究[D]. 南京: 南京农业大学博士学位论文, 2009
- [34] Chu MJ, Yue YD. Plant systemic acquired resistance and plant elicitor[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2004, 31(1): 54-57 (in Chinese)  
褚明杰, 岳永德. 植物系统获得抗病性与抗病诱导剂(综



- 述[J]. 安徽农业大学学报, 2004, 31(1): 54-57
- [35] Liang JG. Studies on the ecology of pathogens and its antagonistic bacteria in the rhizosphere of cucumber and mechanisms of induced resistance by plant growth-promoting rhizobacteria[D]. Hangzhou: Doctoral Dissertation of Zhejiang University, 2005 (in Chinese)  
梁建根. 黄瓜根围病原菌与拮抗菌的生态学及 PGPR 诱导抗性机制的研究[D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2005
- [36] Liu D, Li KY, Hu JL, Wang WY, Liu X, Gao ZM. Biocontrol and action mechanism of *Bacillus amyloliquefaciens* and *Bacillus subtilis* in soybean phytophthora blight[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(12): 2908
- [37] Zhang ZH. Colonization and induction of plant systemic resistance by biocontrol agent *Paenibacillus polymyxa* SQR-21[D]. Nanjing: Doctoral Dissertation of Nanjing Agricultural University, 2011 (in Chinese)  
张振华. 生防多粘芽孢杆菌 SQR-21 的定殖与诱导植物系统抗性研究[D]. 南京: 南京农业大学博士学位论文, 2011
- [38] Liu JH, Gan L, Lan XJ, Zhang QL, Wang Y, Zong ZF. Disease preventing and growth promoting effects of mixed fungicides, biocontrol agents and fertilizers on cotton fusarium wilt[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2016, 44(7): 165-172 (in Chinese)  
刘继红, 甘良, 蓝星杰, 张秋丽, 王阳, 宗兆锋. 生防菌与化肥和杀菌剂混用对棉花枯萎病的防病促生作用[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2016, 44(7): 165-172
- [39] Ji XX, Li JJ, Meng Z, Zhang SA, Dong B, Qiao K. Synergistic effect of combined application of a new fungicide fluopimomide with a biocontrol agent *Bacillus methylotrophicus* TA-1 for management of gray mold in tomato[J]. Plant Disease, 2019, 103(8): 1991-1997
- [40] Kim K, Lee Y, Ha A, Kim JI, Park AR, Yu NH, Son H, Choi GJ, Park HW, Lee CW, et al. Chemosensitization of *Fusarium graminearum* to chemical fungicides using cyclic lipopeptides produced by *Bacillus amyloliquefaciens* strain JCK-12[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 2010
- [41] Omar I, O'Neill TM, Rossall S. Biological control of fusarium crown and root rot of tomato with antagonistic bacteria and integrated control when combined with the fungicide carbendazim[J]. Plant Pathology, 2006, 55(1): 92-99
- [42] Chen ZY, Liu YF, Lu F. Co-operative action between Jinggangmycin and *Bacillus subtilis* Bs-916 against rice sheath blight[J]. Acta Phytophylacica Sinica, 2003, 30(4): 429-434 (in Chinese)  
陈志谊, 刘永锋, 陆凡. 井冈霉素和生防菌 Bs-916 协同控病作用及增效机理[J]. 植物保护学报, 2003, 30(4): 429-434
- [43] Bi QY, Han XY, Ma ZQ, Zhao JJ, Wang WQ, Jia HM. Inhibitory effects of *Bacillus subtilis* HMB-20428 interacted with chemical fungicides and decrement of chemical fungicides on oomycete pathogen *Plasmopara viticola*[J]. Journal of Plant Protection, 2018, 45(6): 1396-1404 (in Chinese)  
毕秋艳, 韩秀英, 马志强, 赵建江, 王文桥, 贾海民. 枯草芽孢杆菌 HMB-20428 与化学杀菌剂互作对葡萄霜霉病菌抑制作用和替代部分化学药剂减量用药应用[J]. 植物保护学报, 2018, 45(6): 1396-1404
- [44] Xie L, He CP, Liang YQ, Li R, Zhai CX, Wu WH, Zheng JL, Yi KX. Synergistic effect of fungicides and *Bacillus subtilis* Czk1 against rubber root diseases[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, 41(8): 1625-1633 (in Chinese)  
谢立, 贺春萍, 梁艳琼, 李锐, 翟纯鑫, 吴伟怀, 郑金龙, 易克贤. 枯草芽孢杆菌 Czk1 与化学杀菌剂协同防治橡胶树根病[J]. 热带作物学报, 2020, 41(8): 1625-1633
- [45] Krishnamoorthy KK, Sankaralingam A, Nakkeeran S. Management of head rot of cabbage caused by *Sclerotinia sclerotiorum* through combined application of fungicides and biocontrol *Bacillus amyloliquefaciens*[J]. International Journal of Chemical Studies, 2017, 5(2): 401-404
- [46] Duan HM, Yu L, Sun TT, Huang WD, Yu HB. Study on inhibitory of *Bacillus amyloliquefaciens* gjf-4 fermentation supernatant and its mixture with chemical fungicides against *Alternaria solani*[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2018, 49(6): 40-49, 79 (in Chinese)  
段海明, 余利, 孙甜甜, 黄伟东, 余海兵. 解淀粉芽孢杆菌 gjf-4 发酵上清液及其混剂对番茄早疫病菌抑制活性研究[J]. 东北农业大学学报, 2018, 49(6): 40-49, 79
- [47] Liu LM, Liang MQ, Li L, Sun L, Xu YH, Gao J, Wang L, Hou YX, Huang SW. Synergistic effects of the combined application of *Bacillus subtilis* H158 and strobilurins for rice sheath blight control[J]. Biological Control, 2018, 117: 182-187
- [48] Yang DJ, Wang B, Wang JX, Chen Y, Zhou MG. Activity and efficacy of *Bacillus subtilis* strain NJ-18 against rice sheath blight and Sclerotinia stem rot of rape[J]. Biological Control, 2009, 51(1): 61-65
- [49] Liu L, Liang CC, Yang LY, Xue YX, Guo LJ, Wang GF, Huang JS. Determination of indoor virulence of biocontrol *Bacillus* and chemical fungicides against *Fusarium oxysporum* wilt of banana[J]. South China Fruits, 2013, 42(6): 66-68 (in Chinese)  
刘磊, 梁昌聪, 杨腊英, 薛玉潇, 郭立佳, 王国芬, 黄俊生. 生防芽孢杆菌与化学杀菌剂混配对香蕉枯萎病菌室内毒力测定[J]. 中国南方果树, 2013, 42(6): 66-68

- [50] Kondoh M, Hirai M, Shoda M. Co-utilization of *Bacillus subtilis* and flutolanil in controlling damping-off of tomato caused by *Rhizoctonia solani*[J]. Biotechnology Letters, 2020, 22(21): 1693-1697
- [51] Yuan SZ. Screening, identification, mechanism of biocontrol of antagonist and its coordination with fungicides against *Phytophthora capsici*[D]. Nanjing: Doctoral Dissertation of Nanjing Agricultural University, 2008 (in Chinese)  
袁树忠. 辣椒疫霉根腐病的筛选鉴定、生防机制及与杀菌剂的协同作用[D]. 南京: 南京农业大学博士学位论文, 2008
- [52] Peng D, Luo K, Jiang HD, Deng YN, Bai LY, Zhou XM. Combined use of *Bacillus subtilis* strain B-001 and bactericide for the control of tomato bacterial wilt[J]. Pest Management Science, 2017, 73(6): 1253-1257
- [53] Huang XQ, Liu Y, Zhang L, Zhou XQ, Wu WX. Screening synergistic bactericide combined with *Bacillus* against tobacco bacterial wilt[J]. Agrochemicals, 2015, 54(11): 848-851 (in Chinese)  
黄小琴, 刘勇, 张蕾, 周西全, 伍文宪. 烟草青枯病生防芽孢杆菌协同防治药剂的筛选和复配[J]. 农药, 2015, 54(11): 848-851
- [54] Yu HA, Guo ZX. Study on the mechanism and control of *Bacillus licheniformis* combined with benzothione on navel orange canker[J]. Xiandai Horticulture, 2013(9): 3-5 (in Chinese)  
于宏安, 郭早霞. 地衣芽孢杆菌复配苯噻酮菌株对脐橙溃疡病的作用机理与控病研究[J]. 现代园艺, 2013(9): 3-5
- [55] Gu CY, Wang XF, Su XY, Yang X, Zheng L, Chen Y. Synergistic effect of antagonistic bacteria WH1G and fluazinam against strawberry gray mould[J]. Agrochemicals, 2017, 56(12): 932-936 (in Chinese)  
谷春艳, 王学峰, 苏贤岩, 杨雪, 郑岚, 陈雨. 解淀粉芽孢杆菌 WH1G 与氟啶胺协同防治草莓灰霉病[J]. 农药, 2017, 56(12): 932-936
- [56] Tian LS, Feng SB. Screen on endurance strains of *Trichoderma* and control of botrytis cinerea[J]. Biotechnology, 2005, 15(5): 26-28 (in Chinese)  
田连生, 冯树波. 耐药性木霉菌株的筛选及其对灰霉病的防治[J]. 生物技术, 2005, 15(5): 26-28
- [57] He WY. Control of rice sheath blight by *Bacillus cereus* with Jinggangmycin aqua[D]. Hangzhou: Master's Thesis of Zhejiang University of Technology, 2011 (in Chinese)  
何文艳. 蜡状芽孢杆菌复配井冈霉素水剂防治水稻纹枯病的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学硕士学位论文, 2011
- [58] Yu CS, Zhang YZ, Zhang FJ, Song ZR, Yang Y, Sun DM, Li M. UV-LiCl composite mutation on *Trichoderma harzianum* to produce carbendazim-resistant strains[J]. Plant Protection, 2015, 41(5): 79-84 (in Chinese)  
于春生, 张雨竹, 张凤娇, 宋志儒, 杨月, 孙冬梅, 李敏. 紫外-氯化锂复合诱变哈茨木霉产生多菌灵抗药性菌株的研究[J]. 植物保护, 2015, 41(5): 79-84
- [59] Chen H, Chen ZJ, Wu MB, Deng SX. Screening the *Fusarium graminearum* inhibitory mutant strain from *Bacillus subtilis* by atmospheric-pressure plasma jet[J]. Journal of Applied Microbiology, 2010, 108(1): 96-103
- [60] Peng D, Li SD, Wang JX, Chen CJ, Zhou MG. Integrated biological and chemical control of rice sheath blight by *Bacillus subtilis* NJ-18 and jinggangmycin[J]. Pest Management Science, 2014, 70(2): 258-263
- [61] Yao KB, Zhang YJ, Wang JG, Xu Y, Yang JH. Integrated control of strawberry disease using biocontrol agent *Bacillus subtilis* strain DJ-6 and pyraclostrobin[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2016, 29(10): 2397-2401 (in Chinese)  
姚克兵, 张玉军, 王劲根, 许媛, 杨敬辉. 枯草芽孢杆菌和吡唑醚菌酯协同防治草莓病害[J]. 西南农业学报, 2016, 29(10): 2397-2401
- [62] Liu YL, Yu Y, Cui LL, Lei HX, Lu HK, Guo J. Screening, identification and antagonistic effect evaluation of biocontrol strains to *Asarum* leaf blight[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2020, 45(5): 1047-1052 (in Chinese)  
刘亚苓, 于营, 崔丽丽, 雷慧霞, 鲁海坤, 郭靖. 细辛叶枯病生防细菌的筛选、鉴定及其防效测定[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(5): 1047-1052
- [63] Peng D, Li SD, Chen CJ, Zhou MG. Combined application of *Bacillus subtilis* NJ-18 with fungicides for control of sharp eyespot of wheat[J]. Biological Control, 2014, 70: 28-34
- [64] Lai YR, Lin PY, Chen CY, Huang CJ. Feasible management of southern corn leaf blight via induction of systemic resistance by *Bacillus cereus* C1L in combination with reduced use of dithiocarbamate fungicides[J]. The Plant Pathology Journal, 2016, 32(5): 481-488
- [65] Luo YC, Li SL, Liu PX, Chen J, Zhang DJ, Tian L, Li YG. New and efficient microbial fungicides for control of plant bacterial and fungal soil-borne diseases and leaf diseases: creation and industrialization of a series of *Bacillus polymyxa* and *Bacillus maritimus*[A]//Chinese Plant Protection Society, Green Pest Control and Quality and Safety of Agricultural Products—Proceedings of 2015 Annual Conference of Chinese Plant Protection Society[C]. Changchun: China Society of Plant Protection CSPP, 2015: 339-341 (in Chinese)  
罗远婵, 李淑兰, 刘盼西, 陈杰, 张道敬, 田黎, 李元广. 防治植物细菌性和真菌性土传病害及叶部病害的新型、高效微生物杀菌剂: 多粘类芽孢杆菌和海洋芽孢杆菌系列产品的创制及产业化[A]//中国植物保护学会 2015 年学术年会论文集[C]. 长春: 中国植物保护学会, 2015: 339-341