

专 论 与 综 述

Reviews

生物农药在稻瘟病防治中的应用及前景分析

沙月霞

(宁夏植物病虫害防治重点实验室, 宁夏农林科学院植物保护研究所, 银川 750002)

摘要 稻瘟病是一种世界性稻作病害,是影响高产、稳产的重要因素。目前利用抗病品种和化学农药是防治稻瘟病的主要措施,但是稻瘟病菌生理小种易变异,抗病品种选育时间较长,化学农药的残留污染环境,寻找有效的生物防治途径对于水稻产业可持续发展迫在眉睫。生物农药具有低残留、高效、对环境无污染、病原菌不易产生抗药性等优点,是防治稻瘟病的重要杀菌剂。在稻瘟病防治中常用的生物农药包括微生物源农药、植物源农药和植保素。本文主要综述了生物农药在稻瘟病防治中的生防机制与应用研究现状,分析生物农药在稻瘟病防治中的前景。

关键词 生物农药; 稻瘟病; 生物防治; 稻瘟病菌

中图分类号: S 476 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.0529-1542.2017.05.004

Application of biopesticide against rice blast and analysis of its prospect

Sha Yuexia

(Key Laboratory of Ningxia Plant Disease and Insect Pests Control, Institute of Plant Protection,
Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China)

Abstract Rice blast caused by *Magnaporthe oryzae* as the worldwide rice disease is an important factor to influence high and stable yield. Chemical pesticides and disease-resistant varieties potentially effective control rice blast in present. But the physiological race of *Magnaporthe oryzae* changes easily and the breeding time for cultivar-resistance is long. Especially, chemicals yet pose residual toxicity and environmental pollution. Therefore, it reaches extremely urgent for rice industry in sustainable development to finding an effective way to bio-control rice blast. Biopesticide is the important fungicide with some priorities including low residue, efficient, no pollution to the environment and not easy resistant to pathogens. Biopesticides commonly used to control rice blast include microorganism drugs, botanical drugs and phytoalexin. This study aims to summarize mechanism and application of biopesticide against rice blast and analysis of its prospect.

Key words biopesticide; rice blast; bio-control; *Magnaporthe oryzae*

水稻是世界上最重要的粮食作物,是全球近50%人口的主粮作物^[1-2]。稻瘟病是世界性真菌病害,也是最严重的水稻病害之一,具有突发性强、易于流行和分布广泛的特点。稻瘟病菌无性时期为丝孢目梨孢属的灰梨孢 *Pyricularia* (= *Piricularia*) *grisea* (Cooke) Sacc.。有性时期为子囊菌门巨座壳目巨座壳属的 *Magnaporthe oryzae* (Hebert) Yae-gashi & Udagawa。稻种和稻草中越冬的病原菌在翌年条件适宜的时候萌发产生分生孢子,借气流和雨水传播,在水稻的各个生育期和植株的各个组织

部位均可发生侵染。稻瘟病根据症状不同分为苗瘟、叶瘟、节瘟、枝梗瘟、穗颈瘟和谷粒瘟等。

稻瘟病分布极其广泛,在全世界 85 个国家有发生,亚洲和非洲稻区较为严重,其中日本、韩国、印度和中国最为严重^[3]。稻瘟病每年造成 30% 的水稻产量损失——可以养活 6 千万人口^[4-5],经济损失超过 700 亿美元^[5],严重的田块颗粒无收^[6]。1975—1990 年全球由稻瘟病引起的粮食损失高达 1.6 亿 t, 1975—2000 年间全世界 11%~30% 的稻田因稻瘟病而颗粒无收^[3]。采用抗病品种和化学农药是防治

稻瘟病的主要方式,但是抗病品种存在选育时间长和抗病性易丧失的问题,化学杀菌剂的残留会对大米和生态环境造成污染,病原菌也容易产生抗药性^[7-8]。因此,利用生物农药防治稻瘟病是水稻产业可持续发展的需要。

生物防治通常是指利用活体微生物或者其代谢活性物质防治病原菌、害虫和杂草以及调节植物生长的措施^[9-11]。Bacon 等报道内生枯草芽胞杆菌 *Bacillus subtilis* 可以与串珠镰孢菌 *Fusarium moniliforme* 竞争玉米植株体内的侵入位点,从而抑制病害的发生^[9]。Manikandan 和 Sathiyabama^[12] 研究报道了壳聚糖在离体叶片上对稻瘟病菌表现出良好的抑菌效果。用于稻瘟病防治的生物农药主要有微生物源农药、植物源农药和植保素。本文主要综述了生物农药在稻瘟病防治中的生防机制和应用现状,展望生物农药在稻瘟病防治中的前景。

1 利用生物农药防治稻瘟病的机制

1.1 真菌防治稻瘟病的生防机制

真菌在防治稻瘟病中的生防机制包括重寄生作用、交叉保护作用、产生拮抗物质和竞争作用等。生防真菌可以产生具有抑菌活性的次生代谢产物,抑制稻瘟病菌侵入结构的形成;也可以分泌纤维素酶、果胶酶、葡聚糖酶、几丁质酶等水解酶,溶解稻瘟病菌细胞壁的主要成分几丁质和纤维素。Ali 等^[13] 研究发现木霉 *Trichoderma* T2 可以溶解稻瘟病菌菌丝壁,并且致使部分菌丝卷曲,从而降低稻瘟病菌的致病性。Zhang 等^[14] 分离的弯孢霉 *Curvulana* sp. FH01 产生邻苯二甲酸丁基异丁酯 (phthalic acid butyl isobutyl ester) 和根生素 (radicinin) 对稻瘟病菌具有显著抑菌活性。部分真菌可以引起寄主植物产生诱导抗病性,例如诱导水稻植株体内的植物保卫素、活性氧、植物防御酶系发生相应变化,形成阻碍稻瘟病菌入侵的物理结构屏障如乳突和酚类化合物等^[11-12,15]。在温室条件下,哈茨木霉 NF9 菌株浸种可增强水稻品种‘原丰早’幼苗对稻瘟病的抗性^[16]。Su 等^[17] 研究发现暗色有隔内生真菌稻镰状瓶霉 *Harpophora oryzae* 可以成功在水稻根部定殖,并通过水杨酸 (salicylic acid, SA) 介导的信号转导通路诱导水稻产生抗病性,提高了抗稻瘟病的能力。

1.2 细菌防治稻瘟病的生防机制

细菌来源的生物农药一般抗菌谱比较广,其生防机制多样化,包括抗生作用、溶菌作用、空间位点竞争、营养竞争、诱导抗病性等。生防菌与病原菌之间拮抗作用的强度与二者在宿主表面共生时的生物量相关,即拮抗菌需要在病原菌侵染水稻前抢占生存空间并长期定殖,才能有效地抑制病原菌。生防细菌的竞争作用主要包括营养竞争和空间位点竞争。营养竞争是指生防细菌在微生态环境中与其他微生物(包括病原菌)在其定殖部位争夺生长发育必需的氨基酸、无机盐、碳水化合物、维生素、铁元素等营养元素。Chaiarn 等^[18] 筛选的坚强芽胞杆菌 *B. firmus* 同稻瘟病菌竞争水稻周围的营养物质,并分泌一种嗜铁素,增强其在水稻根部的定殖能力,从而达到生防效果。空间位点竞争是指生防细菌在植物根际、体表或体内与稻瘟病菌争夺侵入位点。枯草芽胞杆菌 CB-R05 可以在水稻皮层细胞内、细胞间隙、木质部和维管束系统中大量定殖^[19],抢占稻瘟病菌的侵入位点。GFP 标记的枯草芽胞杆菌 SYX04 和 SYX20 可以大量定殖在水稻根、茎和叶片的表皮和维管束中^[20]。

拮抗作用是指一种生物产生抗生物质或有毒代谢物对另一种生物的生长发育的抑制作用。生防细菌一般可产生抗菌脂肽、水解酶等多种胞外代谢物质导致稻瘟病菌菌丝畸形、原生质浓缩、抑制分生孢子萌发以及菌丝端破裂。甲基营养型芽胞杆菌 *Bacillus methylotrophicus* BC79 产生抗菌活性物质啉氨甲基醋酸 (phenaminomethylacetic acid) 抑制稻瘟病菌菌丝生长和分生孢子萌发,温室条件下,菌株 BC79 发酵液对稻瘟病的防治效果达到 89.87%^[21]。枯草芽胞杆菌 SYX20 和 SYX04 发酵培养液能够溶解稻瘟病菌菌丝细胞壁和分生孢子细胞壁,致使原生质外渗,初步研究认为是菌株产生了可以降解几丁质和 β -1,3-葡聚糖的酶类物质^[22]。

荧光假单胞菌 *Pseudomonas fluorescens* pf7-14 对叶瘟和穗颈瘟的防效达到 79% 和 82%,生防机制是其产生抗真菌抗生素 phenazine-l-carboxylic acid (PCA),抑制了稻瘟病菌的生长^[23]。Yu 等^[24] 从海水中分离的葡萄球菌 *Staphylococcus* sp. 菌株 LZ16 产生抑菌活性物质嘌呤核苷磷酸化酶 (purine nucleoside phosphorylase, PNP),显著抑制分生孢子萌发、芽管发育和附着胞的形成,田间试验证实该

菌培养液可显著预防和减轻稻瘟病的发生。

生防细菌不但可以抑制稻瘟病菌的生长,而且其菌体及代谢产物能够诱发水稻植株产生抗病性,即具有诱导植物抗病性作用。Jha 等从水稻根系分离得到短小芽胞杆菌 *B. pumilus* 和类产碱假单胞菌 *P. pseudoalcaligenes*,可以增强水稻防御相关酶如几丁质酶及多酚氧化酶(PPO)等的活性,诱导水稻植株的抗病性,从而降低稻瘟病的危害^[25]。De Vleeschauwer 等研究表明,荧光假单胞菌 *P. fluorescens* WCS374r 分泌产生假单胞菌素型铁载体,由茉莉酸(jasmonic acid, JA)/乙烯(ethylene, ETH)信号转导通路调节水稻植株产生诱导抗病性,增强抗叶瘟的能力^[26]。枯草芽胞杆菌 BBG111 产生的环脂肽类抗生素、丰原素和表面活性剂既可以诱导水稻 WCS374r 抗病性,又促进茉莉酸、乙烯、脱落酸(abscisic acid, ABA)和植物生长素(Auxin, IAA)信号表达,同时诱导几丁质酶的活性^[27]。

1.3 放线菌防治稻瘟病的生防机制

放线菌是可以产生多种抗菌素的生防微生物,是一种防治稻瘟病的潜在资源,其生防机制主要包括促进植物生长、提高植株抗逆境能力和拮抗作用。李燕^[28]筛选研究发现涂链霉菌 *Streptomyces endus* OsiSh-2 产生几丁质酶、纤维素酶及铁载体蛋白,可以溶解稻瘟病菌细胞壁;在含有 L-色氨酸的培养基中产生吡啶乙酸促进水稻的生长,在防治水稻稻瘟病中具有多种生防机制协同控病的能力。Prabavathy 等^[29]从链霉菌 PMS 分离到抗真菌脂肽类化合物 SPM5C-1 和 SPM5C-2,SPM5C-1 对稻瘟病菌的菌丝生长具有显著抑制活性,温室条件下对稻瘟病的防效达到 76.1%,显著增加水稻产量。Zhang 等^[30]从暗灰链霉菌 *S. canus* BYB02 中分离纯化的活性代谢产物硫酸卡那霉素对稻瘟病菌菌丝生长及分生孢子萌发具有很强的抑菌活性,对稻瘟病的防效达到 66.8%。杜春梅等^[31]采用菌丝生长速率法和孢子萌发抑制法研究发现放线菌 NK413 菌株及其代谢产物对稻瘟病菌菌丝生长和孢子萌发具有较明显的抑制作用。

1.4 植物源杀菌剂防治稻瘟病的生防机制

植物源杀菌剂在防治水稻稻瘟病中的生防机制主要包括拮抗作用和诱导抗病性。拮抗作用表现在抑制稻瘟病菌菌丝生长、分生孢子萌发、附着胞及侵入丝形成等,还有一些植物提取物可以破坏稻瘟病

菌细胞壁的结构。张翠荣^[32]研究发现柠檬醛可以破坏稻瘟病菌细胞壁的多糖结构,不但稻瘟病菌菌丝形态发生了明显的变化,其细胞超微结构也受到了严重的破坏,尤其是菌丝细胞的渗透性、细胞质、隔膜和线粒体等细胞器的结构形态发生了明显的改变。诱导抗病性主要表现在诱导水稻植株产生抗病性和增强植株的抗逆性。陈桂华等^[15]利用中药前胡提取物诱导水稻幼苗抗稻瘟病,诱导后的水稻植株苗瘟的发病率下降。

2 生物农药在稻瘟病防治中的应用

2.1 利用微生物农药防治稻瘟病

微生物农药包括活体微生物和农用抗生素,用于防治农作物的病、虫、草、鼠害或促进作物生长。活体微生物包括细菌、真菌、病毒。生物农药市场中微生物源农药大约占 30%^[33],用于防治稻瘟病的微生物源农药主要有真菌类、细菌类和放线菌类。

2.1.1 生防微生物

生防微生物是指用于生物防治的微生物,其具有特异性强、无残留、不易产生抗药性、与环境相容性好、利用空间大和防效好等特点。在水稻生产过程中经常用于稻瘟病防治的生防微生物主要有木霉^[13,16]、芽胞杆菌^[19,21]、假单胞菌^[23,26]和放线菌^[28-31]、毛壳霉 *Chaetomium*^[34]、平脐蠕孢 *Bipolaris*^[35]和黏质沙雷氏菌 *Serratia marcescens*^[35-36]。

植物病害生物防治中,真菌是非常重要的生防微生物。Wang 等^[34]分离的根际真菌金黄毛壳菌 *Chaetomium aureum* MF-91 及其代谢产物显著抑制稻瘟病菌菌丝生长、分生孢子萌发及附着胞形成,代谢产物对稻瘟病的田间防效达到 66.07%。木霉具有显著的生防与促生活性,在稻瘟病防治中是重要生防微生物。刘路宁等^[37]研究发现绿木霉 *Trichoderma virens* TY009 产生抗菌素胶霉毒素,50 和 10 $\mu\text{g/mL}$ 胶霉毒素分别完全抑制稻瘟病菌分生孢子萌发和附着胞的形成;Chaudhary 等^[38]筛选的哈茨木霉 *T. harzianum* IRRI-3 和 IRRI-4 通过浸种方式可有效防治叶瘟的危害。

芽胞杆菌具有对人畜安全、不污染环境、病原菌不易产生抗药性、抗逆性强和促进植物生长等优点,成为稻瘟病防治上的重要生防菌。Chaiharn 等^[18]从泰国北部的水稻根际和根围土壤中分离的坚强芽胞杆菌 *Bacillus firmus* D4.1 产生含铁细胞,其培

养滤液对稻瘟病的防治效果达 70% 以上。温小红等^[39]从海洋细菌中分离的枯草芽胞杆菌 HW-14 对多个稻瘟病菌生理小种的抑菌圈直径在 18 mm 以上。Taguchi 等^[40]分离的枯草芽胞杆菌 IK-1080 培养滤液减轻叶瘟的发生率 7.7%~13.8%, 减少产量损失 52.2%~73.5%。Shan 等^[21]分离自陕西秦岭的甲基营养型芽胞杆菌 BC79 培养滤液在温室条件下对稻瘟病的防治效果达到 89.9%。Hernandez-Rodriguez 等^[41]筛选的多株固氮型芽胞杆菌, 具有明显促生作用而且对稻瘟病防治效果良好。Meng 等^[42]研究发现枯草芽胞杆菌 T429 粉剂对稻瘟病的田间防治效果在 77.6%~78.5%。Naureen 等^[43]从水稻根际分离出的枯草芽胞杆菌 SPS2, 假单胞菌 WBPS1 以及蜡样芽胞杆菌 *B. cereus* Z2 对稻瘟病防效稳定并对水稻植株具有显著促生作用。沙月霞等^[44]从水稻叶片表面分离获得 2 株枯草芽胞杆菌其发酵液对叶瘟的田间防效为 71.5%~85.1%, 对穗瘟的田间防效为 63.5%~85.6%。

假单胞菌分布广、数量多、繁殖快、竞争定殖能力强, 是非常重要的生防因子。用于稻瘟病防治的假单胞杆菌主要有荧光假单胞菌^[43-46]、恶臭假单胞菌 *Pseudomonas putida*^[47] 等。Prathuangwong 等^[48]分离的荧光假单胞菌 SP007s 对稻瘟病有防治效果, 增产率达到 52.1%。Amutharaj 等^[49]分离的假单胞菌 EA105 对稻瘟病菌附着胞的形成抑制率达到 90% 以上, 菌落生长抑制率达到 76%。Gohel 等^[50]分离出 2 株荧光假单胞菌, 可以有效防治稻瘟病兼具增产作用。

放线菌也是稻瘟病防治上比较重要的生防微生物。Oh 和 Lee^[51]筛选的放线菌 A5005、A5314 发酵液在温室条件下可以显著减少叶瘟的病斑。宋永燕等^[52]筛选的吸水链霉菌 D-2 在 PDA 平板上对稻瘟病菌的抑菌率达到 92.2%, 以甲醇作溶剂, 吐温 80 作乳化剂, 对稻瘟病的田间防效达到 65.69%。

Khalil 等^[53]从埃及水稻田土壤中分离筛选出 50 株对稻瘟病菌具有抑菌活性的放线菌。Thawai^[54]从泰国香米的根和茎中分离得到 38 株放线菌, 对稻瘟病有较好的防治效果。

2.1.2 农用抗生素

灭瘟素 S (blasctidini S) 是灰色产色链霉菌 *Streptomyces griseochromogenes* Fukun 产生的核苷类抗生素, 是第一个广泛应用的农用抗生素, 对水

稻苗瘟、叶瘟、穗颈瘟等都有显著的治疗效果^[55]。春雷霉素是春日链霉菌 *S. kasugaensis* 产生的氨基糖苷类农用抗生素^[56], 对稻瘟病有很好的防治效果。冯东岳^[57]由吸水链霉菌纯化出波拉霉素 (polaramycin), 当波拉霉素浓度为 5 $\mu\text{g/mL}$ 和 10 $\mu\text{g/mL}$ 时, 对稻瘟病菌孢子萌发抑制率分别为 95.6% 和 99%, 对菌丝生长抑制率分别为 69.5% 和 90%。吡咯假单胞菌 *P. pyrrocinia* 产生的硝吡咯菌素 (pyrrolinitrin) 对稻瘟病菌具有拮抗效果, 在温室盆栽条件下对稻瘟病表现出良好的防效^[58]。叶亚军等^[59]从诺卡氏菌 *Nocardia* sp. A11 纯化的农用抗生素 A211, 其微乳剂 200 倍稀释液对稻瘟病菌的抑菌效果在 60% 以上, 对叶瘟的田间保护和治疗效果分别是 71.3% 和 61.7%, 对穗瘟的防效是 59.8%。罗楚平等^[60]从枯草芽胞杆菌 916 纯化出芽胞菌霉素 bacillomycin L 对稻瘟病的防效明显。Xiong 等^[61]从稠李链霉菌 *S. padanus* JAU4234 分离纯化的抗真菌菌毒素 antifungalmycin 702 强烈抑制稻瘟病菌附着胞形成和分生孢子萌发, 完全抑制附着胞形成, 对分生孢子萌发抑制率达到 95%~100%。Zhang 等^[30]从暗灰链霉菌 *S. canus* BYB02 纯化出拒霉素 (resistomycin), IC_{50} = 3.8 $\mu\text{g/mL}$ 时对稻瘟病菌菌丝生长抑制效果良好, IC_{50} = 5.6 $\mu\text{g/mL}$ 时对分生孢子萌发抑制效果良好, 在离体条件下对稻瘟病菌的抑菌效果为 58.7%~66.8%。灰黄霉素 (griseofulvin) 是一种非多烯类的抗真菌抗生素, 它能强烈抑制真菌细胞有丝分裂, 干扰真菌 DNA 合成, 抑制丝状真菌的生长, 是一类很好的抗真菌药物。张传能等^[62]采用平板对峙法测定出产灰黄霉素的展青霉 GM120-43 对稻瘟病具明显的抑制作用; 在稻瘟病的防治中, 灰黄霉素稀释 300 倍时对叶瘟病与穗瘟病的预防效果分别为 93.76% 和 53.79%, 治疗效果分别为 89.2% 和 49.21%, 是一种具有前景的生物农药。

2.2 利用植物源农药防治稻瘟病

植物源农药通常采用植物的某些部位或者从中提取的活性成分, 以及分离纯化的单体物质为原料研制而成。利用植物源农药防治稻瘟病, 在水稻生产中发挥着重要作用。Amadioha^[63]从印楝 *Azadirachta indica* 种子中提纯出对稻瘟病具有明显防治效果的浸提物。Lee 等^[64]利用荜拔果 *Piper longum* 的一种代谢产物——乙烷抽提物合成杀菌剂, 对稻瘟病菌的抑制率为 33%。Huo 等^[65]将木荷 *Schima*

superba 叶和无患子 *Sapindus mukorossi* 果皮的皂苷抽提物以 3:4 或者 15:8 的质量配比合成杀菌剂, 具有明显抗稻瘟病的作用。严伟^[66]利用木荷、无患子、油茶、樟树等代谢产物研制的杀菌剂能有效抑制稻瘟病菌菌丝的生长和分生孢子的萌发。Rout 等^[67-68]利用木橘 *Aegle marmelos* 提取物合成的杀菌剂对稻瘟病菌分生孢子萌发的抑制率达到 81.9%, 温室条件下对稻瘟病的防效达到 67%~80%, 对叶瘟的田间防效达到 76%~80%。

2.3 利用植保素防治稻瘟病

植物保卫素(phytoalexins, 简称植保素)是指具有诱导活性和抗菌活性的一类低分子量物质, 能够抵御病原菌的侵染, 受到生物或者非生物胁迫时在水稻植株体内积累合成。已知的植保素包括樱花素(sakuranetin)、柚皮素(naringenin)、稻壳酮(momilactone)A 和 B、水稻素(oryzaalexin E)^[69-70]。柚皮素和樱花素混配后在培养基上可以抑制稻瘟病菌菌丝生长^[71-72]。稻瘟病菌侵染水稻叶片后诱导植株产生的植保素 RF2, 对稻瘟病菌分生孢子萌发和菌丝生长具有较明显的抑制作用^[73]。Zhang 等^[74]利用低聚糖诱导水稻植株防御酶活性, 稻瘟病发生率降低 10.8%~17.7%。

3 生物农药在稻瘟病防治中的前景分析

3.1 生物防治是绿色植保的重要内容

由于对病害流行与药剂作用机制等知识缺乏认识, 大量化学药剂被错误使用、过量使用, 这不仅对人类自身健康、畜禽安全直接造成危害, 还对土壤、植被、水体等环境生态造成污染。随着社会的发展和人民生活质量的提高, 人们对粮食安全的需求日渐增长, 生态环境的恶化也迫使人类重视农业的生物防治。生物农药不仅能够有效控制稻瘟病的危害, 同时对人畜以及环境没有威胁, 而且具有促进植物生长等优点, 可满足食品安全的要求。生态学一直是植物病害生物防治的重要基础, 利用生物农药防治稻瘟病, 更有利于从宏观和微观上恢复与重建以自然调控为核心的生态系统, 实现水稻植株微生态系统的平衡。探索、利用生物农药, 达到以菌治菌的目的, 在稻瘟病防治上具有广阔的应用前景和市场潜力。

3.2 应用分子生物学技术发展携带抗性基因的新型生物农药

生物防治因其对环境 and 动物安全而逐渐成为人

们所关注的焦点和热点, 但是, 目前许多具有生防潜力的微生物在生产应用中效果不理想、不稳定, 主要原因是对许多生防菌的生防机制不明确, 制约了其发展。利用现代分子生物学技术, 不仅有利于揭示生物农药在水稻上定殖的分子机制, 而且有助于深入研究生物农药的生防机理。黏质沙雷氏菌 *Serratia marcescens* B2 包含一系列几丁质酶基因, 对稻瘟病菌具有较好的抑菌效果, 该菌可以在水稻根际定殖, 却不能在水稻叶部有效定殖。Someya 等^[75]克隆了 *S. marcescens* B2 内切几丁质酶基因 *chiA*, 利用遗传转化技术将克隆基因导入了可以在水稻叶片有效定殖的菌株 *Erwinia ananas* NR-1 中, 转化后的 *E. ananas* NR-1 经叶面喷雾处理能够显著降低叶瘟发病率。分子生物学的飞速发展作为生物农药在稻瘟病防治上的发展提供了新的理论和技术, 提升了生防效果的稳定性, 使得生物农药的应用前景更加广阔。

3.3 具备商业化研发和工厂化生产的潜力

生物农药的来源广泛, 自然界中许多具有杀菌和抑菌效果的植物可以用于开发植物源农药; 在土壤、植物和海洋中分布着大量微生物, 易于分离和纯化, 具有繁殖快、抗逆性强、抑菌能力强等特性, 是理想的生防微生物。多种拮抗微生物可以协同互作, 如将互融的 2 种以上的拮抗微生物(混用的不同抗生体之间没有拮抗、寄生、溶解或竞争等互斥关系)混合, 将有利于混合菌株对水稻不同部位的空间全面占领, 实现多种抗生菌功能互补、多种病害兼防, 作用持久的协同控病效果。我国陈延熙教授等^[76]曾从各种植物组织内分离到多种有益的芽胞杆菌, 进而制成植物微生态制剂, 并于 1986 年开始在大田示范使用, 发现其具有改善作物品质、增产、防病等很多作用。在农业生产中, 生物农药可以实现商业化研发和工厂化生产, 很容易制成粉剂或者其他剂型, 在贮藏、携带和运输方面也比较方便, 具有很好的应用潜力和市场前景。采用生物农药防治稻瘟病可以大幅度减少化学农药的施用和环境污染, 提高水稻的产量和质量, 最终实现水稻产业的可持续发展。因此, 发展新型用于稻瘟病防治的生物农药对于粮食安全至关重要。

参考文献

[1] Gyaneshwar P, James E K, Mathan N, et al. Endophytic colo-

- nization of rice by a diazotrophic strain of *Serratia marcescens* [J]. *Journal of Bacteriology*, 2001, 183(8): 2634–2645.
- [2] Muthayya S, Sugimoto J D, Montgomery S, et al. An overview of global rice production, supply, trade, and consumption [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2014, 1324: 7–14.
 - [3] Spence C, Alff E, Johnson C, et al. Natural rice rhizospheric microbes suppress rice blast infections [J]. *BMC Plant Biology*, 2014, 14: 130.
 - [4] Dagadas Y F, Yoshinok K, Dagdas G, et al. Septin-mediated plant cell invasion by the rice blast fungus, *Magnaporthe oryzae* [J]. *Science*, 2012, 336(6088): 1590–1595.
 - [5] Mahmut C. The molecular basis of plant genetic diversity [M]. Croatia: InTech, 2012: 331–356.
 - [6] Skamnioti P, Gurr S J. Against the grain; safeguarding rice from rice blast disease [J]. *Trends in Biotechnology*, 2009, 27(3): 141–150.
 - [7] Aktar W, Sengupta D, Chowdhury A. Impact of pesticides use in agriculture; their benefits and hazards [J]. *Interdisciplinary Toxicology*, 2009, 2(1): 1–12.
 - [8] Chuma I, Isobe C, Hotta Y, et al. Multiple translocation of the AVR-Pita effector gene among chromosomes of the rice blast fungus *Magnaporthe oryzae* and related species [J]. *PLoS Pathogens*, 2011, 7(7): e1002147.
 - [9] Bacon C W, Yates I E, Hinton D M, et al. Biological control of *Fusarium moniliforme* in maize [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2001, 109(2): 325–332.
 - [10] Prabavathy V R, Mathivanan N, Murugesan K. Control of blast and sheath blight diseases of rice using antifungal metabolites produced by *Streptomyces* sp. PM5 [J]. *Biological Control*, 2006, 39(3): 313–319.
 - [11] Moreno A B, Martinez del Pozo A, San Segundo B. Biotechnologically relevant enzymes and proteins: antifungal mechanism of the *Aspergillus giganteus* AFP against the rice blast fungus *Magnaporthe grisea* [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2006, 72(5): 883–895.
 - [12] Manikandan A, Sathiyabama M. Preparation of chitosan nanoparticles and its effect on detached rice leaves infected with *Pyricularia grisea* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 84: 58–61.
 - [13] Ali H, Nadarajah K. Evaluating the efficacy of *Trichoderma* spp. and *Bacillus subtilis* as biocontrol agents against *Magnaporthe grisea* in rice [J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2014, 8(9): 1324–1335.
 - [14] Zhang Yinglao, Kong Lichun, Jiang Donghua, et al. Phyto-toxic and antifungal metabolites from *Curvularia* sp. FH01 isolated from the gut of *Atractomorpha sinensis* [J]. *Biore-source Technology*, 2011, 102(3): 3575–3577.
 - [15] 陈桂华, 肖艳松, 柏连阳. 中药前胡提取物对水稻幼苗抗稻瘟病的诱导作用[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2007, 33(5): 602–604.
 - [16] Jean-Berchmans N, 徐同, 宋凤鸣, 等. 哈茨木霉 NF9 菌株对水稻的诱导抗病性[J]. *中国生物防治*, 2003, 19(3): 111–114.
 - [17] Su Zhenzhu, Mao Lijuan, Li Na, et al. Evidence for biotrophic lifestyle and biocontrol potential of dark septate endophyte *Harpophora oryzae* to rice blast disease [J]. *PLoS ONE*, 2013, 8(4): e61332.
 - [18] Chaiharin M, Chunhaleuchanon S, Lumyong S. Screening siderophore producing bacteria as potential biological control agent for fungal rice pathogens in Thailand [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2009, 25(11): 1919–1928.
 - [19] Ji S H, Gururani M A, Chun S C. Expression analysis of rice pathogenesis-related proteins involved in stress response and endophytic colonization properties of gfp-tagged *Bacillus subtilis* CB-R05 [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2014, 174(1): 231–241.
 - [20] 沙月霞. 防治稻瘟病芽胞杆菌的筛选及生防机制研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
 - [21] Shan Hongying, Zhao Mingmin, Chen Dexin, et al. Biocontrol of rice blast by the phenaminomethylacetic acid producer of *Bacillus methylotrophicus* strain BC79 [J]. *Crop Protection*, 2013, 44: 29–37.
 - [22] Sha Yuexia, Wang Qi, Li Yan. Suppression of *Magnaporthe oryzae* and interaction between *Bacillus subtilis* and rice plants in the control of rice blast [J]. *SpringerPlus*, 2016, 5: 1238.
 - [23] Valasubrahmanian R. Biological control of rice blast with *Pseudomonas fluorescens* Migula: Role of antifungal antibiotic in disease suppression [D]. India: University of Madras, 1994.
 - [24] Yu Qin, Liu Zhu, Lin Derun, et al. Characterization and evaluation of *Staphylococcus* sp. strain LZ16 for the biological control of rice blast caused by *Magnaporthe oryzae* [J]. *Biological Control*, 2013, 65(3): 338–347.
 - [25] Jha Y, Subramanian R B. Endophytic *Pseudomonas pseudoalcaligenes* shows better response against the *Magnaporthe grisea* than a rhizospheric *Bacillus pumilus* in *Oryza sativa* (rice) [J]. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 2011, 44(6): 592–604.
 - [26] De Vleeschauwer D, Djavaheri M, Bakker P A H M, et al. *Pseudomonas fluorescens* WCS374r-induced systemic resistance in rice against *Magnaporthe oryzae* is based on pseudobactin-mediated priming for a salicylic acid-repressible multifaceted defense response [J]. *Plant Physiology*, 2008, 148(4): 1996–2012.
 - [27] Suryadi Y, Susilowati D N, Kadir T S, et al. Bioformulation of antagonistic bacterial consortium for controlling blast, sheath blight and bacterial blight diseases on rice [J]. *Asian Journal of Plant Pathology*, 2013, 7(3): 92–108.
 - [28] 李燕. 水稻内生放线菌 OsSh-2 生物防治稻瘟病特性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
 - [29] Prabavathy V R, Mathivanan N, Murugesan K. Control of blast and sheath blight diseases of rice using antifungal metabolites produced by *Streptomyces* sp. PM5 [J]. *Biological Control*, 2006, 39(3): 313–319.
 - [30] Zhang Yinglao, Li Shuai, Jiang Donghua, et al. Antifungal activities of metabolites produced by a termite-associated *Strepto-*

- myces canus* BYB02 [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(7): 1521–1524.
- [31] 杜春梅, 宋刚, 赵丹, 等. 稻瘟病拮抗菌 NK413 的鉴定及抑菌效果[J]. 植物保护, 2010, 36(6): 77–81.
- [32] 张翠荣. 柠檬醛对稻瘟病菌几丁质酶基因表达的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016.
- [33] Fravel D R. Commercialization and implementation of biocontrol [J]. Annual Review of Phytopathology, 2005, 43: 337–359.
- [34] Wang Y L, Liu S Y, Mao X Q, et al. Identification and characterization of rhizosphere fungal strain MF-91 antagonistic to rice blast and sheath blight pathogens [J]. Journal of Applied Microbiology, 2013, 114 (5): 1480–1490.
- [35] Manandhar H K, Lyngs Jørgensen H J, Mathur S B, et al. Suppression of rice blast by preinoculation with avirulent *Pyricularia oryzae* and the non-rice pathogen *Bipolaris sorokiniana* [J]. Phytopathology, 1998, 88(7): 735–739.
- [36] Someya N, Nakajima M, Hibi T, et al. Induced resistance to rice blast by antagonistic bacterium, *Serratia marcescens* strain B2 [J]. Journal of General Plant Pathology, 2002, 68(2): 177–182.
- [37] 刘路宁, 屠艳拉, 张敬泽. 绿木霉菌株 TY009 防治纹枯病等水稻主要真菌病害的潜力[J]. 中国农业科学, 2010, 43(10): 2031–2038.
- [38] Chaudhary B, Shrestha S M, Singh U S, et al. Seed treatment with *Trichoderma harzianum*: suitable option for leaf blast management of Sub1 and non-Sub1 rice genotypes [J]. Nepal Agriculture Research Journal, 2014, 14: 14–25.
- [39] 温小红. 稻瘟病拮抗海洋细菌 HW-14 分离、鉴定及其抗菌物质的研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2013.
- [40] Taguchi Y, Hyakumachi M, Horinouchi H, et al. Biological control of rice blast disease by *Bacillus subtilis* IK-1080 [J]. Japanese Journal of Phytopathology, 2003, 69(2): 85–93.
- [41] Hernandez-Rodriguez A, Rives-Rodriguez N, Acebo-Guerrero Y, et al. Potentialities of associated diazotrophic bacteria in plant growth promotion and biocontrol of *Pyricularia oryzae* (Sacc.) in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Revista de Protección Vegetal, 2014, 29(1): 1–10.
- [42] Meng Xiangkun, Yu Junjie, Yu Mina, et al. Dry flowable formulations of antagonistic *Bacillus subtilis* strain T429 by spray drying to control rice blast disease [J]. Biological Control, 2015, 85: 46–51.
- [43] Naureen Z, Price A H, Hafeez F Y, et al. Identification of rice blast disease-suppressing bacterial strains from the rhizosphere of rice grown in Pakistan [J]. Crop Protection, 2009, 28(12): 1052–1060.
- [44] 沙月霞, 王琦, 李燕. 稻瘟病生防芽胞杆菌的筛选及防治效果[J]. 中国生物防治学报, 2016, 32(4): 474–484.
- [45] Chatterjee A, Valasubramanian R, Ma W L, et al. Isolation of ant mutants of *Pseudomonas fluorescens* strain Pf7–14 altered in antibiotic production, cloning of ant(+) DNA, and evaluation of the role of antibiotic production in the control of blast and sheath blight of rice [J]. Biological Control, 1996, 7(2): 185–195.
- [46] Krishnamurthy K, Gnanamanickam S S. Biological control of rice blast by *Pseudomonas fluorescens* strain Pf7–14: evaluation of a marker gene and formulations [J]. Biological Control, 1998, 13(3): 158–165.
- [47] Sittther V, Gnanamanickam S S. Biological control of blast disease of finger millet (*Eleusine coracana* L.) and analysis of fertility of *Magnaporthe grisea* [J]. Current Science, 1996, 71 (2): 144–147.
- [48] Prathuangwong S, Chuaboon W, Chatnaparat T, et al. Induction of disease and drought resistance in rice by *Pseudomonas fluorescens* SP007s [J]. Chiang Mai University Journal of Natural Sciences, 2012, 11(1): 45–56.
- [49] Amutharaj P, Sekar C, Natheer S E. Development and use of different formulations of *Pseudomonas fluorescens* siderophore for the enhancement of plant growth and induction of systemic resistance against *Pyricularia oryzae* in lowland rice [J]. International Journal of Pharma and Biological Sciences, 2013, 4 (2): B-831–B-838.
- [50] Gohel N M, Chauhan H L. Integrated management of leaf and neck blast disease of rice caused by *Pyricularia oryzae* [J]. African Journal of Agricultural Research, 2015, 10(19): 2038–2040.
- [51] Oh H S, Lee Y H. A Target-site-specific screening system for antifungal compounds on appressorium formation in *Magnaporthe grisea* [J]. Phytopathology, 2000, 9(10): 1162–1168.
- [52] 宋永燕, 李平, 郑爱萍, 等. 抗稻瘟病拮抗菌 D-2 的鉴定及其活性代谢物的研究[J]. 植物病理学报, 2005, 35(4): 352–358.
- [53] Khalil M S, Moubasher H, Hasan F F. Biological control of rice blast disease by *Streptomyces flavotricini* [J]. Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences, 2014, 5(5): 1453–1461.
- [54] Thawai C. Isolation and characterization of antibiotic producing *Micromonospora* from Thai Jasmine rice [J]. New Biotechnology, 2014, 31(S): S147.
- [55] Takeuchi S, Hirayama K, Ueda K, et al. Blasticidin S, a new antibiotic [J]. Journal of Antibiotics, 1958, 11(1): 1–5.
- [56] Schuwirth B S, Day J M, Hau C W, et al. Structural analysis of kasugamycin inhibition of translation [J]. Nature Structural and Molecular Biology, 2006, 13(10): 879–886.
- [57] 冯东岳. 波拉霉素对稻瘟病的防治效果评价及机制初探[D]. 北京: 中国农业科学院, 2004.
- [58] Chollet J F, Rocher F, Jousse C, et al. Acidic derivatives of the fungicide fenpiclonil: effect of adding a methyl group to the N-substituted chain on systemicity and fungicidal activity [J]. Pest Management Science, 2005, 61(4): 377–382.
- [59] 叶亚军, 张敏, 汤志良. 抗稻瘟病菌株—诺卡氏菌 A11 的诱变育种[J]. 植物保护, 2007, 33(1): 33–36.
- [60] 罗楚平, 刘鄯洲, 吴荷芳, 等. 脂肽类化合物 bacillomycin L 抗真菌活性及其对水稻病害的防治[J]. 中国生物防治学报, 2011, 27(1): 76–81.
- [61] Xiong Zhiqiang, Tu Xiaorong, Wei Saijin, et al. *In vitro* antifungal activity of antifungalmycin 702, a new polyene macrolide antibiotic, against the rice blast fungus *Magnaporthe grisea* [J]. Biotechnology Letter, 2013, 35(9): 1475–1479.

- [62] 张传能, 黄铭杰, 毛宁. 灰黄霉素对水稻稻瘟病菌的防治效果研究[J]. 中国农学通报 2015, 31(4): 190–194.
- [63] Amadioha A C. Controlling rice blast *in vitro* and *in vivo* with extracts of *Azadirachta indica* [J]. Crop Protection, 2000, 19(5): 287–290.
- [64] Lee S E, Park B S, Kim M K, et al. Fungicidal activity of piperonaline, a piperidine alkaloid derived from long pepper, *Piper longum* L., against phytopathogenic fungi [J]. Crop Protection, 2001, 20(6): 523–528.
- [65] Huo Guanghua, Zhan Wugen, Fu Rihui, et al. *In vitro* antifungal activity of saponin extracts from *Schima superba* in combination with *Sapindus mukorossi* against *Piricularia oryzae* [J]. 天然产物研究与开发, 2010, 22(5): 755–760.
- [66] 严伟. 抗稻瘟病菌植物源提取物组方研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2011.
- [67] Rout S, Thatoi H N, Tewari S N. Performance of aqueous extract of *Aegle marmelos* based Amaext-a, an antifungal product against *Piricularia grisea* causing blast disease of rice [J]. Archives of Phytopathology and Plant Protection, 2012, 45(20): 2507–2518.
- [68] Rout S, Thatoi H N, Tewari S N. Sensitivity of ethanolic extract of *Aegle marmelos*-based Amasof-e, an organic antifungal product, against *Piricularia grisea* that causes blast disease of rice [J]. Archives of Phytopathology and Plant Protection, 2015, 48(1): 73–83.
- [69] Ahuja I, Kissen R, Bones A M. Phytoalexins in defense against pathogens [J]. Trends Plant Science, 2012, 17: 73–90.
- [70] Grosskinsky D K, van der Graaff E, Roitsch T. Phytoalexin transgenics in crop protection-fairy tale with a happy end? [J]. Plant Science, 2012, 195: 54–70.
- [71] Li Wenxin, Kodama O, Akatsuka T. Role of oxygenated fatty acids in rice phytoalexin production [J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1991, 55(4): 1041–1048.
- [72] Padmavati M, Sakthivel N, Thara K V, et al. Differential sensitivity of rice pathogens to growth inhibition by flavonoids [J]. Phytochemistry, 1997, 46(3): 499–502.
- [73] 范军, 彭友良. 一种新的水稻植保素的诱导、纯化及特性研究[J]. 植物病理学报, 1996, 26(3): 217–221.
- [74] Zhang Shan, Tang Wenzhu, Jiang Linlin, et al. Elicitor activity of algino-oligosaccharide and its potential application in protection of rice plant (*Oryza saliva* L.) against *Magnaporthe grisea* [J]. Biotechnology and Biotechnological Equipment, 2015, 29(4): 646–652.
- [75] Someya T, Numata S, Nakajima M, et al. Biological control of rice blast by the epiphytic bacterium *Erwinia ananas* transformed with a chitinolytic enzyme gene from an antagonistic bacterium, *Serratia marcescens* strain B2 [J]. Journal of General Plant Pathology, 2003, 69(4): 276–282.
- [76] 陈延熙, 陈璧, 潘寅德, 等. 增产菌的应用与研究[J]. 生物防治通报, 1985, 1(2): 22–23.

(责任编辑: 杨明丽)

征订启事

欢迎订阅 2018 年《特种经济动植物》

《特种经济动植物》(原名《国外特种经济动植物》)是由农业部主管、中国农业科学院特产研究所主办的特种经济动植物专业性期刊,为中国农业核心期刊,主编为中国农业科学院特产研究所所长、研究员、博士生导师杨福合。1982 年创刊,月刊,大 16 开,56 页。本刊面向生产和用户,为科技兴农、振兴农村经济、农民科技致富服务,奉行科学、适用、及时的办刊方针,介绍特产农业、特色农业新技术、新成果、新品种、新经验、新信息,努力办成广大读者买得起、读得懂、用得上的好刊物,是您致富的好帮手。

主要栏目:①特种经济动物 毛皮动物、野生动物、各种宠物、珍(野)禽、畜禽优良品种、特有水(海)产动物。②特种经济植物 经济植物、野生(名特)果树、药源、观赏、油料、饲料、蜜源、园林草坪、海(水)生、防风固沙(氮)等植物,高产作物、野生名特蔬菜、各地名产、牧草、食用菌等的栽培、加工、植物保护等。③信息荟萃 国内毛皮市场及世界毛皮拍卖会行情,全国十大中药材市场特种经济动、植物类中药材市场行情、发展前景及其权威预测等。刊号:CN 22-1155/S,邮发代号 12-183,每期定价 4.00 元,全年 48.00 元(含邮费)。全国各地邮局(所)均可订阅,也可随时从邮局汇款至编辑部订阅。

地址:长春市净月经济开发区聚业大街 4899 号

邮编:130112

单位:中国农业科学院特产研究所《特种经济动植物》编辑部

联系人:董老师

电话:(0431)81919599

E-mail:tzjdzdw@126.com