

党参根腐病的发生及防治现状研究

张婉霞, 寇志安, 张梓坤, 王馨芳, 王雅丽, 刘 洋, 田永强

兰州交通大学生物与制药工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2023年4月10日; 录用日期: 2023年5月10日; 发布日期: 2023年5月19日

摘 要

党参是我国一种常见的中药材, 以根入药, 在甘肃省种植面积较广。近年, 党参根腐病的发生严重影响了甘肃省党参的质量与产量。本文讨论了党参根腐病对党参造成的危害, 并针对其致病真菌尖孢镰刀菌 (*Fusarium oxysporum*) 的致病机制及防治现状进行初步讨论。目前党参根腐病的防治主要采用物理、化学及生物防治, 本文针对党参根腐病的生物防治进行了初步讨论, 并针对芽孢杆菌的生防研究及应用进行了概述。

关键词

党参, 党参根腐病, 尖孢镰刀菌, 生物防治, 生防芽孢杆菌

The Study on the Occurrence and Control of *Codonopsis pilosula* Wilt

Wanxia Zhang, Zhi'an Kou, Zikun Zhang, Xinfang Wang, Yali Wang,
Yang Liu, Yongqiang Tian

School of Biological and Pharmaceutical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Apr. 10th, 2023; accepted: May 10th, 2023; published: May 19th, 2023

Abstract

Codonopsis pilosula (*C. pilosula*) is a common Chinese herbal medicine, which is widely planted in Gansu Province. In recent years, *C. pilosula* wilt seriously affected the quality and yield of *C. pilosula* in Gansu Province. In this paper, the harm of *C. pilosula* wilt was discussed, and the pathogenic mechanism and control status of *Fusarium oxysporum* were preliminarily discussed. At present, physical, chemical and biological control are mainly used to control *C. pilosula* wilt. This paper discusses the biological control of *C. pilosula* wilt, and summarizes the research and application of biological control of Bacillus.

文章引用: 张婉霞, 寇志安, 张梓坤, 王馨芳, 王雅丽, 刘洋, 田永强. 党参根腐病的发生及防治现状研究[J]. 世界生态学, 2023, 12(2): 175-181. DOI: 10.12677/ije.2023.122021

Keywords

Codonopsis pilosula, *Codonopsis pilosula* Wilt, *Fusarium oxysporum*, Biological Control, Biocontrol Bacillus

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 党参根腐病的发生

1.1. 党参根腐病的概述

党参(*Codonopsis pilosula* (Franch.) Nannf.)属桔梗科多年生藤本植物,能健脾益肺、养血生津,常用于治疗脾肺气虚,气血不足,或津伤口渴等[1] [2]。甘肃省是中国党参的主要产区,党参种植面积约 30 万 hm^2 ,其产量占国内流通的 80%以上[3]。目前,党参种植产业成为甘肃部分地区农民重要的收入来源,但党参连作导致土壤中病原菌大量积累,发生了诸多病害,逐渐影响了甘肃党参的产量和品质[4]。其中,党参根腐病的发病率较高且危害较重,对党参健康产生了较大威胁[5]。

根据根腐病的发病症状,党参根腐病被分为“急性型”和“慢性型”,该两种根腐病分别是由尖孢镰刀菌和锐顶镰刀菌(*Fusarium acuminatum*)导致的[4]。近年来,尖孢镰刀菌引起的“急性型”根腐病发病率高于“慢性型”,发病率可达到 70% [6]。急性型党参根腐病病害最初发生在根部,根部维管束组织发生褐变,但地上部分无任何症状。发病严重后,植株地上部分的叶和茎迅速萎蔫枯萎,最后整株死亡;在严重的情况下,党参的根腐烂直至消失[4] [7] [8]。有研究表明,党参根腐病可通过党参根系接触、根状菌索蔓延等方式进行传播,且病害发生后迅速扩散,难以及时发现和控制[9] [10]。

1.2. 尖孢镰刀菌的致病机制

尖孢镰刀菌(*F. oxysporum*)属镰刀菌属(*Fusarium*. sp),是一种土传致病真菌,在全球范围内广泛分布,可导致 100 多种植物发生枯萎病[8],是世界上五大植物病原真菌之一[11]。尖孢镰刀菌通过多种致病因子综合作用来侵染植物使其致病[12]。有研究表明,尖孢镰刀菌的孢子和菌丝体可以在植物种子或病残体、土壤中越冬,次年通过附着寄主根部表皮或伤口侵染植物[13]。尖孢镰刀菌感染的机制证实,植物根尖是尖孢镰刀菌侵入的最初位点[14] [15] [16]。尖孢镰刀菌对植物根系分泌物具有趋化性,其孢子在接触根尖分泌物如碳、氮等一些营养物质时萌发,并发育成菌丝。随后,尖孢镰刀菌分泌产生的细胞壁降解酶(Cell wall degrading enzymes, CWDEs)能促使尖孢镰刀菌对植物根系表皮细胞进行渗透或在植物细胞间的生长进入根部皮层[17] [18]。尖孢镰刀菌在植物皮质及导管定殖、繁殖并产生植物毒素以帮助入侵[19] [20] [21]。尖孢镰刀菌的泛素连接蛋白酶复合体、锌指蛋白转录因子和线粒体载体蛋白等因素被证实是尖孢镰刀菌定殖的关键[22] [23]。尖孢镰刀菌定殖于宿主植物细胞后,再通过菌丝生长及毒素的产生与扩散在植物导管内进行蔓延。尖孢镰刀菌在导管中大量生长和繁殖的过程中,其降解植物导管内壁产生的大量化合物会堵塞植物维管束,从而引起植物萎蔫坏死[24]。

尖孢镰刀菌还能产生镰刀菌酸(Fusaric acid)、恩镰孢毒素(Enniatin)等多种真菌毒素,从而影响宿主植物的种子萌发和植物生长状况[25]。这些毒素的产生与积累往往发生在侵染早期,其与植物根系细胞膜特定蛋白质结合,从而损伤根系细胞来使其发生形态变化,从而为病原菌的定殖提供有利条件[26]。尖孢镰

刀菌的定殖、蔓延及细胞壁降解酶的共同作用加速了宿主植物导管运输阻塞，并协同真菌毒素的致病作用，迅速导致宿主植物萎蔫、腐烂[27]。

2. 党参根腐病的防治现状

2.1. 物理与化学防治

党参种植通常采用育苗栽种的方式，然而起苗易导致党参幼苗出现人为伤口，这是导致病原菌侵染党参的原因之一[4]。此外，频繁耕作与降雨等因素均是影响党参根腐病发病的重要因素。因此，选地、整地，育苗拌种，栽植喷沟，叶面喷雾，轮作倒茬等物理方式被用来防治党参根腐病的发生[4] [28]。研究表明，采用党参栽培密度 75 万株/hm²，并同时适当施肥的方式可有效降低党参根部病害的发病率[29]。党参种植切忌连作，前茬作物以禾本科为宜，且时间间隔最好在 4 年以上[30]。此外，搭架绑蔓能有效增加田间通风透光、降低湿度，从而有效降低党参病害的发生[31]。但以上物理防治方式因其操作繁琐、效率不高而不被农民所推崇。

目前，党参根腐病的防治主要采用化学防治。化学农药具有操作简便、作用效果好等优点被广泛应用于我国中药材病害的防治。据报道，党参种植多采用多菌灵、乙酸铜等进行整地拌土，或用甲基硫菌灵、多菌灵等浸种浸根等方式进行预防[32] [33]；党参根腐病发病初期用生石灰或五氯硝基苯配合多菌灵、噻灵·咯·精甲、多抗霉素等化学试剂进行灌根[33] [34]。有研究发现，“喷根”技术结合化学试剂能有效改善蘸根、灌根、叶面喷雾带来的操作难、防效差的问题[6]。化学防治剂因其防治效果好、见效快被大量应用在农业生产中，但其不规范、无节制的使用造成了农产品农药残留、土壤污染、病原抗性增加等食品安全与环境问题。

2.2. 生物防治

生物农药一种防治效果好、绿色、安全的防治剂，包括植物源、动物源及微生物农药等。植物源农药是指来源于植物的次生代谢产物，能导致害虫拒食、麻醉，从而抑制害虫生长与繁殖或抑制病原菌的生长，因其绿色、环保、对人畜无害等优点在农业推广中应用[35] [36]。香芹酚是一种广谱性较强、效果好的植物源农药，已被制成产品投入到市场中。常见的动物源生物农药包括信息素、节肢动物毒素等，通过信息素干扰、诱杀、防御等方式防御害虫侵袭[37] [38] [39]。微生物源农药即应用微生物体、其内含物或代谢产物等作用于植物病害。其中，微生物菌体可通过定殖、传播、繁殖等机制作用于病虫害部位，药效持久性强，同时能有效抑制潜伏病原菌[40]。有研究表明，多粘类芽孢杆菌(*Paenibacillus polymyxa*)、普城沙雷氏菌(*Serratia plymuthica*)等微生物能有效抑制尖孢镰刀菌引起的根腐病[41] [42]。常见的微生物农药包括多抗霉素、苏云金杆菌等[43]。此外，微生物以其资源丰富，生长周期短、生产成本低、价格低廉无污染等优点能被广泛应用于商业用途[44]。目前的研究发现多株微生物对引起根腐病的尖孢镰刀菌有较好的防治效果，但针对党参根腐病的生物防治应用较少，有待继续开发研究。

3. 芽孢杆菌的生防研究与应用现状

3.1. 生防类芽孢杆菌

微生物杀菌剂因其有益于生态环境及食品安全等优点被研发，是植物病害生物防治研究的重要研究领域。其中，芽孢杆菌因其生长速度快、易于培养，其孢子能适应各种极端环境等特性成为理想的生防菌筛选对象[45]。目前研究发现的生防芽孢杆菌主要包括枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)、解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*)等[46]。研究发现，芽孢杆菌的生防作用主要包括拮抗作用、竞争作用、诱导抗性和促生作用几种形式，且通常是两种或多种形式协同作用对植物病原菌发挥作用[47]。

生防芽孢杆菌可通过其产生的次级代谢产物能抑制或杀死另一种微生物。有研究表明,解淀粉芽孢杆菌和多粘类芽孢杆菌能通过分泌脂肽类物质、抗菌蛋白、表面活性素或多肽类物质等来抑制尖孢镰刀菌、黑曲霉和稻瘟病菌等多种病原菌引起的植物病害[48] [49] [50] [51]。有些生防芽孢杆菌还能分泌脂肽类抗生素、抗菌蛋白等,使植物抗性蛋白基因表达被激活,从而诱导或增强植物抗性[46]。研究发现,解淀粉芽孢杆菌产生的 Fengycin、Bacillomycin D 及 Surfactin 等多种抗菌物质与植物的抗性有关,这些抗菌物质能够通过协同多种防御信号途径来诱导植物对抗植物病原菌[52]。

生防芽孢杆菌菌群可以还通过促进氮固定、磷转化、合成铁载体以及生长素吲哚乙酸(Indole-3-acetic acid, IAA)、细胞分裂素的分泌等多种方式促进植物及其根系的生长,并增强其对植物病原菌的抗性来发挥生物防治的作用[53] [54]。研究发现,烟草内生细菌不仅能有效防治烟草黑胫病菌,还能促进烟草种子的萌发[55]。高产 IAA 的根际促生菌大猩猩芽孢杆菌(*Bacillus massiliogorillae*)在植物根际促生方面也表现出良好的作用效果,这表明根际促生芽孢杆菌产生的 IAA 与植物生长息息相关[56]。

3.2. 生防芽孢杆菌的应用

许多芽孢杆菌制成的生物农药因其绿色安全、无污染、不易产生抗药性等诸多优点,符合食品安全、高质量的要求,具有良好的市场发展潜力。国内针对生防芽孢杆菌已进行较多研究,且已有部分优良的生防芽孢杆菌开始投入使用。目前,研究较多的芽孢杆菌主要有枯草芽孢杆菌、蜡状芽孢杆菌(*Bacillus cereus*)、解淀粉芽孢杆菌和苏云金芽孢杆菌(*Bacillus thuringiensis*)等[57]。在国内,枯草芽孢杆菌生物杀菌剂 BS-916、BS-208 菌剂、百抗、麦丰宁等多个芽孢杆菌制成的生物农药商品已注册登记并进入市场推广使用[57]。此外,三株枯草芽孢杆菌及一株解淀粉芽孢杆菌已在美国获得有限商品化生产应用许可[58] [59]。美国研发的芽孢杆菌菌剂 GB03 对豆类、麦类、棉花及花生等作物的根部病害有较好的防效;FZB24 作为植物促长剂能促进观赏性灌木及树苗的生长,并有效防止植物枯萎病及根腐病[60]。

4. 展望

党参根腐病的防治主要采用物理防治和化学防治为主。但由于尖孢镰刀菌是土传病原菌,除了用防治剂灌根外的其他防治方式均达不到杀菌目的,而化学农药的大量使用,易造成农药残留超标、水体及土壤污染等诸多问题[40]。目前,利用微生物和其代谢产物防治病原菌已经成为新型的、安全、绿色的防治方法。在对植物根腐病的机制研究发现,尖孢镰刀菌的侵染依靠溶壁酶的作用及镰刀菌酸等毒素的产生。FSA 是导致植物根腐病的主要原因之一,能引起植物维管细胞褐变和植物坏死,且能对细胞完整性及细胞功能造成影响[61] [62] [63] [64]。因此,FSA 可作为尖孢镰刀菌致病的关键点,为尖孢镰刀菌的防治机理研究提供了新思路。此外,芽孢杆菌可以产生伊枯草素(Iturins)、泛革素(Fengycins)和表面活性素(Surfactins)等多种脂肽类抗生素,这些脂肽类物质具有不同的抗菌特性[65]。基于此,生防芽孢杆菌产生的脂肽类抗生素可作为生物防治剂来防治微生物,可作为新的研究方向来进行防治尖孢镰刀菌引起的党参根腐病。

参考文献

- [1] 谢琦,程雪梅,胡芳弟,等. 党参化学成分、药理作用及质量控制研究进展[J]. 上海中医药杂志, 2020, 54(8): 94-104.
- [2] 毕红艳,张丽萍,陈震,等. 药用党参种质资源研究与开发利用概况[J]. 中国中药杂志, 2008(5): 590-594.
- [3] 李成义,刘书斌,李硕,等. 甘肃商品白条党参质量的灰色关联度评价[J]. 中国实验方剂学杂志, 2015, 21(21): 33-39.
- [4] 孙新荣,张西梅,高薇薇,等. 甘肃党参根腐病发生危害与防治[J]. 陕西农业科学, 2019, 65(12): 90-91.
- [5] 徐雪芬,倪春辉,李惠霞,等. 党参根腐病病原菌鉴定及其室内毒力测定[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(1): 96-103.

- [6] 孙新荣, 仲彩萍, 张西梅, 等. 甘肃定西地区党参根腐病病原鉴定与防治研究[J]. 植物保护, 2020, 46(5): 290-297.
- [7] Martins, O.M. and Takatsu, A. (1990) Doenças de Hortaliças No Amapá.
- [8] Correll, J.C. (1991) The Relationship between Formae Speciales, Race, and Vegetative Compability Groups in *Fusarium oxysporum*. *Phytopathology*, **9**, 1061-1064.
- [9] 李聚奎. 园林树木根腐病发生及防治对策研究[J]. 智慧农业导刊, 2021, 1(16): 54-56.
- [10] 帕若楠, 谢尹颖, 武自强. 我国常见农林植物根腐病研究进展[J]. 农业开发与装备, 2019(12): 31-39.
- [11] Dean, R., Van Kan, J.A., Pretorius, Z.A., et al. (2012) The Top 10 Fungal Pathogens in Molecular Plant Pathology. *Molecular Plant Pathology*, **13**, 414-430. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2011.00783.x>
- [12] 霍莹莹, 李甜甜, 杨静, 等. 尖孢镰刀菌相关致病因子与挥发油抑制尖孢镰刀菌的潜力研究进展[J]. 农药, 2022, 61(2): 79-86.
- [13] Pietro, A.D., Madrid, M.P., Caracuel, Z., et al. (2003) *Fusarium oxysporum*: Exploring the Molecular Arsenal of a Vascular Wilt Fungus. *Molecular Plant Pathology*, **4**, 315-325. <https://doi.org/10.1046/j.1364-3703.2003.00180.x>
- [14] Farquhar, M.L. and Peterson, R.L. (1989) Pathogenesis in *Fusarium* Root Rot of Primary Roots of *Pinus resinosa* Grown in Test Tubes. *Canadian Journal of Plant Pathology*, **11**, 221-228. <https://doi.org/10.1080/07060668909501103>
- [15] Bowers, J.H., Nameth, S.T., Riedel, R.M., et al. (1996) Infection and Colonization of Potato Roots by *Verticillium dahliae* as Affected by *Pratylenchus penetrans* and *P. crenatus*. *Phytopathology*, **86**, 614-621. <https://doi.org/10.1094/Phyto-86-614>
- [16] Herman, R., Zvirin, Z., Kovalski, I., et al. (2008) Characterization of *Fusarium* Race 1.2 Resistance in Melon and Mapping of a Major QTL for This Trait near a Fruit Netting Locus. *Proceedings of the 9th EUCARPIA Meeting on Genetics and Breeding of Cucurbitaceae*, Avignon, 21-24 May 2008.
- [17] Rodríguez-Gálvez, E. and Mendgen, K. (1995) The Infection Process of *Fusarium oxysporum* in Cotton Root Tips. *Protoplasma*, **189**, 61-72. <https://doi.org/10.1007/BF01280291>
- [18] Gordon, T.R. (2017) *Fusarium oxysporum* and the Fusarium Wilt Syndrome. *Annual Review of Phytopathology*, **55**, 23-39. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080615-095919>
- [19] Ospina-Giraldo, M.D., Mullins, E. and Kang, S. (2003) Loss of Function of the *Fusarium oxysporum* SNF1 Gene Reduces Virulence on Cabbage and Arabidopsis. *Current Genetics*, **44**, 49-57. <https://doi.org/10.1007/s00294-003-0419-y>
- [20] Di Pietro, A., García-Maceira, F.I., Męglec, E., et al. (2004) A MAP Kinase of the Vascular Wilt Fungus *Fusarium oxysporum* Is Essential for Root Penetration and Pathogenesis: *Fusarium* MAPK Is Essential for Pathogenesis. *Molecular Microbiology*, **39**, 1140-1152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2958.2001.02307.x>
- [21] Marrè, M.T., Vergani, P. and Albergoni, F.G. (1993) Relationship between Fusaric Acid Uptake and Its Binding to Cell Structures by Leaves of *Egeria densa* and Its Toxic Effects on Membrane Permeability and Respiration. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, **42**, 141-157. <https://doi.org/10.1006/pmpp.1993.1012>
- [22] Ulloa, M., Hutmacher, R.B., Roberts, P.A., et al. (2013) Inheritance and QTL Mapping of Fusarium Wilt Race 4 Resistance in Cotton. *Theoretical and Applied Genetics*, **126**, 1405-1418. <https://doi.org/10.1007/s00122-013-2061-5>
- [23] Jonkers, W., Rodrigues, C.D.A. and Rep, M. (2009) Impaired Colonization and Infection of Tomato Roots by the Δ *frp1* Mutant of *Fusarium oxysporum* Correlates with Reduced CWDE Gene Expression. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, **22**, 507-518. <https://doi.org/10.1094/MPMI-22-5-0507>
- [24] Thatcher, L.F., Gardiner, D.M., Kazan, K., et al. (2012) A Highly Conserved Effector in *Fusarium oxysporum* Is Required for Full Virulence on Arabidopsis. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, **25**, 180-190. <https://doi.org/10.1094/MPMI-08-11-0212>
- [25] 孙勇, 曾会才, 彭明, 等. 香蕉枯萎病致病分子机理与防治研究进展[J]. 热带作物学报, 2012, 33(4): 759-766.
- [26] 蒋荷, 郑慧慧, 曹莎, 等. 黄瓜种传镰刀菌粗毒素检测及其致害作用[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(3): 101-107.
- [27] Gupta, S., Chakraborti, D., Sengupta, A., et al. (2010) Primary Metabolism of Chickpea Is the Initial Target of Wound Inducing Early Sensed *Fusarium oxysporum* f. sp. *Ciceri* Race I. *PLOS ONE*, **5**, e9030. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009030>
- [28] 孙新荣, 仲彩萍, 张维彪. 甘肃党参根腐病防治新技术栽培密度研究[J]. 陕西农业科学, 2021, 67(3): 56-59.
- [29] 何春雨, 张延红, 蔺海明, 等. 不同密度和施肥量对党参品质及其病害程度的效应研究[J]. 中国农业科技导报, 2012, 14(3): 127-131.
- [30] 颜继红. 党参常见病虫害的危害症状及防治方法[J]. 现代农业科技, 2013(18): 136-140.
- [31] 谢贤明, 杨成前, 刘燕琴, 等. 川党参锈病防治技术[J]. 现代中药研究与实践, 2012, 26(6): 14-15.

- [32] 王艳, 陈秀蓉, 王引权, 等. 甘肃省党参病害种类调查及病原鉴定[J]. 山西农业科学, 2011, 39(8): 866-868.
- [33] 张承志. 党参根腐病及其防治[J]. 基层中药杂志, 1993(4): 33.
- [34] 龙合正, 安勇. 浅析威宁县党参根腐病的发生及防治[J]. 山西农经, 2018(9): 78.
- [35] 李孙洋, 邱其伟, 刘兴元, 等. 12 种药用植物粗提物对 4 种植物病原真菌抑菌活性研究[J]. 中国植保导刊, 2014, 34(1): 5-9.
- [36] 赵庆芳, 刘靓, 李巧峡, 等. 15 种植物水提液对当归根腐病抑制活性的初步筛选[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2012, 48(2): 66-69.
- [37] 朱日清, 方萍, 刘金弟, 等. 动物微生物源生物农药种类及防治对象初探[J]. 农业科技通讯, 2009(11): 119-121.
- [38] 徐冠军, 李建洪. 生物农药与农业可持续发展战略[J]. 化工之友, 2006(10): 50-52.
- [39] 李金星. 动物源生物农药研究进展[J]. 现代农业科技, 2011(23): 227.
- [40] 孙瑞泽. 丹参根腐病生物防治药剂筛选[D]: [硕士学位论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [41] 张建强. 党参根腐病生防菌的促生防病效果及机理研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
- [42] 马金秀, 张锦锋, 王江来, 等. 普城沙雷氏菌 MM 产酶条件优化及对西瓜枯萎病的防治效果[J]. 西北农业学报, 2022, 31(12): 1635-1645.
- [43] 花蕾. 常见的无公害高效低毒农药[J]. 西北园艺, 2002(3): 41-42.
- [44] 韩高勇. 生物农药的优点及其发展前景[J]. 现代农业科技, 2010(24): 340-341.
- [45] 易龙, 张亚, 廖晓兰, 等. 蜡状芽孢杆菌次生代谢产物的研究进展[J]. 农药, 2013, 52(3): 162-164.
- [46] 彭研, 陈相艳, 裴纪莹, 等. 生防芽孢杆菌的研究进展[J]. 山东农业科学, 2013, 45(7): 138-140.
- [47] 叶晶晶, 曹宁宁, 吴建梅, 等. 生防芽孢杆菌的应用研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(8): 185-190.
- [48] 陈成, 方银, 金超, 等. 枯草芽孢杆菌对桑椹采后致腐微生物的抑菌作用[J]. 蚕业科学, 2016, 42(1): 118-123.
- [49] 张荣胜, 王晓宇, 罗楚平, 等. 解淀粉芽孢杆菌 Lx-11 产脂肽类物质鉴定及表面活性素对水稻细菌性条斑病的防治作用[J]. 中国农业科学, 2013, 46(10): 2014-2021.
- [50] 洪鹏, 安国栋, 胡美英, 等. 解淀粉芽孢杆菌防治果蔬采后病害研究进展[J]. 中国农学通报, 2013, 29(12): 168-173.
- [51] 杨阿丽, 陈佰鸿, 毛娟, 等. 生物药剂和化学药剂对苹果树腐烂病菌的抑制效应[J]. 中国农学通报, 2015, 31(16): 173-181.
- [52] 刘云鹏. 根际促生解淀粉芽孢杆菌根际定殖和诱导植物系统抗性的机理研究[D]: [博士学位论文]. 中国农业科学院, 2019.
- [53] 樊继强. 生防芽孢杆菌的筛选及其抗菌物质的分离纯化与鉴定[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [54] 穆文强, 康慎敏, 李平兰. 根际促生菌对植物的生长促进作用及机制研究进展[J]. 生命科学, 2022, 34(2): 118-127.
- [55] 马冠华. 烟草内生细菌 Itb57 生物学性状及其对黑胫病的控制研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2011.
- [56] 李福艳, 刘晓玉, 颜静婷, 等. 三株产吡啶乙酸根际促生芽孢杆菌的筛选鉴定及其促生作用[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(5): 873-884.
- [57] 崔晓, 徐艳霞, 刘俊杰, 等. 芽孢杆菌在农业生产中的应用[J]. 土壤与作物, 2019, 8(1): 32-42.
- [58] Gerhartz, W. (1990) *Enzymes in Industry: Production and Applications*. Wiley, Hoboken.
- [59] Baker, K.F. (1987) Evolving Concepts of Biological Control of Plant Pathogens. *Annual Review of Phytopathology*, 25, 67-85. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009030>
- [60] 孙冰冰, 李伟, 魏军, 等. 生防芽孢杆菌的研究进展[J]. 天津农业科学, 2015, 21(12): 102-107.
- [61] Jiao, J., Sun, L., Zhou, B., et al. (2014) Hydrogen Peroxide Production and Mitochondrial Dysfunction Contribute to the Fusaric Acid-Induced Programmed Cell Death in Tobacco Cells. *Journal of Plant Physiology*, 171, 1197-1203. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.03.015>
- [62] Samadi, L. and Shahsavan Behboodi, B. (2006) Fusaric Acid Induces Apoptosis in Saffron Root-Tip Cells: Roles of Caspase-Like Activity, Cytochrome c, and H₂O₂. *Planta*, 225, 223-234. <https://doi.org/10.1007/s00425-006-0345-6>

-
- [63] Dong, X., Xiong, Y., Ling, N., *et al.* (2014) Fusaric Acid Accelerates the Senescence of Leaf in Banana When Infected by *Fusarium*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, **30**, 1399-1408. <https://doi.org/10.1007/s11274-013-1564-1>
- [64] Stipanovic, R.D., Puckhaber, L.S., Liu, J., *et al.* (2011) Phytotoxicity of Fusaric Acid and Analogs to Cotton. *Toxicon*, **57**, 176-178. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2010.10.006>
- [65] 向亚萍, 周华飞, 刘永锋, 等. 解淀粉芽孢杆菌 B1619 脂肽类抗生素的分离鉴定及其对番茄枯萎病菌的抑制作用[J]. 中国农业科学, 2016, 49(15): 2935-2944.