

多粘类芽胞杆菌对植物土传病害的防控 及促生长作用研究进展

张楠¹, 陈岩¹, 王丽丽^{1,2}, 李晓宇¹, 王佳宁¹, 周通¹, 曲芳京¹, 徐永平^{1,2*}

(1. 大连理工大学 生命科学与技术学院 辽宁 大连 116024; 2. 动物性食品安全保障技术教育部工程研究中心 辽宁 大连 116600)

摘要 多粘类芽胞杆菌是具有极高应用价值和安全性生防菌株,对人和动植物均无致病性,某些菌株能够分泌多肽蛋白、酶和植物激素等活性产物,这些产物能够防治植物土传病害并促进植物生长和增产。针对近年来多粘类芽胞杆菌在防治土传病害及植物促生长等方面的研究进展进行了综述。

关键词 多粘类芽胞杆菌; 植物土传病; 生物防治

中图分类号 Q939.95; S432.1 文献标识码 A 文章编号 1005-7021(2017)05-0091-007

doi: 10.3969/j.issn.1005-7021.2017.05.016

Advances in the Effect of *Paenibacillus polymyxa* in Controlling of Plant Soil-Borne Diseases and Growth Promotion

ZHANG Nan¹, CHEN Yan¹, WANG Li-li^{1,2}, LI Xiao-yu¹, WANG Jia-ning¹, ZHOU Tong¹,
QU Fang-jing¹, XU Yong-ping^{1,2}

(1. Schl. of Life Sci. & Biotech., Dalian Uni. of Technol., Dalian 116024; 2. Ctr. for Food Safety of Animal Origin, MOE (Minist. of Educ.), Dalian 116600)

Abstract *Paenibacillus polymyxa* is a kind of anti-bacterial strain with high potential value of application and safety as a biocontrolling tool of soil-borne plant diseases. It has no pathogenicity to both human and animals and plants, and some strains can excrete polypeptide, plant hormone and other bio-active substances. These substances can control soil-borne diseases, promote plant growth and increase production. This paper summarized the research progress recently on the controlling and controlling of soil-borne diseases and promoting the plant growth and other aspects with *Paenibacillus polymyxa*.

Keywords *Paenibacillus polymyxa*; soil-borne diseases; bio-control

多粘类芽胞杆菌(*Paenibacillus polymyxa*)为芽胞杆菌科(Bacillaceae),类芽胞杆菌属(*Paenibacillus*)细菌。Ash等通过16S rRNA序列分析,发现此类菌与典型的芽胞杆菌菌种枯草芽胞杆菌有显著的区别,亲缘关系较远,因此将其归到一个新属一类芽胞杆菌属^[1]。多粘类芽胞杆菌是一种革兰阳性菌,好氧或兼性厌氧生活,细胞呈直杆

状,大小为(0.5~2.5) μm × (1.0~10.0) μm,菌落呈浅黄或白色,表面湿润光滑,G+C含量为40%~50%,最适生长pH为7,最适温度为28~30℃;能够分解葡萄糖和其他糖类产酸,有时产气,在营养琼脂上无可溶性色素^[2]。多粘类芽胞杆菌能够分泌多种活性物质,按功能划分,主要有多粘菌素、粘菌素、环杆菌素、乔利肽菌素等多肽

基金项目: 国家“863”计划项目(2013AA102805-03); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT16RC(4)08); “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFD0501406)

作者简介: 张楠 男 硕士研究生。从事植物生防菌剂的研究。E-mail: 1125191629@qq.com

* 通讯作者。男 教授 博士生导师。主要从事动物源性食品安全保障技术的研究。Tel: 0411-84709800 E-mail: xyiping@dlut.edu.cn

收稿日期: 2017-01-06

抗生素类, β -1, 3-葡聚糖酶、几丁质酶等酶类, 吲哚乙酸、细胞分裂素等植物激素, 絮凝剂, 以及金雀异黄素、吩嗪-1-羧酸等其他物质^[3]。

1 植物土传病

土传病害是指土壤中存在的细菌、真菌、线虫和病毒等病原体在条件适宜时侵害作物根部或茎基部而引起的病害, 是导致作物连作障碍的重要原因^[4]。这些病原菌通常能够引起枯萎病、疫霉病、霜霉病、立枯病、猝倒病、根腐病、青枯病、根结线虫病等众多病害对农业生产造成严重的经济损失, 制约农业的可持续发展。

目前防治植物土传病害的常用方法有轮作、嫁接、选育抗病品种、化学药剂等。上述方法都能取得一定效果, 但也存在某些局限性^[5-7]。表1为植物土传病害几种传统防治方法特点的对比。利用生防菌防治植物土传病害, 因其低成本、环境友好和无药物残留等特点已成为当前国内外防治植物土传病害的研究热点, 而寻找广谱、高效、可靠、能够产业化的生防菌已是重中之重。目前, 主要用于生物防治的微生物有地衣芽胞杆菌 (*Bacillus licheniformis*)、多粘类芽胞杆菌、枯草芽胞杆菌 (*Bacillus subtilis*)、木霉菌 (*Trichoderma*) 等。多粘类芽胞杆菌作为一种很重要的生防菌在自然界中分布非常广泛, 不仅在土壤、植物表面和植物根系大量分布, 而且是常见的植物内生菌^[8-12]。

表1 传统防治方法的缺陷

Table 1 The disadvantages of traditional control methods for soil-borne plant

传统防治方法	不足
选育抗病品种	病原菌遗传多样性丰富, 抗病品种不能完全抵抗病原菌
无病菌株留种或种子处理	抗病能力会随着时间而降低
轮作	只能对病原物寄主范围窄的病害有效
化学药剂	农药残留、污染环境、影响人类健康和蔬菜品质

多粘类芽胞杆菌在植物土传病害中的应用主要有两个方面: 一是防治多种植物病害; 二是促进植物生长和增产。

2 防治植物病害

多粘类芽胞杆菌具有广谱抗菌效果, 不仅对植物细菌病具有拮抗作用, 对真菌和线虫所引起的植物病害也具有良好的防治效果。表2列出了一些多粘类芽胞杆菌的生防作用。

2.1 防治细菌性病害

多粘类芽胞杆菌通过分泌多粘菌素、粘菌素等多肽类抗生素破坏细菌细胞质膜的通透性, 致使胞内物质泄漏从而起到防治细菌性病害的作用^[13]。同时还能通过与植物之间的互作诱导植物产生系统抗性来达到抗病效果。其防治的致病性细菌主要分布于劳尔氏杆菌属 (*Ralstonia*)、欧文氏菌属 (*Erwinia*)、假单胞杆菌 (*Pseudomonas*) 和黄单胞菌属 (*Xanthomonas*) 等。

青枯病是由青枯劳尔氏菌 (*Ralstonia solanacearum*) 引起的一种土传性病害, 该致病菌属于劳尔氏菌属。病原菌主要侵染根的伤口或者次生根根冠部, 在木质部繁殖扩散, 破坏植物的维管束系统, 导致植物迅速失水萎蔫, 但茎叶仍保持绿色^[14]。王艳等^[15]发现多粘类芽胞杆菌细菌粒对桉树青枯病具有较显著的抑菌效果。李波等^[16]制备的 1×10^9 cfu/g 多粘类芽胞杆菌可湿性粉剂对木麻黄青枯病具有良好的防治效果, 为木麻黄青枯病的生物防治探寻一条新的途径。李元广等^[17]研究发现多粘类芽胞杆菌能够防治番茄、烟草、辣椒、土豆、罗汉果和生姜青枯病, 其田间防效可达 70% ~ 92%。

欧文氏菌是酷似大肠埃希菌的一种细菌, 分布于植物表面或土壤中, 可寄生于植物体内的维管束组织、木栓组织和薄壁细胞组织中, 待到自由水、氧气、温度等环境条件适宜的时候发病^[18]。软腐病主要是由欧文氏菌引起的, 是世界农业生产上危害很严重的病害之一, 其病原菌包括: 胡萝卜软腐欧文氏菌胡萝卜亚种 (*Erwinia carotovora* ssp. *carotovora*, Ecc), 胡萝卜软腐欧文氏菌黑胫亚种 (*Erwinia carotovora* ssp. *Atroseptica*, Eca) 和菊欧文氏菌 (*Erwinia chrysanthemi*, Ech)^[19]。软腐欧文氏菌具有广泛的宿主, 包括白菜、胡萝卜、甘蓝、辣椒、黄瓜、莴苣、玉米、菠萝等。鲁燕汶^[20]研究发现多粘类芽胞杆菌 L227-3 对软腐欧文氏

菌具有极强的拮抗作用。

黄单胞菌是一类重要的植物病原菌,可以导致白菜、芥蓝、甘蓝等十字花科黑腐病,水稻、黄瓜、魔芋等细菌性叶枯病,给农业生产造成相当大的经济损失。水稻白叶枯病是由水稻黄单胞菌致病变种(*Xanthomonas oryzae* pv. *Oryzae*)引起的一种世界性的细菌病害,与稻瘟病、纹枯病一起被称为水稻的“三大病害”,该菌属于黄单胞菌属^[21]。高玲玲等^[22]研究发现水稻内生菌多粘类芽胞杆菌对水稻白叶枯病病原菌具有较好的抑菌能力,同时具有固氮作用。

假单胞菌属广泛分布于自然界的土壤和水中,同时也是植物内生菌,其中有些是植物病原菌。甜瓜细菌性角斑病是甜瓜主要病害之一,其致病菌为丁香假单胞杆菌流泪致病变种(*Pseudomonas syringae* pv. *Larchrymans*),属于假单胞菌属。Hong等^[23]研究发现多粘类芽胞杆菌 AC-1 能够抑制丁香假单胞杆菌,同时促进植物生长。王杏芹等^[24]研究发现多粘类芽胞杆菌 G-14 对甜瓜细菌性角斑病病原菌具有明显的拮抗作用。

2.2 防治真菌性病害

多粘类芽胞杆菌分泌的乔利肽菌素、谷缬菌素等多肽类抗生素,核苷类抗菌素多氧霉素,β-1,3-葡聚糖酶等酶类能作用于真菌的细胞壁,引起真菌生长时的菌丝尖端形成膨胀泡而破裂,从而实现了对真菌性病害的防治^[25-28]。其防治的致病性真菌主要分布在半知菌亚门(Deuteromycotina)、鞭毛菌亚门(Mastigomycotina)、子囊菌亚门(Ascomycotina)3个亚门。

棉花黄萎病的病原菌是大丽轮枝菌(*Verticillium dahliae*),属于半知菌亚门。王笑颖等^[29]研究发现,多粘芽胞杆菌 7-4 对棉花黄萎病病原菌大丽轮枝菌具有拮抗作用。水稻稻瘟病的病原菌是稻梨胞菌(*Pyricularia oryzae*),属于半知菌亚门。姚乌兰等^[30]研究发现,多粘类芽胞杆菌产生的 P2 蛋白对稻梨胞菌具有较强的拮抗活性。镰刀菌根腐病是大豆常见的根腐病之一,其致病菌主要是尖镰胞菌(*Fusarium* spp.) ,属于半知菌亚门。从大豆根际土壤中分离得到的多粘类芽胞杆菌 BRF-1 对盆栽大豆根腐病具有较好的防治效果^[31]。西瓜枯萎病是由半知菌亚门真菌西瓜尖

镰胞菌(*Fusarium oxysporum*) 侵染所致,植株的根部是其主要入侵途径,病原菌能够在离开寄主的情况下存活 5~6 a 以上。凌宁^[32]以多粘类芽胞杆菌 SQR-21、枯草芽胞杆菌(*Bacillus subtilis*) SQR-9、哈茨木霉(*Trichoderma harzianum*) SQR-T037 为材料制备的西瓜专用生物有机肥能够有效抑制西瓜土传枯萎病。Raza等^[33]研究发现多粘类芽胞杆菌 WR-2 对西瓜枯萎病具有较好的抑制作用,其分泌的挥发性有机物在平板培养上抑制率能够达到 40% 左右。黄瓜枯萎病又名萎蔫病、蔓割病、死秧病,是一种土传疾病,主要侵染植物的根部,寄生于植物的维管束内,是黄瓜的主要病害之一。黄瓜枯萎病的病原菌为尖镰胞菌黄瓜专化型(*Fusarium oxysporum*)。番茄枯萎病又称萎蔫病,是由半知菌亚门番茄尖镰胞菌番茄专化(*Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* Snyder et Hansen)引起的一种土传性病害。番茄开花结果期易于发病,植株局部受害,全株显病。黄瓜枯萎病和番茄枯萎病的致病菌同属半知菌亚门真菌。陈雪丽等^[34]研究发现多粘类芽胞杆菌 BRF-1 菌悬液及其无菌代谢产物对番茄枯萎病和黄瓜枯萎病具有较好的防治效果。赵新海等^[35]研究发现多粘类芽胞杆菌菌剂对百合镰刀菌枯萎病有较好的防治效果,在速效性、持久性及防治效果等方面优于对照药剂 3% 多抗霉素 WP。Mei等^[36]研究发现多粘类芽胞杆菌 CF-05 对番茄枯萎病的抑制率达 78.24%。烟草黑胫病是烟草生产上最具毁灭性的病害之一,又称烟草疫病,烟草黑胫病是由半知菌亚门,烟草寄生疫霉(*Phytophthora parasitica* var. *nicotianae*) 侵染所致。曹明慧^[37]利用多粘类芽胞杆菌 C-5 制备的生物有机肥进行盆栽实验,发现其能抑制烟草黑胫病的发生,苗期防治率达 80%。葡萄白腐病又称腐烂病,是葡萄生长期引起果实腐烂的主要病害,其致病菌为半知菌亚门,白腐盾壳霉菌(*Coniothyrium diplodiella*)。Han等^[38]研究发现多粘类芽胞杆菌 HT-16 对葡萄白腐病有显著的抑制作用,接种 HT-16 后能够降低“巨峰”和“汤普森”两个品种 40% 以上的发病率。

荔枝霜疫霉病(*Peronophythora litchi*) 是荔枝的主要病害,由荔枝霜疫霉菌(*Peronophthora*

litchii Chen ex Ko et al.) 侵染所致,属于鞭毛菌亚门。在荔枝花期发病会造成大量的枯花,在结果期发病常引起大量落果和烂果,对荔枝生产造成较大损失^[39]。陈海英等^[40]研究发现多粘类芽胞杆菌 CP7 菌株分泌的抗菌物质对荔枝霜疫霉菌等真菌具有很强的抑杀作用。葡萄霜霉病的主要致病菌是鞭毛菌亚门,葡萄霜霉菌(*Plasmopara viticola*)是葡萄主要病害之一且分布广泛。扈进冬等^[41]发现分离自黄瓜霜霉病蔬菜大棚中的拮抗性多粘类芽胞杆菌 PB-2 对葡萄霜霉病具有较好的防治效果,菌含量为 10^8 cfu/mL 的 PB-2 发酵稀释液对葡萄霜霉病菌抑制率达到了 77.2%。德里腐霉(*Bythium deliense* Meurs)属于鞭毛菌亚门,是黄瓜猝倒病的主要致病菌,该病主要发生在黄瓜幼苗期。张震等^[42]研究发现多粘类芽胞杆菌 AZ 同时对黄瓜苗期猝倒病具有较好的防治效果。辣椒疫霉菌又称辣椒黑茎病,是由鞭毛菌亚门辣椒疫霉菌(*Phytophthora capsici*)侵染辣椒韧皮部导致辣椒死亡的严重真菌性病害。Xu 等^[43]研究发现多粘类芽胞杆菌 SC-0921 增强辣椒植株体内与病原菌相关的蛋白基因表达(CAPR4 和 CACH2),对辣椒疫霉有较好的防治效果,同时能够促进辣椒植株的生长。

苹果炭疽病是苹果三大病害之一,由子囊菌亚门小丛壳属(*Glomerella cingulata*)和半知菌亚门胶胞炭疽菌(*Colletotrichum gloeosporioides*)侵染所致,容易引起苹果采摘后腐烂。Kim 等^[44]研究发现多粘类芽胞杆菌 APEC128 对苹果炭疽病具有较好的抑制效果,用浓度为 1×10^8 cfu/mL 的 APEC128 悬浮液处理苹果后,相比其他低剂量处理组,苹果炭疽病菌和胶胞炭疽菌引起的疾病被大大抑制(分别为 83.6% 和 79%)。

柑橘青霉病的病原为青霉菌(*Penicillium italicum*)其主要危害果实,属于子囊菌亚门。武明俊等^[45]从西藏类乌齐协马山口高山草甸的土壤中分离得到 1 株多粘类芽胞杆菌 JW-725,发现该菌株的二级发酵产物对柑橘青霉菌具很强的抑菌活性,用温处理后其发酵液仍表现出很强的抗菌活性。

2.3 防治线虫

线虫侵入植物体内后吸收植物体内营养,使

植株正常的生长发育受阻。其代谢分泌物还会对宿主植物的细胞和组织造成不良影响,降低植物自身抵抗能力,导致植物畸形。Khan 等^[46]研究发现多粘类芽胞杆菌分泌的次级代谢物能够抑制线虫卵的孵育,或者是通过增强固氮作用进而增强植物根系的防御能力以阻止线虫的侵入。目前对于多粘类芽胞杆菌在防治虫害方面的研究相对较少。

3 促进植物生长和增产

研究发现,某些多粘类芽胞杆菌能够促进植物生长和增产。史应武等^[47]在甜菜上接种内生多粘类芽胞菌 S-7 后,显著提高了甜菜叶片净光合速率,使甜菜叶片光合强度维持在一个较高的水平,从而增加了甜菜的含糖率。张振粉等^[48]在甘肃苜蓿产地分离的多粘类芽胞杆菌 HTBRC1 经试验证明可以促进紫花苜蓿生长。王希等^[49]发现海洋多粘类芽胞杆菌 L₁₋₉ 对黄瓜幼苗具有促生作用,同时能够明显诱导黄瓜对枯萎病的抗性。郭芳芳等^[50]从浙江天目山柳杉中分离的多粘类芽胞杆菌 CF05 经试验证明在温室条件下对番茄幼苗具有较好的促生作用。张高峡等^[51]从作物根系分离的多粘类芽胞杆菌具有较高的固氮活性。顾小平等^[52]从毛竹根系分离得到 4 株多粘类芽胞杆菌,发现其具有较强的固氮能力。Tim-musk 等^[53]研究发现多粘类芽胞杆菌 B1 和 B2 在侵入拟南芥根部时,能够在其细胞间隙定植,在细胞表面形成生物保护膜,从而能够有效阻止拟南芥病害菌的入侵达到促生长的目的。Yang 等^[54]研究发现多粘类芽胞杆菌 P2b-2R 具有固氮作用,能够促进黑松幼苗的生长。Puri 等^[55-57]研究发现多粘类芽胞杆菌 P2b-2R 能够促进玉米幼苗、油菜幼苗和番茄幼苗生长。Kwon 等^[58]研究发现多粘类芽胞杆菌 E681 能够促进植物生长,同时能够诱导增强对各种环境胁迫系统抗性(ISR)。

以上研究表明多粘类芽胞杆菌可能通过以下四种机制达到促进植物生长和增产的效果:①分泌植物激素(如生长激素、细胞分裂素等);②促进植物光合作用,提高光合作用效率;③通过固氮、溶磷作用固定和释放营养物质,提高植物对氮和磷的利用率;④通过抑制植物病原菌间接促进植物生长和增产。

表 2 多粘类芽胞杆菌的生防作用

Table 2 Biocontrol effects of *Paenibacillus polymyxa*

菌株	作用	来源	时间	发现者	参考文献
<i>P. polymyxa</i> HY96-2	防治黄瓜枯萎病、百合枯萎病	江西番茄根际	2004	李广元	[17]
<i>P. polymyxa</i> L227-3	抗软腐欧文氏	白菜根际	2006	鲁燕汶	[20]
<i>P. polymyxa</i> G-44	抗甜瓜角斑病	新疆甜瓜根际	2008	王杏芹	[24]
<i>P. polymyxa</i> 7-4	抗大丽轮枝菌	河北棉田	2011	王笑颖	[29]
<i>P. polymyxa</i> SQR-21	抗西瓜枯萎病	黄瓜根际	2010	凌宁	[32]
<i>P. polymyxa</i> BRF-1	防治番茄枯萎病和黄瓜枯萎病	大豆根际土壤	2005	陈雪丽	[34]
<i>P. polymyxa</i> CF-05	抗番茄枯萎病	浙江古树柳杉内部	2014	L. mei	[36]
<i>P. polymyxa</i> C-5	抗烟草黑胫病	云南和安徽烟草田	2010	曹明慧	[37]
<i>P. polymyxa</i> HT-16	抗葡萄白腐病	蝗虫体内	2014	Junhua Han	[38]
<i>P. polymyxa</i> CP7	抗荔枝霜疫菌	—	2007	陈海英	[40]
<i>P. polymyxa</i> A2	防治黄瓜猝倒病和生长期枯萎病	—	—	张震	[42]
<i>P. polymyxa</i> SC-0921	抗辣椒疫霉	韩国江原道白菜根际土壤	2014	Shengjun xu	[43]
<i>P. polymyxa</i> APEC128	抗苹果炭疽病	韩国庆尚北道省苹果园	2016	YS Kim	[44]
<i>P. polymyxa</i> JW-725	抗柑橘青霉菌	西藏类乌齐协马山口高山草甸的土壤	2003	武明俊	[45]
<i>P. polymyxa</i> S-7	促进甜菜光合作用,提升甜菜品质	新疆石河子甜菜块根上分离得到	2009	史应武	[47]
<i>P. polymyxa</i> HTBRC1	促进紫花苜蓿生长	甘肃紫花苜蓿产地	2014	张振粉	[48]
<i>P. polymyxa</i> L1-9	促进黄瓜须根的增加和根伸长	连云港海域海泥	2014	王希	[49]
<i>P. polymyxa</i> HW-1	固氮	武汉和宜昌土壤	1998	张高峡	[51]

注 “—”表示发现地未知

4 展 望

植物土传病是导致农业经济损失的主要病害,也是妨碍作物连作的主要因素。传统防治植物土传病的方法不仅效果一般,而且导致了环境污染、农药残留、威胁食品安全。如何解决这些问题,国内外学者一致认为通过使用生物防治不仅可以达到高效防治,同时可以解决环境污染、农药残留等问题。而多粘类芽胞杆菌生产成本低、适应性强、耐热、耐酸碱,具有广谱的抗菌效果,能够分泌多种物质抑制许多土传细菌、真菌的活性,同时能够通过固氮、溶磷、产生植物激素促进植物生长和增产。多粘类芽胞杆菌被我国农业部列为免做安全鉴定的一级菌种,美国环保署(EPA)也将其为可在商业上应用的微生物之一。因此多粘类芽胞杆菌可以用来开发成全新的生物农药,是一种极具开发前景的生防菌。为使其在农业充分发挥作用,需要科研机构与企业密切配合,更需要政府的扶持和大力推广。

参考文献:

[1] Ash C, Priest F G, Collins M D. Molecular identification of

rRNA group 3 bacilli (Ash, Farrow, Wallbanks and Collins) using a PCR probe test. Proposal for the creation of a new genus *Paenibacillus* [J]. *Antonie van Leeuwenhoek*, 1993, 64: 253-260.

- [2] 罗远婵,张道敬,魏鸿刚,等. 多粘类芽胞杆菌农用活性研究进展[C]//中国植物细菌病害学术研讨会,2008.
- [3] 王刘庆,王秋影,廖美德,等. 多粘类芽胞杆菌生物特性及其机理研究进展[J]. *中国农学通报* 2013 29(11):158-163.
- [4] 何云龙,谢桂先,孙改革,等. 土传病害防治的研究进展[J]. *湖南农业科学*, 2012, 28(3): 27-29.
- [5] Zhao Q Y, Dong C X, Yang X M, et al. Biocontrol of Fusarium wilt disease for Cucumis melo melon using bio-organic fertilizer [J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 47(1): 67-75.
- [6] Alabouvette C, Olivain C, Steinberg C. Biological control of plant diseases: the European situation [J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2006, 114(3): 329-341.
- [7] Nguyen M T. Soil-borne antagonists for biological control of bacterial wilt disease caused by *Ralstonia solanaceum* in tomato and pepper [J]. *Journal of Plant Pathology*, 2010, 92(2): 395-405.
- [8] Guemouriathmani S, Berge O, Bourrain M, et al. Diversity of *Paenibacillus polymyxa* populations in the rhizosphere of wheat (*Triticum durum*) in Algerian soils [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2000, 36(3-4): 149-159.
- [9] Von der Weid IA, Paiva E, Nóbrega A, et al, Diversity of *Paenibacillus polymyxa* strains isolated from the rhizosphere of

- maize planted in Cerrado soil [J]. *Res Microbiol*, 2000, 151 (5): 369-381.
- [10] Holl F B, Chanway C P. Rhizosphere colonization and seedling growth promotion of lodgepole pi [J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 1992, 38 (38): 303-308.
- [11] Shishido M, Massicotte H B, Chanway C P. Effect of Plant Growth Promoting *Bacillus* Strains on Pine and Spruce Seedling Growth and Mycorrhizal Infection [J]. *Annals of Botany*, 1996, 77 (5): 433-442.
- [12] Ravi A V, Musthafa K S, Jegathammbal G, et al. Screening and evaluation of probiotics as a biocontrol agent against pathogenic *Vibrios* in marine aquaculture [J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2007, 45 (2): 219-223.
- [13] Tenover F C. Mechanisms of Antimicrobial Resistance in Bacteria [J]. *American Journal of Medicine*, 2006, 119 (6): 64-73.
- [14] Xu J, Pan Z C, Prior P, et al. Genetic diversity of *Ralstonia solanacearum* strains from China [J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2009, 125 (4): 641-653.
- [15] 王艳, 吴志华, 李国清, 等. 桉树无性系抗青枯性的测定及多粘类芽胞杆菌生防效果研究 [J]. *热带作物学报*, 2013, 34 (9): 1786-1790.
- [16] 李波, 孙思, 王翠颖, 等. 多粘类芽胞杆菌对木麻黄青枯病的抑菌防病作用 [J]. *林业科技开发*, 2012, 26 (3): 65-67.
- [17] 李元广, 魏鸿刚, 罗远婵, 等. 防治植物土传病害的新型微生物肥料系列产品—多粘类芽胞杆菌细粒剂和可湿性粉剂的创制及其应用 [C]// 环保肥料新技术、新产品应用暨生物肥料研讨会, 2010.
- [18] 贾云鹤, 张俊华, 崔崇士. 软腐欧文氏菌致病性的研究进展 [J]. *东北农业大学学报*, 2007, 38 (1): 113-118.
- [19] Toth I K, Bell K S, Holeva M C, et al. Soft rot erwiniae: from genes to genomes [J]. *Molecular Plant Pathology*, 2003, 4 (1): 17-30.
- [20] 鲁燕汶. 大白菜软腐病病原细菌的分离、筛选及鉴定 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
- [21] 葛米红. 利用内生细菌防治水稻白叶枯病的研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- [22] 高玲玲, 陈小龙, 蒋涛, 等. 具有拮抗作用的水稻内生固氮菌的分离与鉴定 [J]. *华中农业大学学报*, 2012, 31 (5): 553-557.
- [23] Hong C E, Kwon S Y, Park J M. Biocontrol activity of *Paenibacillus polymyxa* AC-1 against *Pseudomonas syringae* and its interaction with *Arabidopsis thaliana* [J]. *Microbiological research*, 2016, 185: 13-21.
- [24] 王杏芹, 史应武, 刘文玉, 等. 甜瓜角斑病拮抗菌的鉴定及生长条件研究 [J]. *西北农业学报*, 2008, 17 (2): 304-308.
- [25] Endo A, Kakiki K, Misato T. Mechanism of action of the antifungal agent polyoxin D [J]. *Journal of Bacteriology*, 1970, (104): 189-196.
- [26] Bartnicki-Garcia S, Lippman E. Inhibition of *Mucor rouxii* by polyoxin D: effects on chitin synthetase and morphological development [J]. *Journal of General Microbiology*, 1972, 71 (2): 301-309.
- [27] Bowers B, Levin G, Cabib E. Effect of polyoxin D on chitin synthesis and septum formation in *Saccharomyces cerevisiae* [J]. *Journal of Bacteriology*, 1974, 119 (2): 564-575.
- [28] Ishizaki H, Mitsuoka K, Kunoh H. Effect of Polyoxin on *Fun-gi*: (I) Optical Microscopic Observations of Mycelia of *Alternaria kikuchiana* Tanaka [J]. *Japanese Journal of Phytopathology*, 1974, 40 (5): 433-438.
- [29] 王笑颖, 孟成生, 雷白时, 等. 大丽轮枝菌拮抗细菌多粘芽胞杆菌 7-4 菌株的筛选与鉴定 [J]. *湖北农业科学*, 2011, 50 (9): 1797-1799.
- [30] 姚乌兰, 王云山, 韩继刚, 等. 水稻生防菌株多粘类芽胞杆菌 WY110 抗菌蛋白的纯化及其基因克隆 [J]. *遗传学报*, 2004, 31 (9): 878-887.
- [31] 王光华, 周克琴, 金剑, 等. 生防微生物 BRF-1 对大豆根腐病的拮抗作用 [J]. *大豆科学*, 2004, 23 (3): 188-191.
- [32] 凌宁. 根际施用生物有机肥防控西瓜土传枯萎病效果及机理研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [33] Raza W, Yuan J, Ling N, et al. Production of volatile organic compounds by an antagonistic strain *Paenibacillus polymyxa* WR-2 in the presence of root exudates and organic fertilizer and their antifungal activity against *Fusarium oxysporum* f. sp. niveum [J]. *Biological Control*, 2015, 80: 89-95.
- [34] 陈雪丽, 王光华, 金剑, 等. 多粘类芽胞杆菌 BRF-1 和枯草芽胞杆菌 BRF-2 对黄瓜和番茄枯萎病的防治效果 [J]. *中国生态农业学报*, 2008, 16 (02): 446-450.
- [35] 赵新海, 钟丽娟, 徐冲, 等. 康地蕾得对百合镰刀菌枯萎病的室内毒力测定及防治试验 [J]. *安徽农业科学*, 2008, 36 (22): 9613-9614.
- [36] Mei L, Liang Y, Zhang L, et al. Induced systemic resistance and growth promotion in tomato by an indole-3-acetic acid-producing strain of *Paenibacillus polymyxa* [J]. *Annals of Applied Biology*, 2014, 165 (2): 270-279.
- [37] 曹明慧. 防治土传烟草黑胫病微生物有机肥的研制与生物效应研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- [38] Han J, Chen D, Huang J, et al. Antifungal activity and biocontrol potential of *Paenibacillus polymyxa* HT16 against white rot pathogen (*Coniella diplodiella* Speq.) in table grapes [J]. *Biocontrol Science and Technology*, 2015, 25 (10): 1120-1132.
- [39] 蔡学清. 荔枝采后主要病原菌的特性及内生细菌对其防治保鲜研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2010.
- [40] 陈海英, 林健荣, 廖富蘋, 等. 多粘类芽胞杆菌 CP7 对荔枝霜疫霉菌的抗菌活性及其作用机制 [J]. *园艺学报*, 2010, 37 (7): 1047-1056.
- [41] 扈进冬, 吴远征, 李纪顺, 等. 拮抗性多粘类芽胞杆菌 PB-

- 2 及其制剂对葡萄霜霉病的防效测定[J]. 山东科学, 2014, 27(3): 30-33.
- [42] 张震,张炳欣,喻景权. 黄瓜土传病害拮抗菌分离鉴定及其生物活性测定[J]. 浙江农业学报, 2004, 16(03): 151-155.
- [43] Xu S, Kim B S. Evaluation of *Paenibacillus polymyxa* strain SC09-21 for biocontrol of *Phytophthora blight* and growth stimulation in pepper plants[J]. Tropical Plant Pathology, 2016, 41(3): 162-168.
- [44] Kim Y S, Jeon Y. Biological Control of Apple Anthracnose by *Paenibacillus polymyxa* APEC128, an Antagonistic Rhizobacterium[J]. The Plant Pathology Journal, 2016, 32(3): 251-259.
- [45] 武明俊,金丹,李晖,等. 抗真菌菌株 JW-725 的分离、鉴定及发酵产物性质的初步分析[J]. 四川大学学报, 2003, 40(5): 945-948.
- [46] Khan Z, Kim S G, Jeon Y H, et al. A plant growth promoting rhizobacterium, *Paenibacillus polymyxa*, strain GBR-1, suppresses root-knot nematode [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(8): 3016-3023.
- [47] 史应武, 娄恺, 李春, 等. 内生多粘类芽胞杆菌 S-7 对甜菜光合作用及产量和品质的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(3): 597-602.
- [48] 张振粉, 南志标. 甘肃省紫花苜蓿种带促生多粘类芽胞杆菌的分离与鉴定[J]. 草业学报, 2014, 23(5): 256-262.
- [49] 王希, 刘佳, 暴增海, 等. 海洋多粘类芽胞杆菌 L1-9 菌株对黄瓜的促生作用和诱导抗性研究[J]. 北方园艺, 2014, (21): 133-137.
- [50] 郭芳芳, 谢镇, 卢鹏, 等. 一株多粘类芽胞杆菌的鉴定及其生防促生效果初步测定[J]. 中国生物防治学报, 2014, 30(4): 489-496.
- [51] 张高峡, 卢振祖. 从作物根际分离的多粘芽胞杆菌固氮作用的研究[J]. 武汉大学学报理学版, 1998, (6): 745-748.
- [52] 顾小平, 吴晓丽. 毛竹根际分离的多粘芽胞杆菌固氮特性的研究[J]. 林业科学, 1998, 11(4): 377-381.
- [53] Timmusk S, Grantcharova N, Wagner E. *Paenibacillus polymyxa* invades plant roots and forms biofilms[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, 71(11): 7292-7300.
- [54] Yang H, Puri A, Padda K P, et al. Effects of *Paenibacillus polymyxa* inoculation and different soil nitrogen treatments on lodgepole pine seedling growth[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2016, 46(6): 816-821.
- [55] Puri A, Padda K P, Chanway C P. Seedling growth promotion and nitrogen fixation by a bacterial endophyte *Paenibacillus polymyxa* P2b-2R and its GFP derivative in corn in a long-term trial[J]. Symbiosis, 2016, 69(2): 123-129.
- [56] Padda K P, Puri A, Chanway C P. Effect of GFP tagging of *Paenibacillus polymyxa* P2b-2R on its ability to promote growth of canola and tomato seedlings [J]. Biology and Fertility of Soils, 2016, 52(3): 377-387.
- [57] Puri A, Padda K P, Chanway C P. Evidence of nitrogen fixation and growth promotion in canola (*Brassica napus* L.) by an endophytic diazotroph *Paenibacillus polymyxa* P2b-2R[J]. Biology and Fertility of Soils, 2016, 52(1): 119-125.
- [58] Kwon Y S, Lee D Y, Rakwal R, et al. Proteomic analyses of the interaction between the plant-growth promoting rhizobacterium *Paenibacillus polymyxa* E681 and *Arabidopsis thaliana* [J]. Proteomics, 2016, 16(1): 122-135.

欢迎订阅《微生物学杂志》