

杨 华,雷 平,郭照辉,等. 细菌防治水稻稻瘟病研究进展[J]. 江苏农业科学,2019,47(7):99-104.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.07.025

细菌防治水稻稻瘟病研究进展

杨 华,雷 平,郭照辉,胡 展,付祖姣,肖 蓉
(湖南省微生物研究院,湖南长沙 410009)

摘要:稻瘟病是对水稻最具破坏性的疾病之一,寻找有效的稻瘟病防治途径对实现水稻产业可持续发展具有重要意义。细菌在水稻稻瘟病防治中的作用越来越多地引起人们的关注。介绍国内外生防细菌防治稻瘟病的研究进展,讨论研究、应用中的主要问题并进行展望,旨在挖掘对稻瘟病具有良好抑制效果的高效拮抗细菌,并对其应用方法进行综述。

关键词:生防细菌;水稻;稻瘟病;研究进展

中图分类号: S435.111.4⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)07-0099-05

水稻是全球超过 30 亿人口的主食。然而,水稻易受到各种病害的危害,其中最具破坏性的是稻瘟病。水稻稻瘟病是由真菌稻瘟病菌(*Magnaporthe oryzae*)引起的,在水稻发育的 3~4 叶期、分蘖盛期和抽穗初期尤易受到稻瘟病菌侵染。稻瘟病每年造成水稻产量损失 10%~30%,在疾病流行期间产量损失可达到 50%^[1-2]。采用抗病品种和化学农药通常能有效控制稻瘟病,但选育抗病品种时间长、抗病能力容易丧失,化学杀菌剂也会导致严重的环境和健康问题。因此,通过生物防治等替代措施来防治水稻稻瘟病逐步成为人们研究的重点。

自 20 世纪 50 年代以来,国内外已有大量利用细菌、放线菌和酵母菌对稻瘟病进行生物防治的相关报道。细菌因种类多、范围广、繁殖快、易培养、抗逆性强等优点^[3],被认为是最具生物防治潜力和应用价值的一类生防菌^[4-5]。多种生防细菌作为稻瘟病的生物防治制剂已经在实验室、温室和田间条件下被广泛研究。目前研究发现对稻瘟病有显著抑制作用的生防细菌有两大类:芽孢杆菌属(*Bacillus*)和假单胞菌属(*Pseudomonas*)。本文对近年来国内外的研究发现进行整理,综述对稻瘟病具有生物防治潜力的细菌。

1 芽孢杆菌

芽孢杆菌属是一类在自然界广泛分布的革兰氏阳性杆状细菌,能分泌抗菌物质,抑制病原菌的生长,同时诱导作物防御系统抵御病原菌的侵袭^[6-7];还可产生植物激素、植酸酶或嗜铁素等物质促进植物对营养的吸收,对作物生长发育有一定的促进作用。由于其大多对人畜无毒无害,不易造成环境污染,且药剂生产适于产业化,发酵生产成本低,产品储存期

长,因此被认为是防治稻瘟病较理想的生防微生物^[8-9]并大范围应用于生物防治^[10-11]。目前用于防治稻瘟病的芽孢杆菌主要种类有枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)、解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*)、蜡状芽孢杆菌(*Bacillus cereus*)、短小芽孢杆菌(*Bacillus pumilus*)、短短芽孢杆菌(*Brevibacillus brevis*)、侧孢短芽孢杆菌(*Brevibacillus laterosporus*)、坚强芽孢杆菌(*Bacillus firmus*)、地衣芽孢杆菌(*Bacillus licheniformis*)、巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterium*)、多黏类芽孢杆菌(*Paenibacillus polymyxa*)、甲基营养型芽孢杆菌(*Bacillus methylophilus*)等。国内外研究者在实验室以及温室或田间条件下,对不同芽孢杆菌属的生物防治效果进行了研究(表 1、表 2)。

在用于防治稻瘟病的生防菌株中,枯草芽孢杆菌和解淀粉芽孢杆菌是研究和报道最多的芽孢杆菌,如枯草芽孢杆菌 A30、T61、HW-14、J215、C87、B-332、SYX04、SYX20 等和解淀粉芽孢杆菌 T429、WH1G、RL263 等(表 1)。沙月霞等分离获得的 2 株枯草芽孢杆菌 SYX04 和 SYX20,在大田防效试验中显示出对穗颈瘟的最高防效分别为 83.8% 和 85.6%^[16]。部分解淀粉芽孢杆菌的发酵滤液对稻瘟病菌的生长有明显抑制作用,谷春艳等分离到 1 株解淀粉芽孢杆菌 WH1G,经平板拮抗试验发现,其对稻瘟病菌抑制活性较强,抑制率可达 91.79%^[22];湖南省微生物研究院王玉双等分离获得 1 株解淀粉芽孢杆菌 CWJ2,其无菌发酵滤液对稻瘟病菌抑制率可达 100%^[38]。游春平等发现,短小芽孢杆菌能显著抑制稻瘟病菌分生孢子萌发及附着胞形成,抑制率达到 100%;其发酵液稀释 100 倍后对稻瘟病菌的孢子萌发抑制率仍高达 97%^[25]。侧孢短芽孢杆菌对稻瘟病防效达到 30%~67%,可挽回水稻产量损失 35.0%~56.5%^[26]。蜡状芽孢杆菌 Ma-32 对稻瘟病抑制作用较强,平板抑菌试验发现,其抑菌圈半径可达 40 mm,连续 2 年在室内和田间进行稻瘟病防效测定,其防效均达 50%以上^[34]。坚强芽孢杆菌无菌培养滤液对稻瘟病的防治效果可达 70%以上^[27]。另外还有巨大芽孢杆菌、多黏类芽孢杆菌、甲基营养型芽孢杆菌等生防细菌对稻瘟病有显著防治效果的报道。Kanjnamaneesathian 等分离筛选到的巨大芽孢杆菌,在作物浸种后,苗期、分蘖期和花期持续喷

收稿日期:2018-02-09

基金项目:湖南省自然科学基金(编号:2016JJ2078);湖南省科技厅重大研发计划(编号:2016NK2173)。

作者简介:杨 华(1986—),女,湖南永州人,硕士,助理研究员,主要从事植物病虫害生物防治研究。E-mail:dyyhua@163.com。

通信作者:付祖姣(1979—),女,湖南岳阳人,博士,副研究员,主要从事植物病虫害生物防治研究。E-mail:fzjp2004@hotmail.com。

表 1 稻瘟病生防芽孢杆菌及室内抑菌效果

菌株种类	生防菌株	试验类型	活性物质	抑菌效果	参考文献
枯草芽孢杆菌	<i>B. subtilis</i> A30	平板对峙法	发酵液	抑菌圈直径 7 mm	[12]
	<i>B. subtilis</i> T61	平板对峙法	单菌落	抑菌圈直径 11.9 mm	[10]
	<i>B. subtilis</i> HW-14	平板对峙法	发酵液	抑菌圈直径 20.3 mm	[13]
	<i>B. subtilis</i> J215/ G87	平板对峙法	发酵液	抑菌带宽≥ 8.0 mm	[14]
	<i>B. subtilis</i> B-332	抑菌圈测定法	发酵液	抑菌带宽 25.85 mm	[15]
	<i>B. subtilis</i> SYX04	平板对峙法	发酵液	菌丝抑制率 95.6%	[16]
	<i>B. subtilis</i> SYX20	平板对峙法	发酵液	菌丝抑制率 97.5%	[16]
	<i>B. subtilis</i> J215	平板对峙法	发酵滤液稀释 2 倍	菌丝抑制率 69.9% ,	[17]
				孢子萌发抑制率 100%	
	<i>B. subtilis</i> G87	平板对峙法	发酵滤液稀释 2 倍	菌丝抑制率 75.4% ,	[17]
				孢子萌发抑制率 97.9%	
	<i>B. subtilis</i> B4	平板对峙法	发酵液	菌丝抑制率 >80% ,	[18]
				孢子萌发抑制率 100%	
	<i>B. subtilis</i> Sc2	菌丝生长速率法	发酵上清滤液	菌丝抑制率 >80%	[19]
	<i>B. subtilis</i> YN145	菌丝生长速率法	发酵上清滤液	菌丝抑制率 84.31%	[20]
	<i>B. subtilis</i> B-332	菌丝生长速率法	发酵上清液	菌丝抑制率 >92% ,	[15]
				孢子萌发抑制率 100%	
解淀粉芽孢杆菌	<i>B. amyloliquefaciens</i> T429	平板对峙法	干悬浮剂	抑菌带宽 12.00 mm	[21]
	<i>B. amyloliquefaciens</i> WH1G	平板对峙法	发酵液	菌丝抑制率 91.79%	[22]
	<i>B. amyloliquefaciens</i> RL263	菌丝生长速率法	发酵滤液	菌丝抑制率 88.44% ,	[22]
短小芽孢杆菌				孢子萌发抑制率 80.38%	
	<i>B. amyloliquefaciens</i> WH1G	离体叶片法	发酵液	病斑抑制率 66.6%	[23]
	<i>B. pumilus</i>	孢子萌发率抑制试验	发酵液	孢子萌发抑制率 100%	[24]
侧孢短芽孢杆菌	<i>B. pumilus</i>	孢子萌发率抑制试验	发酵液稀释 100 倍	孢子萌发抑制率 97%	[25]
	<i>B. laterosprous</i> BPM 3	抑菌圈测定法	发酵液	抑菌圈直径 29 mm	[26]
坚强芽孢杆菌	<i>B. firmus</i> D4.1	平板对峙法	发酵液	菌丝抑制率 83.3%	[27]
	<i>B. firmus</i> E65	平板对峙法	发酵滤液	菌丝抑制率 85%	[28]

表 2 稻瘟病生防芽孢杆菌及温室/田间试验抑菌效果

菌株种类	生防菌株	试验类型	活性物质	防效	参考文献
枯草芽孢杆菌	<i>B. subtilis</i> T429	温室	发酵液	苗瘟防效 69.4%	[11]
	<i>B. subtilis</i> T429	大田	粉剂	穗颈瘟防效 77.6% ~78.5%	[29]
	<i>B. subtilis</i> IK-1080	大田	菌悬液	叶瘟发生率减轻 7.7% ~13.8%	[30]
	<i>Bacillus</i> sp. Xh222	温室	发酵液	叶瘟防效 70.5%	[31]
	<i>B. subtilis</i> SYX04	2 年大田	发酵液	叶瘟防效 71.5% ~82.6% ,	[16]
				穗瘟防效 63.5% ~83.8%	
解淀粉芽孢杆菌	<i>B. subtilis</i> SYX20	2 年大田	发酵液	叶瘟防效 73.5% ~83.5% ,	[16]
				穗瘟防效 64.0% ~85.6%	
	<i>B. amyloliquefaciens</i> RL263	温室	发酵液	叶瘟防效 73.3%	[23]
短短芽孢杆菌	<i>B. amyloliquefaciens</i> RL263	4 年大田	发酵液	叶瘟防效 >70%	[23]
	<i>B. amyloliquefaciens</i> T429	大田	干悬浮剂	穗颈瘟防效 85.2%	[21]
侧孢短芽孢杆菌	<i>B. brevis</i> 1PE2	大田	发酵液	叶瘟防效 64.35%	[32]
蜡状芽孢杆菌	<i>B. laterosprous</i> BPM 3	温室	菌悬液	防效 30% ~67%	[26]
坚强芽孢杆菌	<i>B. ceruus</i> Z2-7	温室	菌悬液	发病指数降至 17.5% ~40.0%	[33]
	<i>B. cereus</i> Ma-32	2 年温室或大田	菌悬液	叶瘟防效 >50%	[34]
巨大芽孢杆菌	<i>B. firmus</i> E65	温室	菌悬液	稻瘟病发生率 28.7%	[28]
甲基营养型芽孢杆菌	<i>B. megaterium</i>	大田	水溶性颗粒制剂	穗颈瘟发生率 2.7% ~24.8%	[35]
多黏类芽孢杆菌	<i>B. methylophilicus</i> BC79	温室	发酵滤液	叶瘟防效 89.87%	[36]
	<i>B. methylophilicus</i> BC79	田间	发酵滤液	叶瘟防效 84.8%	[36]
	<i>P. polymyxa</i> LM-3	田间	纯化多肽	苗瘟防效 80.73%	[37]

施菌剂,并结合使用适量的氮肥,结果发现该菌对穗颈瘟有非常显著的防治效果^[35]。周华强分离到的多黏类芽孢杆菌 LM-3 菌株将其制备成微生源农药,该农药对水稻苗瘟的田

间防治效果达 80.73%^[37]。Shan 等自陕西秦岭分离到 1 株甲基营养型芽孢杆菌 BC79,其发酵滤液对稻瘟病的温室和田间防效分别达到 89.87% 和 84.8%^[36]。

基于这些发现,枯草芽孢杆菌 B-332、SYX20,解淀粉芽孢杆菌 WH1G、CWJ2,多黏类芽孢杆菌 LM-3,还有甲基营养型芽孢杆菌 BC79,都是比较高效的稻瘟病生防芽孢杆菌,对稻瘟病菌具有很强的抑制活性。然而,还需要进一步在离体叶片上以及温室或田间试验中进行防治效果测定,以更准确地评估这些芽孢杆菌对稻瘟病菌的生防潜力。

2 假单胞菌

假单胞菌属于革兰氏阴性菌,是植物根际最常见的优势微生物类群之一。假单胞菌中的部分种类可以产生多种具有

防病或促生作用的代谢产物,如抗生素、嗜铁素、酶、抗菌蛋白、胺类等物质,这些物质能直接抑制病原菌的侵染,对植物起保护作用^[39],因此在植物病害的生防领域已有大量研究与应用。该类细菌筛选相对简单,培养时间短,易于成活,产生的活性物质具有多样性,抗病能力强,而且有些菌种已经获国家专利,并开始逐步商业化应用。应用于防治水稻稻瘟病的假单胞菌种类主要有荧光假单胞菌(*Pseudomonas fluorescens*)、铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)、恶臭假单胞杆菌(*Pseudomonas putida*)等(表3、表4)。

表 3 稻瘟病生防假单胞菌及室内抑菌效果

菌株种类	生防菌株	试验类型	活性物质	抑菌效果或防效	参考文献
荧光假单胞菌	<i>P. fluorescens</i> Xh216	离体叶片法	发酵液	叶瘟防效 72.3%	[31]
	<i>P. fluorescens</i> AbⅢ745-6	菌丝生长速率法	发酵滤液	菌丝抑制率 96.88%	[40]
	<i>P. fluorescens</i> AbⅢ763-1	菌丝生长速率法	发酵滤液	菌丝抑制率 78.57%	[40]
	<i>P. fluorescens</i> EA105	平板对峙法	发酵上清滤液	附着胞抑制率 >90%,菌落抑制率 76%	[41]
	<i>P. fluorescens</i> EA105	温室	发酵液	病斑减少 33%	[41]
铜绿假单胞菌	<i>P. aeruginosa</i> SU 8	平板对峙法	发酵上清滤液	抑菌带宽 45.3 mm	[42]
	<i>Pseudomonas</i> B301	菌丝生长速率法	发酵液	菌丝抑制率 52.1%	[43]
	<i>Pseudomonas</i> G-05	平板对峙法	发酵液	抑菌带宽 21.0 mm	[44]

表 4 稻瘟病生防假单胞菌温室或田间试验抑菌效果

菌株种类	生防菌株	试验类型	活性物质	抑菌效果或防效	参考文献
荧光假单胞菌	<i>P. fluorescens</i> Pf7-14	大田	菌悬液	叶瘟防效 78.7%,穗颈瘟防效 82.4%	[45]
	<i>P. fluorescens</i> JKD-2	温室	菌悬液	叶瘟防效 60%	[46]
	<i>P. fluorescens</i> SP007s	大田	粉末和颗粒制剂	增产效果 52.1%	[47]
	<i>P. fluorescens</i>	大田	发酵液	穗颈瘟强度控制在 37.46%	[48]
铜绿假单胞菌	<i>P. aeruginosa</i> PR3	温室	不饱和脂肪酸	病菌抑制率 29%	[49]
	<i>Pseudomonas</i> B301	大田	发酵液	叶瘟防效 45.01%	[43]
	<i>Pseudomonas</i> G-05	大田	菌悬液	叶瘟防效 50.8%,穗颈瘟防效 44.7%	[44]

近年来国外对荧光假单胞菌进行了较为深入的研究,Chatterjee 等选育出既能强烈抑制稻瘟病菌,又对其他多种病害有防效的荧光假单胞菌菌株 Pf7-14,并通过构建突变体,发现该菌株防治稻瘟病的主要机制依赖于其产生的抗真菌抗生素 phenazine-1-carboxylic acid(PCA)^[44]。使用利福平抗性标记的 Pf7-14 突变菌株对水稻叶瘟的防效为 47%,且对穗颈瘟也有一定的防效^[49]。西北农林科技大学的李爱荣等从番茄根际土壤中筛选出荧光假单胞杆菌 AbⅢ745-6 和 AbⅢ763-1,它们对稻瘟病病原菌菌丝的抑制率分别达 96.88% 和 78.57%^[40]。章茂林从稻鸭生态系统中筛选出 1 株铜绿假单胞菌 SU 8,对稻瘟病菌的抑菌带宽达 45.3 mm,其发酵滤液对稻瘟病菌的抑菌活性较弱,但发酵液的乙酸乙酯萃取物对稻瘟病菌的抑菌带宽为 20.8 mm^[42]。

3 其他种类的细菌

除芽孢杆菌和假单胞菌外,对稻瘟病具有防治效果的其他细菌种类还有肠杆菌属、葡萄球菌、欧文氏菌等(表5)。

杨海莲等发现,在温室条件下使用阴沟肠杆菌 *Enterobacter cloacae* MR 12 对水稻进行喷雾处理,能达到 60.5% 的防治效果^[51]。Yu 等从海水中分离得到的葡萄球菌菌株 *Staphylococcus* sp. LZ16,研究发现,其培养滤液和菌体细胞均能明显抑制稻瘟病菌的生长;用 LZ16 菌株细胞裂解液

处理稻瘟病菌,对病菌的分生孢子萌发、芽管伸长、附着胞形成有显著抑制效果;该菌对稻瘟病菌的田间防效试验也显示了较好的拮抗活性^[53]。Fillippi 等从水稻根际土壤分离到 2 株细菌 Rizo-46 和 Rizo-55,对稻瘟病防效最高可达到 90%~95%^[54]。Someya 等利用遗传转化技术构建了一个新的可以在水稻叶片有效定殖的水稻稻瘟病生防菌株 *Erwinia ananas*,转化后的 *Erwinia ananas* NR-1 对病菌的菌丝生长和分生孢子萌发有显著抑制作用;转化菌株与野生型菌株相比,在温室试验中经叶面喷雾能够显著降低叶瘟发病率^[52]。张芬等从水稻根系土壤样品中分离到的伯克霍尔德菌属 *Burkholderia* T392,其发酵液对稻瘟病的室内防效达 61.1%^[11]。伯克霍尔德菌是一类在土壤、水和植物根际中广泛存在的革兰氏阴性细菌,但目前国内外尚无利用该菌研制和生产稻瘟病菌生防制剂的报道,其生防机制也尚不明确,所以还须进一步深入研究。

4 细菌次级代谢产物

研究表明,细菌能产生多种对稻瘟病菌具有抗菌活性的化合物。自 1945 年 Johnson 等首次报道枯草芽孢杆菌能产生抗菌物质^[4]后,人们从不同生防细菌中陆续发现的抗生素达 60 多种。这些抗菌活性物质主要是小分子抗菌素、多肽类物质和蛋白类拮抗物。例如,王法国等通过有机溶剂萃取得到

表 5 其他生防细菌对稻瘟病菌的抑菌效果

菌株种类	生物防治剂	试验类型	活性物质	抑菌率或防效	参考文献
肠杆菌属	<i>Enterobacter cloacae</i> MR12	温室	发酵液	防效 60.5%	[51]
欧文氏菌属	<i>Erwiniaananas</i> NR-1	温室	菌悬液	叶瘟防效 69%	[52]
—	<i>Deinococcus aquaticus</i> 1RE14	大田	菌悬液	叶瘟防效 57.86%	[32]
葡萄球菌	<i>Staphylococcus</i> sp. LZ16	孢子萌发率抑制试验	细胞裂解液	孢子萌发率降低 40%,附着胞减少 40%	[53]
	<i>Staphylococcus</i> sp. LZ16	大田	发酵滤液	病情指数降低 75%	[53]
	Rizo-46/Rizo-55	温室	菌悬液	叶瘟防效为 95% 和 90%	[51]
伯克霍尔德菌属	<i>Burkholderia</i> T392	温室	发酵液	菌丝抑制率 61.1%	[11]

注:“—”表示对应菌株种类尚没有确切中文含义。

解淀粉芽孢杆菌干悬浮剂中的脂肽类物质,该物质对稻瘟病表现出较强的抑菌作用,田间试验结果显示,对穗颈瘟有较好的防治效果,与三环唑的防治效果相当^[21],而且脂肽类物质性质比较稳定,可以开发成农用抗生素。周华强通过加热纯化法从多黏类芽孢杆菌 LM-3 菌株中提取出的次级代谢产物 P2 蛋白,对稻瘟病菌具有较强的拮抗活性;通过对 LM-3 菌株的发酵液进行分离纯化,得到一种不同于 P2 蛋白的极端嗜热小分子多肽 APPLM3,对稻瘟病菌抑制率高达 89.6%^[37]。许煜泉等从稻茬中分离得到假单胞杆菌 JD-2,该菌经稻草培养基诱导后能分泌一种胞外蛋白,对病原菌具有拮抗作用^[46];他还对菌株在不同的铁环境下分泌铁载体与抑菌活性的关系进行了研究,结果发现,该菌株能在低铁条件下,分泌一类与铁高亲和的铁载体,并转移至微生物体内满足其生长需要,同时通过竞争性地与铁结合,从而抑制了稻瘟病菌的生长^[55]。细菌产生的这些生物活性化合物是天然的,通常可被生物降解,因此可发展成具有更多病原体特异性且对环境具有最小副作用的农业杀真菌剂,替代合成杀真菌剂用于稻瘟病的防治。

5 问题与展望

植物病害的生物防治通常具备廉价、持久,对环境和生物体安全、环保等优势,因此有必要提倡并大力推广,利用拮抗细菌及其抗菌物质来防治水稻稻瘟病为人们提供了一条既经济有效又无副作用的防治途径。虽然目前国内外对稻瘟病主要拮抗细菌的一些研究已比较深入,但总体上看还存在很多问题,仍需进一步加强系统和深入的研究。

第一,高效且防效稳定的生防菌资源还有待进一步挖掘。尽管能抑制或拮抗稻瘟病的生防细菌种类繁多,但主要来源比较集中。通过广泛地筛选不同生境下的有益微生物资源,如从资源丰富的海洋微生物、极端环境等筛选到具有高效拮抗作用的菌株,开发应用到农业生产中;还可通过基因工程、遗传工程等手段改造生防细菌或对生防细菌产生的抗菌活性化合物进行改良,形成具有稳定性能的生产菌株,使拮抗细菌能产生更多的拮抗物质,这对于解决高效且防效稳定的生防菌来源不足的问题,具有重要的开发作用。

第二,目前生防制剂研究大多还集中在实验室,缺少成型的产品制剂和剂型。一些在离体试验或实验室中表现出防效优势的生物防治剂,受自然条件、气候等外界条件影响,在温室或田间试验条件下对植物病害可能很难表现出高的防效。因此,对于表现优良的生防菌株,进行大量的田间试验以确定

其在不同环境条件下的防病效果,研究能促进制剂防效提高和稳定的助剂,摸索制剂的最佳使用方法和作用条件,是生防制剂能广泛应用的必备条件。

第三,生防制剂产品的开发应用。目前农民对生物农药的认知较滞后,开展产品田间示范试验和组织田间观摩会,将产品和使用技术送到农民手中,让农民亲身体会到产品实际效果;同时通过技术创新,深层次地研究优良生防菌具备的功能特点和生防机制,优化分离、配制和施用方法,通过筛选潜力较大的高效生防细菌,与低毒农药混合配制,以替代或部分替代传统化学农药,达到减少化学农药施放量的目的,对于实现农业的可持续发展具有重大的现实意义。

总而言之,生物防治可能是一个缓慢的过程,寻找合适的生物防治剂也需要相当多的时间和精力。随着人们对粮食安全的要求越来越高,生物防治在农业生产中也越来越被重视,生防细菌的研究与开发利用会越来越多,稻瘟病的生物防治研究工作会得到新的发展。

参考文献:

[1] Skamnioti P, Gurr S J. Against the grain; safeguarding rice from rice blast disease[J]. Trends in Biotechnology, 2009, 27(3): 141-150.

[2] Ashkani S, Yusop M R, Shabanimofrad M, et al. Genetic analysis of resistance to rice blast: a study on the inheritance of resistance to the blast disease pathogen in an F3 population of rice[J]. Journal of Phytopathology, 2015, 163(4): 300-309.

[3] 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.

[4] Johnson F H, Campbell H C. The retardation of protein denaturation by hydrostatic pressure[J]. Jour Cell And Comp Physiol, 1945, 26: 43-46.

[5] 王 勇, 王万立, 刘春艳, 等. 绿色木霉 T9701 对多种病原菌的抑制作用及其抑病机理[J]. 中国农学通报, 2008, 24(1): 371-374.

[6] Zhang C, Zhang X, Shen S. Proteome analysis for antifungal effects of *Bacillus subtilis* KB-1122 on *Magnaporthe grisea* P131[J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2014, 30(6): 1763-1774.

[7] Hyakumachi M, Nishimura M, Arakawa T, et al. *Bacillus thuringiensis* suppresses bacterial wilt disease caused by *Ralstonia solanacearum* with systemic induction of defense-related gene expression in tomato[J]. Microbes and Environments, 2012, 28(1): 128-134.

[8] Shoda M. Bacterial control of plant disease[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2000, 89(6): 515-521.

[9] Baker R. Diversity in biological control[J]. Crop Protection, 1991, 10(2): 85-94.

- [10]石 皎,任大明,李秀娜,等. 水稻稻瘟病拮抗细菌的筛选与鉴定[J]. 沈阳农业大学学报,2008,39(4):489-491.
- [11]张 芬,刘卹洲,于俊杰,等. 水稻稻瘟病菌拮抗细菌的筛选与鉴定[J]. 江苏农业学报,2011,27(3):505-509.
- [12]陈卫良,龚鸿飞. 拮抗细菌 *Bacillus subtilis* A30 对水稻病原菌的抑制作用[J]. 浙江农业大学学报,1997(6):649-654.
- [13]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,2013:13-19.
- [14]朱 凤,陈夕军,童蕴慧,等. 水稻内生细菌的分离及其拮抗性与其潜在致病性测定[J]. 中国生物防治,2007,23(1):68-72.
- [15]穆常青,潘 玮,陆庆光,等. 枯草芽孢杆菌对稻瘟病的防治效果评价及机制初探[J]. 中国生物防治,2006,22(2):158-160.
- [16]沙月霞,王 琦,李 燕. 稻瘟病生防芽孢杆菌的筛选及防治效果[J]. 中国生物防治学报,2016,32(4):474-484.
- [17]陈夕军,胡长松,童蕴慧,等. 水稻内生枯草芽孢杆菌对稻瘟病菌和稻恶苗病菌的抑制作用[J]. 中国生物防治,2008,24(4):339-344.
- [18]刘诗胤. 生防菌 MF-91 对水稻主要病害防治效果、根际微生物多样性及稻米品质的影响[D]. 杭州:杭州师范大学,2012:34-42.
- [19]韩雨桐,刘烨,张淋淋,等. 稻瘟病菌拮抗细菌的筛选及其防效作用研究[J]. 东北农业科学,2016,41(3):67-72.
- [20]邹秋霞,任佐华,高诗涵,等. 枯草芽孢杆菌 YN145 分离鉴定及抑菌活性[J]. 中国生物防治学报,2017,33(3):421-426.
- [21]王法国,许萍萍,张荣胜,等. 解淀粉芽孢杆菌干悬浮剂对稻瘟病的防治效果及安全性评价[J]. 中国生物防治学报,2017,33(2):241-247.
- [22]谷春艳,张爱芳,杨 雪,等. 水稻稻瘟病拮抗细菌 WH1G 的筛选鉴定及其抑菌活性[J]. 植物保护,2016,42(4):48-55.
- [23]李双东. 防治稻瘟病芽孢杆菌的筛选及生防机制研究[D]. 北京:中国农业大学,2015:23-31.
- [24]游春平,肖爱萍,李湘明,等. 稻瘟病菌拮抗微生物的筛选及鉴定[J]. 江西农业大学学报,2001,23(4):519-521.
- [25]游春平,肖爱萍,魏金莲,等. 稻瘟病拮抗细菌的活性研究[J]. 江西农业大学学报,2002,24(1):24-26.
- [26]Saikia R, Gogoi D K, Mazumder S, et al. *Brevibacillus laterosporus* strain BPM3, a potential biocontrol agent isolated from a natural hot water spring of Assam, India. [J]. Microbiological Research, 2010, 166(3):216-225.
- [27]Chaiham 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.
- [28]Suryadi Y, Susilowati D N, Riana E, et al. Management of rice blast disease (*Pyricularia oryzae*) using formulated bacterial consortium [J]. Emirates Journal of Food and Agriculture, 2013, 25(5):349-357.
- [29]Meng X K, Yu J J, Yu M N, 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.
- [30]Taguchi Y, Hyakumachi M, Horinouchi H, et al. Biological control of rice blast disease by *Bacillus subtilis* IK-1080 [J]. Annals of the Phytopathological Society of Japan, 2003, 69(2):85-93.
- [31]林福呈,林维挺,陈卫良,等. 稻瘟病菌的拮抗细菌筛选[J]. 浙江农业大学学报,1998,24(6):591-594.
- [32]Yang J H, Liu H X, Zhu G M, et al. Diversity analysis of antagonists from rice-associated bacteria and their application in biocontrol of rice diseases [J]. Journal of Applied Microbiology, 2008, 104(1):91-104.
- [33]Naureen Z, Price A H, Hafeez F Y, et al. Identification of riceblast disease-suppressing bacterial strains from the rhizosphere of rice grown in Pakistan [J]. Crop Protection, 2009, 28(12):1052-1060.
- [34]彭化贤,刘波微,陈小娟,等. 水稻稻瘟病拮抗细菌的筛选与防治初探[J]. 中国生物防治,2002,18(1):25-27.
- [35]Kanjanaameesathian M, Chumthong A, Pengnoo A, et al. *Bacillus megaterium* suppresses major Thailand rice diseases [J]. Asian Journal of Food and Agro-Industry, 2009: S154-S159.
- [36]Shan H Y, Zhao M M, Chen D X, et al. Biocontrol of rice blast by the phenaminomethylacetic acid producer of *Bacillus methylotrophicus* strain BC79 [J]. Crop Protecion, 2013, 44:29-37.
- [37]周华强. 多黏类芽孢杆菌极端嗜热多肽的纯化、基因克隆及其对稻瘟病的防治研究[D]. 雅安:四川农业大学,2007:25-29, 44-45.
- [38]王玉双,肖 蓉,郭照辉,等. 来源于中药的稻瘟病菌拮抗解淀粉芽孢杆菌鉴定及其活性成分特性[J]. 中国生物防治学报, 2018, 34(5):746-752.
- [39]Cook R J. Making greater use of introduced microorganisms for biological control of plant pathogens [J]. Annual Review of Phytopathology, 1993, 31:53-80.
- [40]李爱荣,安德荣. 两株生防荧光假单胞杆菌的室内筛选试验[J]. 微生物学杂志,2003,23(4):11-13.
- [41]Spence C, Alff E, Johnson C, et al. Natural rice rhizospheric microbes suppress rice blast infections [J]. BMC Plant Biology, 2014, 14(1):130-146.
- [42]章茂林. 拮抗细菌 SU 8 抑菌活性与抑菌物质提取及其理化性质巧步研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2014:7-9.
- [43]肖炎农,程 瑜,王明祖,等. 假单胞杆菌 B301 对稻瘟病菌的拮抗性[J]. 植物保护学报,2000,27(3):227-230.
- [44]王继春,任金平,韩润亭,等. 水稻病害生防细菌的筛选及其生物活性测定[J]. 吉林农业科学,2002,27(增刊1):41-43.
- [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]许煜泉,张 彦,俞吉安,等. 一株拮抗稻瘟病菌的产荧光假单胞杆菌[J]. 上海交通大学学报,1998,32(3):111-115.
- [47]Prathuangwong S, Chuaboon W, Chatnaparat T, et al. Induction of disease and drought resistance in rice by *Pseudomonas fluorescens* SP007 [J]. Chiang Mai University Journal of Natural Sciences, 2012, 11(1):45-56.
- [48]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.
- [49]Kuo T M, Kim H, Hou C T. Production of a novel compound, 7, 10, 12-trihydroxy 8(E)-octadecenoic acid from ricinoleic acid by *Pseudomonas nasaeruginosa* PR3 [J]. Current Microbiology, 2001, 43(3):198-203.
- [50]胡水秀,李湘民,华菊玲. 拮抗细菌菌株 B5423 和 Pf7-14 对稻

吕秋霞,程兆榜,何敦春. 水稻条纹叶枯病流行风险源和影响指标[J]. 江苏农业科学,2019,47(7):104-107.
doi:10.15889/j. issn. 1002-1302. 2019. 07. 026

水稻条纹叶枯病流行风险源和影响指标

吕秋霞¹, 程兆榜^{1,2}, 何敦春^{1,3}

(1. 福建农林大学植物病毒研究所, 福建福州 350002; 2. 江苏省农业科学院植物保护研究所, 江苏南京 210014;
3. 泉州理工学院, 福建泉州 362268)

摘要:水稻条纹叶枯病历史上多次流行并造成严重损失,具爆发性、间歇性特点。水稻条纹叶枯病流行及防控研究是一项复杂的系统工程,风险源和影响指标确定是首要工作。运用等级全息建模理论,结合文献分析、专家访谈对水稻条纹叶枯病流行风险源和影响指标进行筛选和归类,提出介体灰飞虱虫量、带毒率、带毒虫量、气温、雨量、水稻品种抗病性、生产方式、水稻和小麦种植与收获的方式、时期以及时间交叠、化学防治措施等可作为水稻条纹叶枯病流行风险的影响指标,旨在为病害流行防控研究和实践提供更清晰的思路和视角。

关键词:水稻条纹叶枯病;流行风险;全面风险管理;影响指标;预测预警

中图分类号: S435.111.4⁺9 文献标志码: A 文章编号: 1002-1302(2019)07-0104-04

植物病害的发生是植物在生物因素和非生物因素作用下,植物代谢功能失调所引起的植物生命系统的不协调;植物病害的流行是植物生命系统在生物因素和非生物因素作用下,人为干预不当所引起的农业生态系统的不协调^[1]。正如其他植物病原生物一样,人类的病害管理活动,有时会破坏生态平衡,起到桥梁过渡作用,导致农田有害生物的再猖獗,这和原始森林、野生植物有很大不同^[2]。水稻条纹病毒(Rice stripe virus,简称RSV)所致的水稻条纹叶枯病亦是如此,其生物因素(如病原生物、寄主植物、传毒介体)、非生物因素(如温度、降水量等)在一定程度上可归纳为自然因素,人为干预(如品种选用、耕作方式、市场经济行为、消费偏好、信息流等)可归纳为人为因素^[3]。RSV危害水稻主要通过抑制水稻生长发育影响产量以及传毒介体昆虫灰飞虱取食对水稻产生的直接损害。但由于水稻自身的补偿机制和自身免疫功能,

收稿日期:2018-05-22

基金项目:福建省自然科学基金(编号:2018J01707);福建省产业支撑科技重大项目(编号:2012N4001);国家自然科学基金(编号:3030023)。

作者简介:吕秋霞(1990—),女,福建泉州人,硕士,研究方向为植病经济学。E-mail:617930574@qq.com。

通信作者:何敦春,博士,副研究员,主要从事植病经济学研究。Tel:
(0591)83789439;E-mail:hedunchun@126.com。

RSV 的发病并非一定会造成损失,只有病情在达到一定阈值时其指数才会与损失显著相关。换句话说,水稻条纹叶枯病流行风险的结果是造成损失,水稻条纹叶枯病是风险事件,在各风险源因素影响下,水稻条纹叶枯病风险事件发展到一定程度后才引起损失。风险是面向未来的,归因于自然因素的发展和人为决策(如病害防控、耕作安排等)。水稻条纹叶枯病流行是一个复杂的系统,各风险源因素相互影响,厘清、划分和阐明这些因素,对分析、管理病害流行风险至关重要,直接影响防控效果和效益。因此,本研究借助全面风险管理(total risk management,简称 TRM)的等级全息建模(hierarchical holographic modeling,简称 HHM)^[4]和文献分析方法^[5],建立生物灾害风险、环境诱灾风险和人为致灾风险的三大风险子系统指标体系,并据此开展深入的专家访谈以进一步筛选出全面精确的影响指标,以期为分析水稻条纹叶枯病流行规律、风险形成机制、预测预警、管理决策等提供依据。

1 研究方法

1.1 全面风险管理

全面风险管理是一个系统化的、基于统计的整体过程,它的基础是风险评估和管理的量化分析^[4],提出了等级多目标框架的研究思路。全面风险管理提出了在等级多目标框架内研究风险源、风险评估和风险管理,使风险研究是基于实际

瘟病的防效及其在稻株上的种群动态[J]. 江西农业学报, 2003, 15(4): 27-30.

[51] 杨海莲, 孙晓璐, 宋 未, 等. 水稻内生阴沟肠杆菌 MR12 的鉴定及其固氮和防病作用研究[J]. 植物病理学报, 2001, 31(1): 92-93.

[52] Someya N, 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.

[53] Yu Q, Liu Z, Lin D R, 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.

[54] Filippi M C C, da Silva G B, Silva – lobo V L, et al. Leaf blast (*Magnaporthe oryzae*) suppression and growth promotion by rhizobacteria on aerobic rice in Brazil[J]. Biological Control,2011, 58(2):160 – 166.

[55] 许煜泉,高虹,童耕雷,等. 假单胞杆菌株 JKD-2 分泌铁载体抑制稻瘟病菌[J]. 微生物学通报,1999,26(3):180-183.