

AMI (职院刊) 核心期刊

RCCSE中国核心学术期刊 (A)

中国学术期刊影响因子年报统计源期刊

《中国核心期刊 (遴选) 数据库》收录期刊

美国《化学文摘》数据库收录

ISSN 2095-7300

CN 43-1522/Q

湖南生态科学学报

Journal of Hunan Ecological Science

湖南生态科学学报

第十卷 Vol.10
第2期 No.2

二〇二三年六月

2023 第10卷 第2期
VOL.10 NO.2



《湖南生态科学学报》第二届编辑委员会

主任委员：苏 立

副主任委员：庾庐山

主 编：梁忠厚 颜晓元

副主编：蒋一锄

编 委（按姓氏拼音为序）：

白军红 北京师范大学

陈光才 中国林业科学研究院亚热带林业研究所

陈永忠 湖南省林业科学院

丁 凡 沈阳农业大学

范 适 湖南环境生物职业技术学院

付美云 湖南环境生物职业技术学院

胡永灵 湖南环境生物职业技术学院

李芳柏 广东省科学院生态环境与土壤研究所

梁忠厚 湖南环境生物职业技术学院

刘惠芬 天津农学院

刘俊栋 江苏农牧科技职业学院

刘卫东 中南林业科技大学

马锦林 广西壮族自治区林业科学研究院

圣倩倩 南京林业大学

谭志远 华南农业大学

汪 洋 湖北生态工程职业技术学院

王克林 中国科学院亚热带农业生态研究所

王旭军 湖南省林业科学院

温小荣 南京林业大学

吴艳宏 中国科学院成都山地灾害与环境研究所

颜晓元 中国科学院南京土壤研究所

杨 华 湖南农业大学

易 诚 衡阳师范学院

于飞海 台州学院

曾长立 江汉大学

湛方栋 云南农业大学

郑冠宇 南京农业大学

周国英 中南林业科技大学

周顺桂 福建农林大学

朱校奇 湖南省农业科学院

陈功锡 吉首大学

陈旭辉 沈阳农业大学

邓明华 云南农业大学

杜辉辉 湖南农业大学

方 迪 南京农业大学

何铁光 广西壮族自治区农业科学院

姜小文 湖南环境生物职业技术学院

李顺祥 湖南中医药大学

刘爱民 安徽师范大学

刘菊华 海南大学

刘鸣达 沈阳农业大学

柳开楼 江西省红壤及种质资源研究所

彭佩钦 中南林业科技大学

苏 立 湖南环境生物职业技术学院

汪思龙 中国科学院沈阳应用生态研究所

王金龙 天津农学院

王晓明 湖南省林业科学院

魏甲彬 湖南环境生物职业技术学院

文锦芬 昆明理工大学

武攀峰 江苏省南通环境监测中心

杨钙仁 广西大学

杨 宁 湖南环境生物职业技术学院

易镇邪 湖南农业大学

庾庐山 湖南环境生物职业技术学院

曾建国 湖南农业大学

张少良 东北农业大学

钟金凤 湖南环境生物职业技术学院

周立祥 南京农业大学

周尧治 西藏农牧学院

祝遵凌 南京林业大学

目 次

研究论文

褪黑素对 NaOH 胁迫下伞房决明生理特性的影响	许艳婷, 邹乾相, 黄紫琚, 廖飞勇 (1)
杉木无性系叶形态变异研究及相关关系分析	庾庐山, 赵林峰 (11)
基于 PSR 模型的岳阳市景观健康时空演变研究	贺重玉, 曹诗怡, 严娟, 戴阿森, 翁远鑫 (18)
湖南草芍药籽仁蛋白质和脂肪酸的分析研究	彭翠英, 侯艳, 程勇, 王旭军 (29)
藜蒿浸提液对番茄、西瓜种子萌发及幼苗生长的影响	何思晓, 王玉婕, 曾长立, 万何平, 谢倩, 戴希刚 (35)
不同形态铁盐对青花菜幼苗生理及硫苷含量的影响	任玉欣, 邹宜芯, 郭海艳, 闫瑾, 马超超, 李慧 (41)
5 种水生植物对富营养化水体净化效果研究	陈怡, 张乔雨, 郭春兰, 卞阿娜 (48)
铁锰基材料对重度砷污染土壤的稳定化处理研究	吴含章, 彭佩钦, 余志元, 李二平, 奚燕妮, 李子雄, 赵文博, 李益华 (55)
外源硫酸锌对糯玉米种子萌发和幼苗生长的影响	刘玲丽, 杜锦, 向春阳, 丁建文, 张晓辰, 杨兴 (65)
城市湿地对局地小气候的影响	刘德政, 刘柄麟, 谢丽 (71)
武陵山区不同品种雪茄烟发酵后品质特征对比	郭世杰, 谭永浩, 向东, 段淑辉, 全益华, 唐星宇, 王振华 (79)

研究综述

城市绿地生态效益测度研究进展	圣倩倩, 季亚欧, 祝遵凌 (91)
生物炭添加对根际土壤微生物群落影响研究进展	魏甲彬, 李有清 (101)
生防菌在植物病害领域的研究进展	李雨欣, 戴欣宇, 曹雪梅, 李二峰 (109)

CONTENTS

Research paper

- Effects of Melatonin on the Physiological Characteristics of *Senna corymbosa* Under NaOH Stress
..... XU Yanting,ZOU Qianxiang,HUANG Zijun,LIAO Feiyong(1)
- Study on Leaf Morphological Variation and Correlation Analysis of *Cunninghamia lanceolata* Clones
..... YU Lushan,ZHAO Linfeng(11)
- Study on Spatiotemporal Evolution of Landscape Health in Yueyang City Based on PSR Model
..... HE Chongyu,CAO Shiyi,YAN Juan,DAI Amiao,WENG Yuanxin(18)
- Analysis of Protein and Fatty Acid of Seed of *Paeonia obovata* in Hunan Province
..... PENG Cuiying,HOU Yan,CHENG Yong,WANG Xujun(29)
- The Effect of Extracts from *Artemisia selengensis* on Seed Germination and Seedling Growth of Tomato and Watermelon HE Sixiao,WANG Yujie,ZENG Changli,WAN Heping,XIE Qian,DAI Xigang(35)
- Effects of Different Forms of Iron Salts on the Physiology and Glucosinolate Content of Broccoli Seedlings
..... REN Yuxin,ZOU Yixin,WU Haiyan,YAN Jin,MA Chaochao,LI Hui(41)
- Study on the Purification Effect of Five Aquatic Plants on Eutrophic Water
..... CHEN Yi,ZHANG Qiaoyu,GUO Chunlan,BIAN A'na(48)
- Study on Stabilization of Heavy Arsenic Contaminated Soil by Fe-Mn-based Materials
..... WU Hanzhang,PENG Peiqin,YU Zhiyuan,LI Erping,XI Yanni,LI Zixiong,ZHAO Wenbo,LI Yihua(55)
- Effects of Exogenous Zinc Sulfate on Seed Germination and Seedling Growth of Waxy Maize
..... LIU Lingli,DU Jin,XIANG Chunyang,DING Jianwen,ZHANG Xiaochen,YANG Xing(65)
- The Effect of Urban Wetlands on Local Microclimate LIU Dezheng,LIU Binglin,XIE Li(71)
- Comparison of Quality Characteristics of Different Varieties of Cigars after Fermentation in Wuling Mountain Area
..... GUO Shijie,TAN Yonghao,XIANG Dong,DUAN Shuhui,
QUAN Yihua,TANG Xingyu,WANG Zhenhua(79)

Research review

- Research Status of Ecological Benefit Measurement of Urban Green Space
..... SHENG Qianqian,JI Yaou,ZHU Zunling(91)
- Research Progress on the Effects of Biochar Addition on Rhizosphere Soil Microbial Communities
..... WEI Jiabin,LI Youqing(101)
- Research Progress of Microbial Antagonists in the Field of Plant Diseases
..... LI Yuxin,DAI Xinyu,CAO Xuemei,LI Erfeng(109)

生防菌在植物病害领域的研究进展

李雨欣, 戴欣宇, 曹雪梅, 李二峰*

(天津农学院 园艺园林学院, 天津 300384)

摘要:植物病害造成作物品质下降和产量降低,严重影响农业生产。为了能更科学、更绿色地控制植物病害,生物防治作为一种新型防治手段在植物病害领域飞速发展。生防菌的发现是生物防治研究的重要进程。生防菌种类较多,生物学性状优良,拮抗机制多样,寄生范围广泛,是解决植物病害重要的生物防治手段,具有广阔的发展前景。本文综述了近年来通过生防菌对植物病害进行防治的研究进展,总结了包括细菌、真菌、放线菌、病毒的弱毒株系和噬菌体五类生防菌及其在国内外防控植物病害的应用情况,阐述了直接和间接的多种作用机制,并对后续研究发展趋势进行了展望,以为生防菌的深入研究及其更好的应用提供理论参考。

关键词:生防菌;植物病害;作用机制;生物防治

中图分类号: S436

文献标志码: A

文章编号: 2095-7300(2023)02-0109-08

Research Progress of Microbial Antagonists in the Field of Plant Diseases

LI Yuxin, DAI Xinyu, CAO Xuemei, LI Erfeng*

(College of Horticulture and Landscape, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China)

Abstract: Plant diseases cause crop quality degradation and yield reduction, which seriously affect agricultural production. In order to control plant diseases in a more scientific and green way, biological control as a new control means is developing rapidly in the field of plant diseases. The discovery of microbial antagonists is an important process in biocontrol research. With more species, excellent biological traits, various antagonistic mechanisms, and a wide range of parasitism, microbial antagonists are important biological control tools for plant diseases and have a broad developmental prospect. This paper reviews the research progress of plant disease control by microbial antagonists in recent years, summarizes five types of microbial antagonists, including bacteria, fungi, actinomycetes, weak strains of viruses and phages, and their applications in plant disease control at home and abroad, describes various direct and

收稿日期: 2022-12-10

基金项目: 农业农村部农产品质量安全收贮运管控重点实验室开放课题(S2022KFKT-11);大学生创新创业训练计划项目(202210061012)。

作者简介: * 为通信作者,李二峰,博士,讲师,研究方向:植物病原菌致病机理及病害生物防治, E-mail: lef143@126.com;李雨欣,硕士研究生,研究方向:植物病害防治, E-mail: liyuxin0525@126.com。

引文格式: 李雨欣,戴欣宇,曹雪梅,等. 生防菌在植物病害领域的研究进展[J]. 湖南生态科学学报, 2023, 10(2): 109-116. LI Y X, DAI X Y, CAO X M, et al. Research progress of microbial antagonists in the field of plant diseases[J]. Journal of Hunan Ecological Science, 2023, 10(2): 109-116.

indirect mechanisms of action, and provides an outlook on the development trend of subsequent research in order to provide the theoretical reference for further research and better application of microbial antagonists.

Keywords: microbial antagonist; plant diseases; mechanism; biological control

生物防治是指利用有益生物及其代谢产物对植物病害进行防治。不同于化学防治,其最大的优点是对人畜安全、对环境友好。因此,利用生防微生物的绿色防治方式越来越受到人们的关注,具有广阔的发展前景。早期的研究工作已多次报道,天然拮抗微生物可以防治多种植物病害^[1]。国内外很多学者对生防菌株展开了大量的研究,包括生防菌的筛选和鉴定、防治效果、作用机制以及产品开发应用等诸多方面。

1 生防菌的种类和应用

1.1 生防菌的种类

目前越来越多的生防菌种类在植物病害防治中得到广泛应用,主要涵盖细菌、真菌、放线菌、病毒的弱毒株系和噬菌体五大类。国内外研究较多的生防细菌主要是芽孢杆菌(*Bacillus*)、假单胞杆菌(*Pseudomonas*)、溶杆菌(*Lysobacter*)、放射土壤杆菌(*Agrobacterium radiobacter*)和巴氏杆菌(*Pasteurella*)等;研究较多的生防真菌主要是木霉菌(*Trichoderma*)、盾壳霉(*Coniothyrium*)、拟青霉(*Paecilomyces*)、粘帚霉(*Gliocladium*)、酵母菌(*Saccharomyces*)等;研究较多的生防放线菌主要为链霉菌(*Streptomyces*)。

1.2 生防菌在植物病害中的应用

1.2.1 生防细菌的应用

细菌是生防菌中应用最广泛的一类。芽孢杆菌和假单胞菌是众所周知的生物控制剂,而关于溶杆菌的研究则相对较少。

芽孢杆菌已被证明对多种植物病原物有效,可作为植物生长促进剂、系统抗性诱导剂^[2],主要种类有枯草芽孢杆菌(*B. subtilis*)、解淀粉芽孢杆菌(*B. amyloliquefaciens*)、贝莱斯芽孢杆菌(*B. velezensis*)等。芽孢杆菌的抑菌范围很广,因其突出的自身优势,对多种植物病害的防治都具有显著成效,在生防领域应用广泛。孙正祥等^[3]的研究结果显示,枯草芽孢杆菌 YZU-S149 对西瓜枯萎病的室内盆栽防效为 75.87%,优于百菌清 500 倍稀释液

的施用效果,同时对水稻纹枯病菌(*Rhizoctonia solani*)、小麦赤霉病菌(*Fusarium graminearum*)、玉米茎基腐病菌(*F. moniliforme*)、马铃薯晚疫病病菌(*Phytophthora infestans*)也都具有良好的抑菌效果。李扬凡等^[4]发现解淀粉芽孢杆菌 HMB33604 使立枯丝核菌(*R. solani*) AG-3 菌丝畸形,并且降低病原菌数量,从而有效防治马铃薯黑痣病。李坤瑀等^[5]研究发现贝莱斯芽孢杆菌 5-8 对水稻稻瘟病的防效可达 90% 以上,同时对油菜菌核病菌(*Sclerotinia sclerotiorum*)、桃褐腐病菌(*Monilinia fructicola*)等均有较强的抑菌活性。

从植物根围分离的假单胞菌如绿针假单胞菌(*P. chlororaphis*)、荧光假单胞菌(*P. fluorescens*)等抑菌谱广,对植物病原真菌、细菌和线虫都有拮抗能力^[6]。有研究表明^[7],绿针假单胞菌 YS05 对 9 种病原真菌炭疽菌(*Colletotrichum* spp.)、灰葡萄孢菌(*Botrytis cinerea*)、多主棒孢菌(*Corynespora cassicola*)、辣椒疫霉菌(*P. capsica*)、立枯丝核菌、茄病镰刀菌(*F. solani*)、番茄匍柄霉菌(*Stemphylium lycopersici*)、茄链格孢菌(*Alternaria solani*)、西瓜壳二孢(*Ascochyta citrulline*)和 3 种病原细菌密执安棒杆菌密执安亚种(*Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis*)、葡萄土壤杆菌(*A. grobacterium vitis*)、丁香假单胞番茄致病变种(*P. syringae* pv. *tomato*),在离体条件下均有抑制效果。此外,其防效还可与化学杀菌剂媲美,程海洋等^[8]的田间试验结果显示,荧光假单胞菌 KBL17 对马铃薯晚疫病的平均防效为 67.45%,略低于化学农药啞菌酯的防效(70.27%)。在 Wang 等^[9]和魏雪等^[10]的研究中,均发现荧光假单胞菌 ZX 生防效果较好,分别对柑橘采后蓝霉病(*Penicillium italicum*)和葡萄采后灰霉病的发病率有显著的降低作用。

溶杆菌是一种尚未完全开发的重要生防细菌,主要代表种有产酶溶杆菌(*L. enzymogenes*)、抗生素溶杆菌(*L. antibioticus*)、胶状溶杆菌(*L. gummosus*)和变棕溶杆菌(*L. brunescens*)^[11]。这类细菌不仅可以分泌胞外水解酶,而且能产生结构多样的抗菌次生代谢物质,是新型微生物代谢产物农药(农用抗

生素)活性成分的重要来源。溶杆菌中产生的热稳定抗真菌因子(HSAF)可以诱导分生孢子中活性氧的产生并破坏分生孢子的细胞壁^[12],能够与铁离子螯合,减少活性氧自由基的产生,从而提高了产酶溶杆菌在环境中抵御高浓度铁离子、过氧化氢和紫外辐射的能力,增强了其在氧化压力下的生存能力。有研究^[13]指出,HSAF的应用显著控制了田间禾谷镰刀菌引起的小麦赤霉病。张子玉等^[14]还发现,产酶溶杆菌菌株CX03具有广谱拮抗作用,对5种病原细菌野油菜黄单胞野油菜致病变种(*Xanthomonas campestris* pv. *campestris*)、密执安棒杆菌环腐亚种(*C. michiganensis* subsp. *sepedonicus*)、丁香假单胞菌流泪致病变种(*P. syringae* pv. *lachrymans*)、密执安棒杆菌密执安亚种(*C. michiganensis* subsp. *michiganensis*)、葡萄土壤杆菌和4种病原真菌尖孢镰刀菌(*F. oxysporum*)、辣椒疫霉菌、立枯丝核菌和灰葡萄孢菌具有显著的拮抗效果。

1.2.2 生防真菌的应用

木霉菌是迄今为止研究最广泛的真菌生防制剂,常见的木霉菌主要有棘孢木霉(*T. asperellum*)、哈茨木霉(*T. harzianum*)、长枝木霉(*T. longibrachiatum*)、拟康氏木霉(*T. pseudokoningii*)、绿色木霉(*T. viride*)等。大量研究表明,木霉菌对辣椒和马铃薯疫病^[15],辣椒、番茄以及瓜类枯萎病^[16-18]等具有良好的防治效果,对苜蓿根腐病的防效高于杀菌剂,且促进生根效果明显^[19]。早在1932年Weindling发现了木霉菌的生防作用,此后关于木霉菌的研究与应用迅速发展^[20],截至目前,已开发出50多种木霉菌商品化生防制剂,在农业生产中得到了广泛的运用,其占据了国内外真菌杀菌剂近一半的份额^[21]。

另外,其他应用的生防真菌还有小盾壳霉(*Coniothyrium minitans*)、淡紫拟青霉(*P. aecilomyces lilacinum*)、埃及青霉(*P. egyptiacum*)等。盛桂林等^[22]的2a田间试验结果均表明,小盾壳霉能有效防治小麦以及水稻的纹枯病。淡紫拟青霉2018-32对黄瓜根腐病和根结线虫病具有良好的防效^[23]。薛应钰等^[24]的平板对峙试验显示,埃及青霉菌株Z-12A对苹果黑腐皮壳菌(*Valsa mali*)抑制率为88.71%,发酵液在培养皿内的抑菌率为61.07%,而且对植物及动物均较为安全,无潜在风险。

粘帚霉菌是已知最具生防潜力的真菌类群之一,常见的生防菌株包括粉红粘帚霉(*G. roseum*)、绿

色粘帚霉(*G. virens*)、链孢粘帚霉(*G. catenulatum*)等,均对多种植物病原菌及害虫有较强的抑制能力。杨蕊等^[25]通过室内盆栽试验测定表明粉红粘帚霉对玉米茎基腐病具有生防潜力。此外,国外有研究表明,粉红粘帚霉对多种植物真菌病原体有抑制作用,包括胡萝卜链格孢菌(*A. dauci*)、灰霉菌(*B. cinerea*)、禾谷镰刀菌、立枯丝核菌等^[26]。

1.2.3 生防放线菌的应用

Cohn于1872年首次发现放线菌,随后便有学者开展了大量研究工作。作为拮抗菌的一个重要来源,放线菌不仅种类多、数量大、抑菌机理多样化,还可产生功能多样的抗生素及多种次生代谢物质,这些活性物质在生物防治方面具有重要的作用。其中,链霉菌占土壤放线菌的3/4,且大部分生防活性物质也是由其产生的,具有良好的抗真菌活性,在生防领域常以发酵方式^[27]或制成生物有机肥^[28]使用。Zheng等^[29]研究发现,链霉菌属菌株FJAT-31547对6种植物病原真菌尖孢镰刀菌、大豆疫霉菌(*P. sojae*)、大豆拟茎点种腐病菌(*P. longicolla*)、雪腐格氏霉菌(*Gerlachia nivalis*)、茄枯镰刀菌(*F. solani*)和黑曲霉(*Aspergillus niger*)和7种植物病原细菌青枯病菌(*Ralstonia solanacearum*)、皱纹假单胞菌(*P. corrugate*)、根癌农杆菌(*A. tumefaciens*)、辣椒疮痂病菌(*X. vesicatoria*)、胡萝卜软腐欧文菌(*Erwinia carotovora*)、胡萝卜软腐果胶杆菌(*Pectobacterium carotovorum*)、弗氏柠檬酸杆菌(*Citrobacter freundii*)具有广谱的抗菌活性,尤其是尖孢镰刀菌和青枯菌,防效分别为80.59%和76.92%。张艳茹等^[30]的实验结果表明,灰略红链霉菌(*S. griseorubens*)21-3对禾谷镰刀菌的抑制率为69.9%,其具有防治小麦赤霉病的潜力。

此外,小单孢菌(*Micromonospora*)是一类优势稀有放线菌,既能作为植物激素的来源之一,有效促进植物发育,又能作为一类有效的生物防治剂,通过分泌活性次级代谢产物,帮助植物抵抗病原菌的侵害,保护植物生长^[31]。刘文祥^[32]通过实验从59株放线菌中筛选出11株对金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)和白色念珠菌(*Candida albican*)有抑菌活性的小单孢菌。同时,小单孢菌也是抗生素的重要来源之一。黄运红等^[33]研究发现,炭样小单孢菌(*M. carbonacea*)产生的抗生素JX对水稻细菌性条斑病菌(*X. oryzae* pv. *oryzicola*)具有较强的抗菌作用,抑菌圈直径达18.84 mm,最低

抑菌浓度和最低杀菌浓度分别为 1.39 $\mu\text{g/mL}$ 和 2.78 $\mu\text{g/mL}$,且杀菌速度很快,作用 12 h 的杀菌率达 100%。

1.2.4 病毒弱毒株系的应用

病毒的弱毒株系可通过人工诱变进行筛选,其生防原理是将未受病毒侵染的植株接种弱毒株系,植株没有不良症状表现,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^[34]。在病毒病害中,利用弱毒株系可交叉保护植物,如在番木瓜、番茄、黄瓜、柑橘等植物上均得到了较好的应用。黄显德等^[35]通过突变获得番木瓜环斑病毒(*Papaya ringspot virus*, PRSV)弱毒株系,其中突变株 N137A 对防治番木瓜环斑病毒表现出良好的交叉保护效果。钟敏等^[36]的研究表明,采用高温处理、亚硝酸处理及复合处理 3 种方法对黄瓜绿斑驳病毒(*Cucumber green mottle mosaic virus*, CGMMV)进行人工诱变,复合处理致弱效果最好。周彦^[37]研究获得了 7 个柑橘衰退病毒(*Citrus tristeza virus*, CTV)的弱毒菌株,能有效抑制柑橘衰退病毒。

1.2.5 噬菌体的应用

噬菌体是可以侵袭细菌的一类病毒,在植物保护领域快速发展。噬菌体是病毒中最为普遍和分布最广的群体,但由于噬菌体的高度特异性,使其应用的范围有所局限^[38]。胡蓉花等^[39]采用双层平板培养分离法,对江西省吉安市烟田采集的土壤样本进行青枯菌噬菌体的分离,共分离出 6 个青枯菌噬菌体,并验证了噬菌体间生物学特性存在的差异,其中噬菌体 P₂Tb1556 对氯仿敏感,而对紫外光和乙醚不敏感。Balogh 等^[40]在温室实验中发现,噬菌体处理柑橘溃疡病,导致疾病严重程度平均降低 59%。Lallo 等^[41]筛选出可以感染所有丁香假单胞菌测试菌株的毒性噬菌体 fPSA2,为治疗猕猴桃细菌性溃疡病提供了一定的研究基础。

2 生物防治的作用机制

生防菌的作用机制可以分为两类,即直接抑制机制和间接抑制机制。直接抑制机制包括拮抗作用、重寄生作用、竞争作用和溶菌作用,间接抑制机制包括促进植物生长和诱导植物产生抗性。国内外许多研究表明,这些机制往往不是单独发挥作用,很可能有 2 种或以上的作用机制相互协调、共同

作用。

2.1 直接抑制机制

2.1.1 拮抗作用

生防菌的拮抗作用是应用最为普遍的一种情况,一般生防菌通过自身代谢产生具有拮抗作用的代谢产物,如抗生素、生物碱、酶制剂等。其作用方式主要有^[42]:(1)作用于细胞壁,通过产生某些代谢产物来抑制或阻碍病原菌的细胞壁合成,导致病原菌无法生长而死亡。(2)作用于细胞膜,通过破坏病原菌的膜结构,使得其通透性改变,细胞内含物外渗而死亡。(3)作用于蛋白质,通过分泌物质阻碍病原菌的蛋白质合成,从而使病原菌的生长受到抑制。(4)作用于病原微生物,通过产生抗生素改变病原菌代谢过程中的酶活性,从而抑制病原菌的生长,甚至使之死亡。

以芽孢杆菌为例,该属细菌能够产生脂肽类抗生素和拮抗蛋白两类拮抗因子,对病原菌有抗菌作用。脂肽属于一类微生物多肽,可激活植物的防御机制^[2]。非核糖体途径合成的脂肽类抗生素根据氨基酸序列可分为表面活性素(surfactins)、伊枯草菌素(iturins)和泛草素(fengycins)。在贾祥子等^[43]研究的桃褐腐病生防细菌 JY-d1 中,检测到了伊枯草菌素和泛草素。伊枯草菌素具有溶血、表面活性和强烈的抗真菌特性,其中伊枯草菌素 A 的应用最为广泛,具有优异的抗生素特性,在植物病原菌的生物防治中发挥重要作用,是生防芽孢杆菌产生的重要抗菌活性物质。研究发现贝莱斯芽孢杆菌 5-8 主要通过产生伊枯草菌素 A 来防治水稻稻瘟病^[5]。芽孢杆菌的拮抗蛋白类抗菌物质主要包括细胞壁降解酶类,如几丁质酶和葡聚糖酶,以及细菌素类^[44]。研究发现细菌素对植物致病菌和线虫有抑制作用^[45],如解淀粉芽孢杆菌 TF28 抗菌蛋白 Tas A 对黄瓜灰霉病和柑橘溃疡病的抑制效果明显^[46]。

胡丽杰等^[47]的研究结果表明,枸杞内生真菌镰刀菌属菌株 NQ8GII4、NQ8GII7、NQ7GII4 和篮状菌属(*Talaromyces*)菌株 NQ6GIII11 对胶孢炭疽菌(*C. gloeosporioides*)有明显的拮抗作用。阮宏椿等^[48]筛选出对水稻稻瘟病菌抑菌效果最好的杀结链霉菌(*S. tubercidicus*)菌株 ST7-2,对芦笋茎枯病菌(*Phomopsis asparagi*)、蘑菇褐腐病菌(*Mycogone perniciosa*)和大豆炭疽病菌(*C. truncatum*)有较好的拮抗作用,菌丝生长抑制率分别为 60.60%、

15.13%和14.94%。

2.1.2 重寄生作用

重寄生作用是一种以病原菌为寄主的特殊的寄生现象,包含了吸附、缠绕、侵入和穿透等多个过程。拮抗作用和重寄生作用两种机制通常相互依存,协同起效,即先由抗生素破坏宿主细胞的细胞壁,再通过重寄生作用使生防菌侵入,从而破坏病原菌细胞^[49]。在林成伟等^[50]的试验中,木霉菌菌丝与玉米灰斑病菌(*Cercospora zae-maydis*)菌丝相互缠绕生长,木霉菌产生钩状物,使得玉米灰斑病原菌菌丝变细,菌丝壁破裂,继而木霉菌侵入,吸取病原菌营养,导致玉米灰斑病原菌死亡。核盘菌(*S. sclerotiorum*)重要的重寄生真菌包括粉红粘帚霉、绿色粘帚霉、链孢粘帚霉等,寄生于菌核和菌丝,使得细胞解体,减少菌核形成,抑制菌核萌发^[51]。

2.1.3 竞争作用

竞争作用主要有营养竞争和空间位点竞争,生防菌在生长和繁殖的过程中,与病原菌争夺空间和水分、碳、氮、氧等营养物质,从而阻碍了病原菌的生长和繁殖。枯草芽孢杆菌定植于植物根际和土壤中,可通过与病原菌相互竞争,阻碍病原菌定植在植物上,从而达到生防效果^[52];也可通过产生抑菌物质如抗菌肽等与病原菌争夺附着位点,使植物免受病原菌的侵害^[53]。此外,木霉作为生物杀菌剂在世界范围内被广泛用于病害防治^[54]。研究发现,哈茨木霉 TH 菌株能限制黄瓜枯萎病菌(*F. oxysporum* f. sp. *cucumerinum*)的菌丝扩展,通过紧贴、缠绕、穿透等方式寄生于黄瓜枯萎病菌的菌丝上,最后引起菌丝断裂,细胞内容物外泄,抑制率达 67.70%^[55];竞争作用很少独立发生,常伴随着拮抗作用和重寄生作用,且两种或三种机制会产生协同增效的作用^[56]。

2.1.4 溶菌作用

生防菌不仅能寄生病原菌,同时也能降解病原菌。它们产生的次生代谢产物能破坏病原菌的细胞壁,将其直接溶解,致使病原菌的存活能力下降,最终达到抑制菌丝生长和孢子萌发的目的。在陈爽^[57]的研究试验中,筛选出的 3 株芽孢杆菌 WC3-3、MM2-24、MY4-25 均具有溶菌作用,通过分泌蛋白酶、纤维素酶和嗜铁素,使大豆根腐病致病菌禾谷镰刀菌的细胞壁溶解,提高寄主植物防御酶活性,从而发挥大豆植株的防御作用。陈晓通等^[58]

的实验结果表明,粘质沙雷氏菌(*Serratia marcescens*) MEW06 能分泌高活性的几丁质酶,从而抑制苹果轮纹菌(*Botryosphaeria dothidea*)和草莓灰霉菌的生长,并能毒杀秀丽隐杆线虫(*Caenorhabditis elegans*)。

放线菌释放的葡聚糖酶、蛋白酶和几丁质酶等水解酶,能降解真菌细胞壁和阻碍细胞壁相关蛋白的合成,从而抑制或杀死病原真菌^[59]。宋利沙等^[60]发现,津岛链霉菌(*S. tsukiyonensis*) JT-2F 对三七根腐病菌有抑制作用,可分泌几丁质酶、蛋白酶和纤维素酶,破坏病原菌菌丝体,抑制病原菌生长。

2.2 间接抑制机制

2.2.1 促进植物生长

生防菌通过分泌植物促生物质以提高植物抗性,从而达到防治病害的效果。郭真等^[61]筛选出来的 3 株芽孢杆菌均具有解磷、泌氢及产吲哚-3-乙酸的能力,促进了大豆植株的生长。Umme 等^[62]分离出的枯草芽孢杆菌 RB14 能促进番茄生长发育,提高种子发芽率,并且有效防治番茄猝倒病(*R. hizotonia solani* K1),处理后的种子发病率降低了 80%。

木霉不仅能抑制植物病原菌,有效地防治植物病害,还能诱导种子萌发、出苗,促进植物生长^[63]。Vinale 等^[64]的研究结果表明,在温室和田间试验中,哈茨木霉和深绿木霉(*T. atroviride*)可促进生菜、番茄和辣椒的生长,与对照相比,产量提高了 300%。盆栽试验^[55]结果显示,绿色木霉 TV 菌株促进黄瓜生长作用最强,地上部分和地下部分鲜重质量分别增加 42.81% 和 86.92%。在赖宝春等^[28]的研究中,灰锈赤链霉菌(*S. griseorubiginosus*)菌株 FX81 表现出对香蕉植株的鲜重和株高的促生作用,且均与对照达极显著差异。

2.2.2 诱导抗性

经生防菌的诱导,更多的抗菌活性物质可以从植物体内被激发释放,从而增强对外来病菌的防御^[65]。其诱导机制主要有两种:一是通过诱导植物自身的防御反应,防止病原菌的侵染和危害;二是生防菌与植物结合,可帮助植物吸收土壤中的营养元素。Zhang 等^[66]发现,链霉菌 ZX01 糖蛋白 GP-1 可以抑制烟草花叶病毒在寄主植物中的侵染和积累,并且诱导寄主对烟草花叶病毒的系统抗性和促进植物生长。代真林等^[67]研究显示,抗生素溶杆菌 13-6 对玉米小斑病菌(*Bipolaris maydis*)菌丝生长和

孢子萌发具有显著抑制作用,造成菌丝顶端生长受阻、表面粗糙,部分菌丝破裂,代谢粗提物抑制孢子萌发率高达92.19%。直接喷施可减缓玉米小斑病的发生,灌根施用可使植株产生诱导抗性。王学坚等^[68]通过盆栽试验分析钩状木霉(*T. hamatum*) YMF1.00247菌株发酵液促进烟草生长的效果和对烟草黑胫病的防效,得出其产生的氨基丁酸(GABA)可能是具有促进烟株生长和诱导抗病功能的主要活性成分。

3 应用展望

人们发掘的生防菌种类和数量已十分可观。目前已知的生防菌涉及细菌、真菌、放线菌、病毒弱毒株系和噬菌体多个种类,来源上大多为土壤微生物、植物内生菌^[69]。但是,自然界存在的生防菌资源丰富、种类繁多,现有的这些发现尚显微不足道。随着生态农业理念的推进,人们对化学农药和生物菌剂的认识不断深入,生防菌株在农业领域的应用将拥有更加广阔的发展空间,但要把获得的生防菌真正应用于大规模生产还需要很多努力和探索。

过去对生防菌的研究主要集中在分离、纯化和防病机理等方面,但这样获得的多数菌株抑菌谱窄、作用机理单一,在大田试验中生防效果不稳定。且大多实验室防病试验仍在研究阶段,只有为数不多的生防制剂已得到实际推广并应用于农业生产。为了加快推进生防菌在实际生产中的应用与推广,今后的研究需要充分利用基因组学、转录组学和蛋白质组学等分析新型功能基因和代谢产物,整合多种方法,揭示相关生防机理,进一步探索科学有效的生防菌开发利用新途径。

研究^[70]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^[71],但也需要注意菌剂之间混用是否会产生拮抗作用,从而影响防效。为了成功应用这些生物制剂,需要对其进行生态学研究,对其在田间的环境要求、适应能力以及防病表现等进行深入研究,研发出理想的生防菌株,从而实现可持续性农业^[72]。

参考文献:

- [1] COOK R J, WELLER D M, EL-BANNA A Y, et al. Yield responses of direct-seeded wheat to rhizobacteria and fungicide seed treatments [J]. *Plant Disease*, 2002, 86 (7): 780-784.
- [2] JAMIL S, HUI T, JI M S. *Bacillus* species as versatile weapons for plant pathogens: a review [J]. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*, 2017, 31 (3): 446-459.
- [3] 孙正祥, 龙欣钰, 孟祥佳, 等. 枯草芽孢杆菌 YZU-S149 的分离鉴定及对西瓜枯萎病的生防作用 [J]. *长江大学学报: 自然科学版*, 2021, 18 (4): 114-120.
- [4] 李扬凡, 邵美琪, 刘畅, 等. 解淀粉芽孢杆菌 HMB33604 的抑菌物质及对马铃薯黑痣病的防治效果 [J]. *中国农业科学*, 2021, 54 (12): 2559-2569.
- [5] 李坤瑀, 贾祥子, 郭君陶, 等. 水稻稻瘟病生防细菌 5-8 的鉴定及其生防机制研究 [J]. *北方农业学报*, 2021, 49 (3): 74-81.
- [6] 张力群, 张俊威. 假单胞菌产生的抗生素 [J]. *中国生物防治学报*, 2015, 31 (5): 750-756.
- [7] 黄艺烁, 谢学文, 石延霞, 等. 一株绿针假单胞菌桔黄亚种在防治番茄柄霉叶斑病中的应用 [J]. *中国生物防治学报*, 2021, 37 (6): 1265-1275.
- [8] 程海洋, 魏有海, 郭良芝, 等. 马铃薯晚疫病生防细菌的筛选及鉴定 [J]. *江苏农业科学*, 2021, 49 (18): 116-121.
- [9] WANG Z, MEI X, DU M, et al. Potential modes of action of *Pseudomonas fluorescens* ZX during biocontrol of blue mold decay on postharvest citrus [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100 (2): 744-754.
- [10] 魏雪, 江孟遥, 钟涛, 等. 荧光假单胞菌 ZX 对葡萄采后灰霉病的防治 [J]. *食品工业科技*, 2021, 42 (22): 125-132.
- [11] ZHAO Y, JIANG T, XU H, et al. Characterization of *Lysobacter* spp. strains and their potential use as biocontrol agents against pear anthracnose [J]. *Microbiological Research*, 2021, 242 (1): 126624.
- [12] LI C, TANG B, CAO S, et al. Biocontrol ability and action mechanism of dihydromaltophilin against *Colletotrichum fructicola* causing anthracnose of pear fruit [J]. *Pest Management Science*, 2021, 77 (2): 1061-1069.
- [13] ZHAO Y, CHENG C, JIANG T, et al. Control of wheat *Fusarium* head blight by heat-stable antifungal factor (HSAF) from *Lysobacter enzymogenes* [J]. *Plant Disease*, 2019, 103 (6): 1286-1292.
- [14] 张子玉, 谢学文, 石延霞, 等. 白菜黑腐病拮抗菌 *Lysobacter enzymogenes* CX03 的分离鉴定及生防效果研究 [J]. *中国生物防治学报*, 2021, 37 (6): 1221-1230.
- [15] 姚彦坡. 防治马铃薯晚疫病和辣椒疫病木霉菌的筛选

- 及生防机制研究[D].北京:中国农业大学,2015.
- [16] 章行远,吴奇飞,卯婷婷,等.辣椒枯萎病拮抗木霉菌的筛选及鉴定[J].贵州农业科学,2022,50(6):24-30+2.
- [17] 王永阳,杜佳,高克祥.苦瓜枯萎病生防木霉菌的筛选鉴定及其定植的qPCR检测[J].山东农业科学,2018,50(8):110-115.
- [18] NOFAL A M, EL-RAHMAN M A, ABDELGHANY T M, et al. Mycoparasitic nature of *Egyptian Trichoderma* isolates and their impact on suppression Fusarium wilt of tomato[J]. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 2021, 31(1):103.
- [19] 曾亮,柴继宽,赵桂琴,等.苜蓿根腐病生防真菌筛选鉴定及其防治效果研究[J].草地学报,2019,27(4):825-831.
- [20] ALFIKY A, WEISSKOPF L. Deciphering *Trichoderma*-Plant-Pathogen interactions for better development of biocontrol applications[J]. *Journal of Fungi*, 2021, 7(1):61.
- [21] 商娜,任爱芝,赵培宝.木霉菌在园林园艺植物上的应用及研究进展[J].北方园艺,2021(3):149-154.
- [22] 盛桂林,沈旦军,石磊,等.小盾壳霉对稻、麦纹枯病的室内生物活性及田间防效探究[J].农药科学与管理,2021,42(10):38-45+49.
- [23] 张雅静,宋美燕,张怡静,等.兼防黄瓜根腐病和根结线虫病的淡紫拟青霉和哈茨木霉的筛选[J].生物技术通报,2021,37(2):40-50.
- [24] 薛应钰,李兴昱,李发康,等.苹果树腐烂病生防真菌 Z-12A 的鉴定及其生防效果[J].微生物学通报,2021,48(1):57-69.
- [25] 杨蕊,郎剑锋,陆宁海,等.粉红粘帚霉对玉米茎基腐病的抑菌防病作用[J].河南科技学院学报;自然科学版,2016,44(5):28-33.
- [26] SUN Z B, LI S D, REN Q, et al. Biology and applications of *Clonostachys rosea* [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2020, 129(3):486-495.
- [27] 李威,肖熙鸥,李可,等.茄子青枯病拮抗放线菌 XL-6 的筛选、鉴定及发酵条件优化[J].微生物学通报,2018,45(2):357-367.
- [28] 赖宝春,戴瑞卿,林明辉,等.一株拮抗放线菌的鉴定及其对香蕉枯萎病的生防效应[J].南方农业学报,2020,51(4):836-843.
- [29] ZHENG X F, WANG J P, CHEN Z, et al. A *Streptomyces* sp. strain; isolation, identification, and potential as a biocontrol agent against soilborne diseases of tomato plants[J]. *Biological Control*, 2019, 136:104004.
- [30] 张艳茹,郎剑锋,郭富超,等.禾谷镰刀菌拮抗放线菌 21-3 的筛选及鉴定[J].河南科技学院学报;自然科学版,2022,50(1):16-21.
- [31] 邓阳,余利岩,张玉琴.小单孢菌科放线菌的研究进展[J].生物资源,2021,43(6):583-596.
- [32] 刘文祥.小单孢菌选择性分离鉴定及其次级代谢产物挖掘[D].阿拉尔:塔里木大学,2020.
- [33] 黄运红,任雨涵,邹龙,等.炭样小单孢菌产抗生素对水稻细菌性条斑病菌的抗菌作用及其机理[J].微生物学通报,2019,46(5):1052-1061.
- [34] 陈嘉敏,管维轩,朱洁倩,等.植物病害生防菌株的研究进展[J].微生物前沿,2017,6(2):35-43.
- [35] 黄显德,王玉,闫志勇,等.番木瓜环斑病毒西瓜株系弱毒突变体的筛选与应用[J].植物保护学报,2019,46(4):738-744.
- [36] 钟敏,赵绪生,何乙坤,等.黄瓜绿斑驳病毒人工诱变方法的研究[J].北方园艺,2014(24):108-111.
- [37] 周彦.弱毒株交叉保护防治柑桔衰退病毒研究[D].重庆:西南大学,2007.
- [38] 何洪令,李钠钾,孙成成,等.烟草青枯病的生物防治研究进展[J].植物医生,2021,34(2):4-8.
- [39] 胡蓉花,余成鹏,任敏华,等.烟草青枯病菌噬菌体分离及其生物学特性研究[J].广东农业科学,2019,46(11):78-84.
- [40] BALOGH B, CANTEROS B I, SALL R E, et al. Control of citrus canker and citrus bacterial spot with bacteriophages[J]. *Plant Disease*, 2008, 92(7):1048-1052.
- [41] LALLO G D, EVANGELISTI M, MANCUSO F, et al. Isolation and partial characterization of bacteriophages infecting *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae*, causal agent of kiwifruit bacterial canker[J]. *Journal of Basic Microbiology*, 2015, 54(11):1210-1221.
- [42] 樊炳君,曹艳茹,赵洪莹,等.特殊生境放线菌在植物病害防治中的研究进展[J].安徽农业科学,2022,50(2):1-4+14.
- [43] 贾祥子,叶建,王诚,等.桃褐腐病生防细菌 JY-d1 种类鉴定及其对桃褐腐病菌生防机制研究[J].扬州大学学报:农业与生命科学版,2021,42(4):128-134.
- [44] LECLERE V, BECHET M, ADAM A, et al. Mycosubtilin overproduction by *Bacillus subtilis* BBG100 enhances the organism's antagonistic and biocontrol activities [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, 71(8):4577-4584.
- [45] CHOWDHURY S P, HARTMANN A, GAO X W, et al. Biocontrol mechanism by root-associated *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42-a review[J]. *Front Microbiology*, 2015, 6:780.
- [46] 高娃,姜威,孟利强,等.解淀粉芽孢杆菌 TF28 抗菌蛋白 TasA 基因序列分析及蛋白质结构预测[J].基因组学与应用生物学,2015,34(2):313-318.
- [47] 胡丽杰,闫思远,李嘉泓,等.枸杞内生真菌对胶孢炭疽菌 *Colletotrichum gloeosporioides* 的拮抗作用及生防潜

- 力[J]. 植物保护, 2020, 46(1): 125-133.
- [48] 阮宏椿, 石姐姐, 杜宜新, 等. 水稻稻瘟病拮抗稀有放线菌的筛选及防治效果[J]. 中国生物防治学报, 2021, 37(3): 538-546.
- [49] 郑丹, 李鹤鸣, 韩力. 土壤放线菌资源及其应用[J]. 绿色科技, 2021, 23(2): 183-187+193.
- [50] 林成伟, 刘金龙. 木霉菌株对几种病原真菌的生物防治作用研究[J]. 植物医生, 2021, 34(2): 29-33.
- [51] 孙宗苹, 余梅霞, 刘晓玉, 等. 粘帚霉菌在农业上的应用研究进展[J]. 中国细胞生物学学报, 2021, 43(11): 2235-2244.
- [52] 边羽芊. 浅析枯草芽孢杆菌研究进展与应用[J]. 科学技术创新, 2017(30): 33-34.
- [53] FELIX K A, KUEBUTORNYE, EMMANUEL D A, et al. A review on the application of *Bacillus* as probiotics in aquaculture[J]. Fish Shellfish Immunology, 2019, 87: 820-828.
- [54] ASAD S A. Mechanisms of action and biocontrol potential of *Trichoderma* against fungal plant diseases-A review[J]. Ecological Complexity, 2022, 49.
- [55] 谷祖敏, 毕卉, 张兵, 等. 不同木霉菌株对黄瓜枯萎病菌的拮抗作用[J]. 西北农业学报, 2018, 27(3): 426-431.
- [56] MUDASSIR I, MARTIN B, DEEPAK H, et al. Natural variation of root lesion nematode antagonism in the biocontrol fungus *Clonostachys rosea* and identification of biocontrol factors through genome-wide association mapping[J]. Evolutionary Applications, 2020, 13(9): 2264-83.
- [57] 陈爽. 大豆根腐病生防菌的筛选鉴定及机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2021.
- [58] 陈晓通, 袁淑博, 张钺, 等. 一株高产几丁质酶的粘质沙雷氏菌筛选、鉴定及应用[J]. 绿色科技, 2018(12): 164-167+172.
- [59] 李培谦, 冯宝珍, 李新秀, 等. 番茄灰霉菌拮抗放线菌 LA-5 的筛选及鉴定[J]. 应用生态学报, 2018, 29(12): 4172-4180.
- [60] 宋利沙, 蒋妮, 张占江, 等. 津岛链霉菌 JT-2F 对三七根腐病菌的抑制作用[J]. 南方农业学报, 2021, 52(8): 2133-2139.
- [61] 郭真, 陈倩倩, 陆星, 等. 3 株芽孢杆菌的分离鉴定及其促生效果研究[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(18): 126-131+145.
- [62] UMME S Z, TAKASHI A, MOHAMMAD S R. Biocontrol of *Rhizoctonia solani* K1 by Iturin A producer *Bacillus subtilis* RB14 seed treatment in tomato plants[J]. Advances in Microbiology, 2016(6): 424-431.
- [63] MOKHOPADHYAY R, KUMAR D. *Trichoderma*: a beneficial antifungal agent and insights into its mechanism of biocontrol potential[J]. Egyptian Journal of Biological Pest Control, 2020, 30: 133.
- [64] VINALE F, D'AMBROSIO G, ABADI K, et al. Application of *Trichoderma harzianum* (T22) and *Trichoderma atroviride* (P1) as plant growth promoters, and their compatibility with copper oxychloride[J]. Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.), 2004, 30: 2-8.
- [65] HAN L, ZHANG G, MIAO G, et al. *Streptomyces kanasensis* sp. nov. an antiviral glycoprotein producing actinomycete isolated from forest soil around kanas lake of China[J]. Current Microbiology, 2015, 71(6): 627-631.
- [66] ZHANG G, FENG J, HAN L, et al. Antiviral activity of glycoprotein GP-1 isolated from *Streptomyces kanasensis* ZX01[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016: 572-577.
- [67] 代真林, 何洪磊, 姚秀英, 等. 抗生素溶杆菌 13-6 对玉米小斑病的生防作用机制初步研究[J]. 植物病理学报, 2021, 51(3): 393-402.
- [68] 王学坚, 刘子仪, 张体坤, 等. 钩状木霉 (*Trichoderma hamatum* YMF1.00247) 促进烟草生长及其诱导抗性研究[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2020, 42(6): 1230-1236.
- [69] JIAMIN C, WEIXUAN G, JIEQIAN Z, et al. Research development of microbial antagonists against plant disease[J]. Advances in Microbiology, 2017, 6(2): 35-43.
- [70] 王光梅, 杨丽花, 罗王勇, 等. 2 种生防菌及其复配剂对烟草黑胫病的防治效果[J]. 湖南农业科学, 2021(8): 56-58+62.
- [71] 张献辉, 李红敏, 李全胜. 解淀粉芽孢杆菌 ZJ01 及其复配剂对枣黑斑病的防治效果[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(13): 137-139.
- [72] BERNAL P, EBERL L, JONGE R, et al. Understanding plant-microorganism interactions to envision a future of sustainable agriculture[J]. Environmental Microbiology, 2021, 23(4): 1809-1811.

责任编辑: 罗小宁
英文校对: 王芬

公益广告

世界地球日

WORLD EARTH DAY



珍爱地球 | 人与自然和谐共生

湖南生态科学学报

(季刊 1995年创刊)

2023年 第10卷 第2期

主管单位：湖南省教育厅

主办单位：湖南环境生物职业技术学院

编辑出版：《湖南生态科学学报》编辑部

(湖南省衡阳市石鼓区望城路165号 邮编：421005)

电话：0734-8591122

邮箱：2514634782@qq.com

主编：梁忠厚 颜晓元

副主编：蒋一锄

印刷：长沙市和一印刷设备有限公司

发行订阅：《湖南生态科学学报》编辑部

学报官网：www.hnstkxxb.com

投稿网址：hnhs.cbpt.cnknet

出版日期：2023年6月25日

Journal of Hunan Ecological Science

(Quarterly, Started in 1995)

Vol.10 No.2 2023

Supervisor: Education Department of Hunan Province

Sponsor: Hunan Polytechnic of Environment and Biology

Edited and Published by: Editorial Department of Journal of Hunan Ecological Science

(165 Wangcheng Road, Shigu District, Hengyang 421005, China)

Tel.: 0734-8591122

E-mail: 2514634782@qq.com

Editor-in-chief: Liang Zhonghou, Yan Xiaoyuan

Associate Editor-in-chief: Jiang Yichu

Printed by: Changsha Heyi Printing Equipment Co., Ltd.

Distributed by: Editorial Department of Journal of Hunan Ecological Science

Journal official website: www.hnstkxxb.com

Submission website: hnhs.cbpt.cnknet

Published date: 25 Jun, 2023

ISSN 2095-7300



国内定价：10.00元