

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240530005

拮抗微生物对樱桃采后病害生物防治的研究进展

李嘉慧¹, 刘茂林¹, 李梓诺¹, 孙万萌¹, 于梦言¹, 王 璐¹, 梁 彬^{1*}, 孙婵婵²

(1. 鲁东大学食品工程学院, 烟台 264025; 2. 烟台大学生命科学学院, 烟台 264005)

摘 要: 樱桃口感甘美且富含多种营养物质, 备受消费者喜爱, 但樱桃采后贮藏能力弱, 容易受到病原菌的侵染, 从而影响其商业和营养价值。传统的物理和化学防治方法虽在一定程度上能缓解这一问题, 但其副作用和潜在风险不容忽视。以拮抗微生物为代表的生物防治作为一种环保、绿色的新型防治方法, 正逐渐受到关注。本文综述了近年来拮抗微生物对樱桃采后病害生物防治的研究进展, 主要包括樱桃采后常见侵染性病害及其症状表现、拮抗微生物的筛选途径、作用机制、生防效果及增效途径等方面。同时, 本文也指出了拮抗微生物在实际应用中存在的局限性和挑战, 并对未来的研究趋势作了展望, 以期对樱桃采后病害生物防治领域带来创新和突破, 为樱桃产业的可持续发展提供有力支持。

关键词: 拮抗微生物; 樱桃; 生物防治; 采后病害; 病原菌

Progress of research on biological control of cherry postharvest diseases by antagonistic microorganisms

LI Jia-Hui¹, LIU Mao-Lin¹, LI Zi-Nuo¹, SUN Wan-Meng¹, YU Meng-Yan¹,
WANG Lu¹, LIANG Bin^{1*}, SUN Chan-Chan²

(1. College of Food Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China;

2. College of Life Sciences, Yantai University, Yantai 264005, China)

ABSTRACT: Cherries are very popular among consumers because of their sweet taste and richness in many nutrients. However, cherries are weak in storage capacity after picking and are susceptible to infestation by pathogenic bacteria, thus affecting their commercial and nutritional value. Although traditional physical and chemical control methods can alleviate this problem to a certain extent, their side effects and potential risks cannot be ignored. Biological control represented by antagonistic microorganisms, as an environmentally friendly and green new control method, is gradually receiving attention. This paper summarized the research progress of biological control of cherry postharvest diseases by antagonistic microorganisms in recent years, which mainly included common postharvest infestation diseases of cherry and their symptomatic manifestations, screening pathway, mechanism of action, biocontrol effect and synergistic pathway of antagonistic microorganisms, and so on. At the same time, this paper also pointed out the limitations and challenges of antagonistic microorganisms in practical application, and made an outlook on the future research trends, to bring innovations and breakthroughs in the field of biological control of

基金项目: 国家自然科学基金项目(32101904、32302057)、山东省自然科学基金项目(ZR2019BC036、ZR2020QC219)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (32101904, 32302057), and the Natural Science Foundation of Shandong Province of China (ZR2019BC036, ZR2020QC219)

***通信作者:** 梁彬, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品微生物与果蔬保鲜。E-mail: liangbin1989311@163.com

***Corresponding author:** LIANG Bin, Ph.D, Lecturer, College of Food Engineering, Ludong University, No.186, Hongqi Middle Road, Zhifu District, Yantai 264025, China. E-mail: liangbin1989311@163.com

postharvest disease of cherry and provide strong support for the sustainable development of the cherry industry.

KEY WORDS: antagonistic microorganisms; cherry; biological control; postharvest diseases; pathogenic bacteria

0 引 言

樱桃口感甘美诱人, 富含花青素、多酚等营养物质^[1], 可以对抗氧化应激、减少炎症、调节血糖、增强认知功能、预防心血管疾病, 深受消费者喜爱^[2]。2023/24 季我国樱桃种植面积约为 18.5 万公顷, 较 2022/23 季增加近 3%。西北和西南地区樱桃种植面积继续扩张, 山东、辽宁等东部传统产区的种植面积保持稳定。全国樱桃年产量已超过 76 万 t, 这一数据表明我国樱桃产业正在稳步发展。随着果农投入更多资金并着力改进生产, 樱桃的品质也在不断提升。但在樱桃的采摘、运输及贮藏过程中, 由于容易受到病原菌的侵染, 樱桃面临着极高的腐烂风险。尽管物理因素如水分损失、温湿度波动以及机械损伤等^[3-7], 化学因素如碳水化合物含量、乙烯水平以及多酚氧化酶活性等^[8-11], 都会对樱桃的品质和保鲜期产生影响, 但最为关键的是这些因素为病原菌的侵染提供了便利条件。病原菌能够利用樱桃在采摘、运输和贮藏过程中的微小损伤, 迅速侵入并大量繁殖, 从而引发樱桃的腐烂。这种侵染过程不仅加剧了樱桃的腐烂速度, 更对樱桃的食用安全和市场价值构成了严重威胁^[12]。

目前, 樱桃采后病害的防治主要包括物理、化学和生物 3 种方式^[13]。物理防治容易产生冷害, 不仅增加了处理成本, 还使得操作过程费时费力^[14]。化学防治一直是控制樱桃采后腐烂的主要方式之一。然而, 过度依赖传统化学杀菌剂已经逐渐暴露出诸多弊端, 如杀菌剂残留问题日益

严重、对环境的潜在污染风险上升, 以及病原菌对杀菌剂的耐药性增强等一系列问题^[15]。相较之下, 生物防治展现出了独特的优势。这种防治方法具有特异性强、防治效果好、对人畜无害且不污染环境、病原菌不易产生抗药性等优点^[16]。使用微生物拮抗剂进行生物防治已经显现出替代合成化学杀菌剂防治植物病原菌的潜力, 利用拮抗微生物对果蔬采后病害的生物防治已成为当下的研究热点。

本文主要综述近几年拮抗微生物对樱桃采后病害生物防治的研究进展, 包括樱桃采后的侵染性病害、拮抗微生物的筛选途径、作用机制、防治效果和增效途径等方面, 阐明了拮抗微生物在樱桃实际应用等方面存在的挑战并展望了未来的研究趋势, 以期对樱桃采后病害防治领域提供新的研究策略。

1 樱桃采后常见侵染性病害及其症状表现

樱桃采后侵染性病害的种类日趋繁多, 涵盖了数十种不同的类型, 如灰葡萄孢霉、核果链核盘菌、链格孢菌、樱桃球腔菌、丁香假单胞菌等, 表 1 中列举了常见的樱桃采后侵染性病害及其病原菌。从感染部位来看, 樱桃的果实、叶片和枝干都是病害易发的部位。果实是樱桃的经济价值所在, 也是病原菌的重要侵害对象。常见的果实病害有灰霉病、褐腐病、炭疽病、黑斑果腐病等^[17-20]。其中, 樱桃褐腐病病原菌的菌落形态如图 1 所示。这些病害会在果实表面造成明显的病斑、凹陷和腐烂, 不仅让果实看起来不美观, 还会大大降低其作为商品的吸引力, 从而影响其

表 1 樱桃采后主要侵染性病害及其症状表现

Table 1 Main postharvest invasive diseases of cherry and its symptoms

病害	病原菌	症状	参考文献
灰霉病	灰葡萄孢霉	幼果初期呈暗褐色, 表面被棉絮状白毛覆盖, 成熟后果实表面凹陷, 淡褐色病斑	[17]
褐腐病	核果链核盘菌	果实初期出现褐色病斑, 病斑逐渐扩大并凹陷, 果肉软腐	[18]
炭疽病	盘长孢菌属	幼果病斑呈暗褐色, 果实萎缩硬化, 发育停止; 成熟果病斑凹陷, 呈茶褐色	[19]
黑斑果腐病	链格孢菌	樱桃上伴有轮纹晕圈, 病患处组织硬化, 后期果面凹陷, 最终造成果实干缩、脱落	[20]
细菌性穿孔病	黄单孢菌属	樱桃叶片初现病斑, 随后逐渐扩大, 并伴有菌脓溢出, 病斑脱落后, 叶片形成穿孔	[21]
褐斑穿孔病	樱桃球腔菌	樱桃叶片初期呈现紫色小斑点, 后扩大融合成圆形褐色病斑, 边缘红褐至紫红。病斑扩大并相连, 导致叶片枯死穿孔, 提早脱落	[22]
细菌性溃疡病	丁香假单胞菌	树干和树枝上出现巨大的黑色伤口, 排出大量粘稠的汁液。树叶也呈现弹孔状	[23]
根癌病	根癌土壤杆菌	发病初期, 根颈或枝条形成灰白色瘤状物, 后变深褐色且粗糙, 瘤体流胶破坏韧皮部, 树势及根系发育不良	[24]



图 1 樱桃褐腐病原菌菌落形态
Fig.1 Colony morphology of cherry brown rot pathogen

市场价值。叶片是樱桃树进行光合作用的主要部位,它也是病害容易侵入的薄弱部位。细菌性穿孔病、褐斑穿孔病等叶片病害会在叶片上引发斑点、穿孔甚至枯死等现象,严重影响了叶片的光合作用效率,进而对樱桃树的生长和产量造成不利影响^[21-22]。此外,枝干作为樱桃树的支撑结构,在维持树体形态和稳定性方面发挥着关键作用。但同时它也是病害传播的主要途径,易受到如细菌性溃疡病、根癌病等病害的侵袭。这些病害会导致枝干出现肿胀、开裂和坏死等症状,极大地限制了树木的生长能力,进而影响了樱桃的产量^[23-24]。特别是细菌性溃疡病,它会使枝干流出胶状物质,不仅影响了樱桃树的美观度,还可能进一步恶化树体的健康状况。而根癌病则会在樱桃树的根部形成肿瘤状突起,严重损害了根系的正常功能,对樱桃树的生长和产量构成严重威胁。樱桃的侵染性病害种类繁多且复杂,不同部位所展现的病害呈现多样化。深入了解这些病害的症状及其发生规律,对于及时采取有效的防治措施、保障樱桃的产量和品质至关重要。

2 拮抗微生物的筛选途径

樱桃采后病害可以利用多种来源的拮抗微生物进行生物防治。目前,研究人员已经筛选出多种对樱桃采后病害具有显著抑制作用的菌株。这些拮抗菌株主要分为酵母

菌和芽孢杆菌两大类,并在筛选过程中得到了深入研究,详见表 2。

2.1 拮抗酵母菌的筛选

樱桃采后病害拮抗酵母菌的来源主要集中在水果果实表面。从苹果果实表面分离出的茁芽丝孢酵母、罗伦隐球酵母和粘红酵母,经田间实验验证后表明,罗伦隐球酵母在樱桃果实表面具有最强的存活能力和显著的拮抗作用。在 0℃条件下贮藏 30 d 后,喷洒过罗伦隐球酵母的果实腐烂率仅为 1.3%~3.3%^[25]。此外,从其他水果表面也分离出了拮抗酵母菌。例如,葡萄表面的子囊孢子酵母 *Monilinia fructicola*^[26]和桃子表面的柠檬形克勒克酵母 *Kloeckera apiculata*^[27],均对樱桃采后病害有良好的防治效果^[28]。不同水果表面的自然微生物群落可以作为筛选拮抗酵母菌的重要来源,提供了多样的选择和应用潜力。然而,由于果实表面微生物组成和动态变化的复杂性,需要进行更系统的研究来确定最佳的筛选和应用条件。

2.2 拮抗芽孢杆菌的筛选

针对樱桃病害的拮抗芽孢杆菌来源相对广泛,涉及樱桃果实、樱桃的主干树皮、枝条、叶片以及外源环境。接近病原菌的材料往往含有丰富的拮抗微生物资源,从樱桃的主干树皮、一年生枝条和叶片中筛选出的芽孢杆菌属对樱桃流胶病具有显著的抑制作用,相对抑菌率达到了 50%及以上,这表明细菌与樱桃的共生关系在病害防治中起到了关键作用^[29]。从樱桃果实上筛选得到的 Q-84 菌株经鉴定为贝莱斯芽孢杆菌,对匍枝根霉具有明显抑制效果^[30]。张立新等^[31]在樱桃果实中也筛选得到了拮抗细菌 TY-6,经 16S rRNA 序列鉴定为特基拉芽孢杆菌,对樱桃采后灰霉病的防治具有良好的作用,为樱桃采后病害生物防治提供了参考依据。此外,从外源环境中筛选到的细菌同样具有良好的防治效果,土壤作为微生物的重要来源,蕴含了丰富的拮抗微生物资源。从土壤中分离出的枯草芽孢杆菌 Y17B,能够有效抑制交替孢霉病原菌的生长,对樱桃果腐病具有

表 2 防治樱桃果实采后病害主要的拮抗微生物
Table 2 Main antagonistic microorganisms against postharvest diseases of cherry fruit

拮抗微生物		来源	病害或病原微生物	参考文献
酵母菌	茁芽丝孢酵母	苹果果实	链格孢菌	[25]
	罗伦隐球酵母			
	粘红酵母			
	子囊孢子酵母	葡萄表面	灰霉菌	[26]
	柠檬形克勒克酵母	桃子表面	灰霉菌、扩展青霉	[27-28]
酵母菌	芽孢杆菌	樱桃的主干树皮、一年生枝条、叶片	流胶病	[29]
	贝莱斯芽孢杆菌	樱桃果实	匍枝根霉	[30]
	特基拉芽孢杆菌	樱桃果实	灰霉病	[31]
	枯草芽孢杆菌	土壤	交替孢霉	[32]

生物防治潜力^[32]。樱桃表面的潜在病原菌与有益微生物之间存在显著的相关性,微生物菌群和病原菌共同影响果实的腐烂^[33]。综上,研究者们通过筛选不同来源的酵母菌和芽孢杆菌,已经成功发现多种具有生防潜力的菌株,在樱桃采后病害的防控中展现出巨大的应用前景,也为其他果蔬拮抗微生物的筛选途径提供了参考。

3 生物防治效果及增效途径

3.1 单一拮抗微生物对樱桃采后病害的防治效果

在樱桃采后病害的生物防治研究中,利用拮抗微生物来抑制病原菌的生长和繁殖已经成为一种有效的手段。通过筛选和鉴定具有显著抑菌效果的菌株,为樱桃采后病害的防控提供了新的思路。RUNGJINDAMAI 等^[34]从樱桃上分离出 *Bacillus subtilis*-B91 和 *Aureobasidium pullulans*-Y126,研究表明相对于接种病原菌 *Monilinia laxa* 前施用拮抗菌,接种后再施用拮抗菌的效果更显著,*Aureobasidium pullulans*-Y126 和 *Bacillus subtilis*-B91 的采后病害发生率分别降低了 62%和 80%^[35]。生物防治微生物在农田存活率低,限制了其在商业、农业和园艺中的广泛应用。了解田间生物防治微生物的生存动态可以更有效地把握其应用时机,在后续做相关研究时可以检测拮抗剂的不同施用时间对拮抗效果的影响。WANG 等^[36]采用双培养法在樱桃体内筛选了一株具有良好抗真菌活性的内生细菌 ZL3,在温度 31.96 °C, pH 6.74, 葡萄糖 25.96 g/L 的条件下,对葡萄菌菌丝生长的最大抑制率达到了 97.23%,为樱桃病害的生物防治提供了新的菌种资源。从甜樱桃果实上筛选得到的内生拮抗菌 Q-84 对樱桃菌枝根霉的体外抑制率高达 87.12%,体内防治效果也达到 79.00%,对菌枝根霉导致的甜樱桃软腐病有显著抑制效果^[31]。有研究人员从樱桃体内筛选出拮抗细菌 TY-6,对于樱桃黑霉病菌的离体和活体抑菌率分别高达 89.08%和 79.18%^[32]。综上,樱桃的内源拮抗微生物对樱桃采后病害的防治效果显著,但菌种资源较为有限,且大多停留在实验室研究阶段,实际生产应用效果还需进一步实验,在进行后续相关研究时,可以考虑田间实验,以测试微生物拮抗剂在实际生物防治中持续时间和防治效果的稳定性。

此外,从樱桃根际土壤分离筛选得到的生防菌 YTL-7 和 YTQ-3 对樱桃的采后病害也具有有良好的防治效果,其中菌株 YTL-7 对樱桃的核果链核盘菌和烟草疫霉的抑制率分别达到 52.50%和 60.81%,菌株 YTQ-3 对樱桃的核果链核盘菌和烟草疫霉的抑制率也分别达到 53.22%和 52.70%,这两种菌株对根癌农杆菌也具有显著的抑菌效果^[37],进一步拓宽了生物防治在樱桃病害管理中的应用范围。果实实验表明,当贝莱斯芽孢杆菌的菌悬液浓度为 10^9 CFU/mL 时,“美晚”甜樱桃的软腐病发病率仅为(21±1.2)%,而当浓

度为 10^6 CFU/mL 时,拮抗效果不明显^[38]。在营养竞争环境中,随着拮抗菌浓度的降低,其相对于病原菌逐渐失去优势地位,抑菌效果随之减弱。朱杰等^[39]从枸杞根际土壤中分离获得了一株萎缩芽孢杆菌,经研究发现,其发酵液对樱桃叶斑病原菌产生了明显的抑制作用,在樱桃叶片上接种第 6 d 时对杨柳刺盘孢菌、细极链格孢菌和链格孢菌的抑制率分别达到了 6.47%、36.06%和 47.08%。该发酵液能够导致病原菌的菌丝细胞产生异常变化,包括节间缩短、弯曲和膨大,并且抑制了分生孢子的萌发。推测萎缩芽孢杆菌是通过产生次级代谢产物来实现对樱桃叶斑病原菌的抑制作用,在培养基和樱桃离体叶片上均表现出良好的拮抗效果,显示出潜在的生物防治潜力。虽然上述拮抗微生物对樱桃采后病害的防治表现出一定效果,但鉴于樱桃目前大多是冷链运输,不能确保这些微生物在低温条件下仍能发挥良好的抑菌效果,研究人员也可以选择从低温环境中筛选拮抗微生物,来测试其对樱桃病原菌的抑制作用。

3.2 拮抗微生物和其他方法联用对樱桃采后病害的防治效果

单独使用拮抗微生物来防治樱桃采后腐烂的效果通常不如使用化学杀菌剂。因此,在发现新的高效拮抗菌株的同时,研究人员也在不断寻找加强现有拮抗微生物防治效果的方法^[40]。拮抗微生物结合物理方法已被证明能够提高对樱桃病原菌控制的有效性,研究发现用 60 °C 的热水在樱桃果实上喷淋 20 s 后,再结合罗伦隐球酵母菌可以显著降低扩展青霉在樱桃果实上引起的伤口腐烂,同时也不会对樱桃的外观和食用品质造成影响^[41]。气调包装与拮抗酵母 *Metschnikowia pulcherrima* L672、*Pichia kudriavzevii* PK18 联合使用可以增加对微生物腐败的控制,其结果与使用咯菌腈相当^[42]。另外有研究表明,将从无花果中分离得到的两种拮抗酵母(HO-L479 和 MP-L672)与两种微孔膜(M10 和 M50)相结合,在 1 °C 的条件下冷藏,可以有效控制樱桃伤口处的扩展青霉,降低其发病率和严重程度^[43]。

与某些天然抗菌物质结合也可提高拮抗微生物对于樱桃采后病害的防治效率。水杨酸(salicylic acid, SA)作为植物体内的重要激素,在诱导植物抗病应答中发挥着关键作用^[44]。在甜樱桃果实上施用 SA 溶液,能够显著提升拮抗微生物在果实伤口部位的存活率并促进其生长,可以增强拮抗微生物在果实伤口上的存活和生长,也在一定程度上提高了拮抗微生物对病原菌的防治效果^[45]。 10^7 CFU/mL 的内源拮抗菌贝莱斯芽孢杆菌与 2%碳酸氢钠、2%氯化钙结合后能够增强拮抗菌的生物防治效果,降低樱桃采后软腐病的发病率^[37]。拮抗微生物与化学试剂联合使用对于防治樱桃果实采后病害也具有很大的潜力。从苹果果实表面分离出膜醌毕赤酵母和罗伦隐球酵母,在 20 °C 和 0 °C 空

气中分别添加浓度为 5 mmol/L 的钼酸铵和 2% 的碳酸氢钠, 可提高膜醌毕赤酵母和罗伦隐球酵母对甜樱桃果实褐腐病的生防活性^[46]。从新鲜葡萄果实中分离出来的普鲁兰芽孢杆菌, 已经成功地被应用于控制许多蔬菜和水果的采后病原菌, 如甜樱桃上的灰霉菌和核果褐腐病菌, 将这两种拮抗微生物分别与氯化钙和碳酸氢钠结合, 在樱桃采摘后进行实验, 能够显著降低樱桃果实腐烂率^[47]。

4 拮抗微生物的作用机制

了解拮抗微生物的作用机制可以帮助我们更好地利用拮抗微生物来预防和治疗植物的某些疾病, 同时对于樱桃采后病害的防治也具有重要意义^[48]。目前已知拮抗微生物的作用机制包括空间和营养的竞争, 诱导防御酶活性增强, 产生抑菌性物质等, 如图 2 所示。

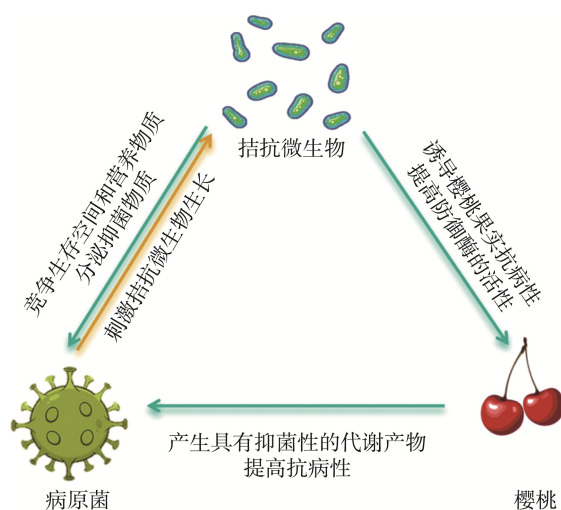


图2 拮抗微生物防治樱桃果实采后病害的作用机制

Fig.2 Mechanism of antagonistic microorganisms against postharvest diseases of cherry fruit

4.1 空间和营养的竞争

空间和营养的竞争是大多数拮抗微生物与病原菌之间最主要的作用机制。拮抗微生物可以在果实伤口处与病原菌竞争生存空间和营养物质^[49], 从而抑制病原菌的生长和繁殖, 起到抑菌作用。在生物防治过程中, 拮抗微生物通过大量繁殖, 消耗环境中的养分, 尤其是病原菌生长所需的碳源和氮源。这种竞争性的养分消耗导致病原菌的供应减少, 对病原菌的生长产生了抑制作用, 进而有效地限制了病原菌的繁殖能力^[50]。研究指出, 拮抗微生物贝莱斯芽孢杆菌在甜樱桃受伤部位的迅速繁殖能够有效地消耗营养物质, 与潜在的病原菌展开激烈的空间和营养资源竞争。与此同时, 贝莱斯芽孢杆菌还具有在病原菌菌丝体上紧密附着的能力, 从而表现出良好的抑菌效果^[51]。普鲁兰

芽孢杆菌是一种天然存在于水果和其他植物表面的生物防治剂。已有研究证明, 普鲁兰芽孢杆菌的主要拮抗特性来自于养分和空间的竞争^[52]。CASTORIA 等^[53]通过添加富含营养的酵母葡萄糖肉汤, 为微生物体系提供了必要的外源营养, 降低了普鲁兰芽孢杆菌对灰孢杆菌和芽孢杆菌的拮抗作用, 这一发现揭示了营养竞争在生物防治机制中的关键作用。

4.2 诱导防御酶活性增强

拮抗微生物的应用可显著提高抗氧化酶的活性, 进而有效地减轻宿主因病原菌感染所产生的活性氧(reactive oxygen species, ROS)造成的氧化损伤^[54]。有研究结果表明接种荚膜芽孢杆菌会对甜樱桃果实中的过氧化物酶(peroxidase, POD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)、谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase, GPX)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)以及多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)等抗氧化酶的活性产生积极影响^[55]。这些酶在果实防御体系中扮演着关键角色, 它们活性的增强有助于果实更好地应对病原菌的侵害, 保持其品质、延长保鲜期。王友升等^[56]发现拮抗酵母菌 *Cryptococcus laurentii*、病原菌 *Monilinia fructicola* 与甜樱桃在接种伤口处相互作用, 结果表明在接种初期病原菌 *Monilinia fructicola* 可以刺激拮抗酵母菌生长, 后期则会抑制拮抗菌并诱导樱桃果实抗性, 提高 SOD、CAT 和 POD 3 种防御酶的活性, 从而抑制甜樱桃果实褐腐病病害的发生。

4.3 产生抑菌性物质

拮抗微生物所释放的挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)具备显著的生物活性, 能有效抑制特定微生物种群的生长^[57]。这些化合物不仅易于降解, 且能在较远距离内发挥其生物效应^[58], 从而展现出相较于传统杀菌剂的显著优势。TORAL 等^[59]发现病原菌 *Monilinia laxa* 对 *Bacillus atrophaeus* L193 和 *Bacillus velezensis* XT1 所产生的 VOCs 表现出显著敏感性。相较于对照组, 这两种拮抗微生物释放的 VOCs 能够有效地将疾病发病率降低 50%以上。值得一提的是, 菌株 *Pseudomonas vulpis* Z8 的效果更为显著, 它完全抑制了果实分枝杆菌的生长。此外, *Pseudomonas vulpis* Z8 和 *Bacillus velezensis* XT1 还分别将灰绿杆菌的发病率显著降低了 48%和 62%。已有研究表明, 细菌 VOCs 可影响真菌菌丝生长、产孢和孢子萌发^[60-61]。在测定 *Bacillus atrophaeus* L193、*Bacillus velezensis* XT1 和 *Pseudomonas vulpis* Z8 所释放的 VOCs 时, 研究人员观察到所有病原菌在果实表面的孢子数量均保持较低水平, 且这些孢子主要局限于果实表面的创口区域^[45], 这一发现表明拮抗微生物释放的 VOCs 确实可以影响病原菌菌丝的产孢和孢子萌发。SANTRA 等^[62]的研究表

明内生真菌 *Diaporthe* sp. CEL3 的樟脑气味挥发物具有抗真菌作用,对真菌感染的樱桃果腐病有 90%的抑制作用。VOCs 具备独特的生物活性,能够分解有害真菌最外层的解剖屏障,如细胞壁和细胞膜。这些化合物一旦释放,会迅速聚集并紧密黏附在真菌的菌丝细胞壁上^[63]。随着 VOCs 的作用逐渐显现,真菌细胞壁开始发生分解,导致细胞膜的渗透性显著增强。这种渗透性的增加使得细胞内的重要大分子物质,如核酸和蛋白质,发生泄漏。这种泄漏进一步导致病原体生化机制的关闭,从而有效地抑制了真菌的生长和繁殖^[64]。

拮抗微生物在应对病原菌侵袭时往往采取多种机制的协同作用,这种综合应对策略能够在不同层面上发挥作用,从而更有效地抑制病原菌的生长和繁殖。研究表明贝莱斯芽孢杆菌 KT 不仅可以通过空间和营养的竞争作用以及分泌抑菌物质对病原菌起抑制作用,同时还可以间接诱导甜樱桃果实抗性来抵御病原菌的侵害^[65]。而蜡质芽孢杆菌 AR156 可能是通过直接破坏甜樱桃青霉菌的生存能力,间接诱导果实抗病,从而有效防治甜樱桃采后病害^[66]。

5 结束语

随着全球对食品安全和环境保护的日益关注,人们意识到化学防治方法对环境和人类健康的潜在危害,因此,化学杀菌剂的使用正在逐渐减少,生物防治方法在农业和食品工业中的应用越来越受到重视^[67]。作为化学杀菌剂的潜在替代品,拮抗微生物在过去的几十年中得到了广泛的研究,在拮抗微生物的鉴定和应用等方面取得了实质性的发展。拮抗微生物作为一种具有巨大潜力的生物防治手段,对于樱桃采后病害的防治具有重要意义。当前已经从樱桃及其他果蔬中成功筛选出多种具有良好拮抗效果的拮抗微生物,其作用机制主要包括空间和营养的竞争作用、诱导樱桃果实抗性、分泌抑菌物质等。特别值得注意的是,酵母类拮抗微生物被证实能够产生特定的裂解酶(如葡聚糖酶、几丁质酶及蛋白酶),这些酶类能够精准作用于真菌细胞壁的关键位点,导致细胞裂解并最终促使病原菌死亡^[68-69]。 ϵ -聚赖氨酸作为拮抗菌的代谢产物,可以破坏樱桃果实采后病原菌橘青霉和链格孢菌的细胞膜,使细胞内容物渗出,从而抑制病原菌的生长^[70]。此外,在分子层面的深入探索中,以枯草芽孢杆菌 Y2 菌株对香梨“库尔勒”果实花青病生物防治的研究为例,该研究表明拮抗微生物能够调控类黄酮生物合成相关基因的表达模式,这种调控作用显著增强了果实对病原菌的抗性,在分子水平上揭示了其独特的拮抗机制^[71]。但拮抗微生物的抑菌广谱性相对较差,抑菌效果与化学杀菌剂相比也存在一定差距。同时,拮抗微生物在樱桃病害防治中的应用受到其作用机制和效果研究不足的限制。

目前,对于这些拮抗微生物如何与病原菌相互作用以及它们在田间条件下的实际效果等方面,探索还不够深入,这限制了将拮抗微生物开发成生物制剂进行商业化应用的可能性^[59]。

虽然拮抗微生物的应用受到诸多因素的限制,但其仍有很大的改进和发展潜力。由于对化学杀菌剂的监管日趋严格,以及消费者对其接纳程度的降低,可以预见化学杀菌剂的使用将逐渐减少甚至停止。市场上可用产品的减少以及对安全有效抗真菌产品的迫切需求,为拮抗微生物产品的开发提供了新的机遇。为了进一步提升拮抗微生物的生物防治效果,可以采取多重策略^[72]。例如,将拮抗微生物与物理或化学处理相结合,从而更有效地对抗目标微生物。随着微生物组学和生态学研究的深入,我们也有望发现更多具有拮抗作用的微生物种类,并揭示其在樱桃采后生态系统中的功能。此外,通过结合拮抗微生物与其他生物防治手段,如植物提取物和抗氧化剂等天然抗菌物质,可以进一步优化防治策略。这种联合应用不仅有望增强防治效果,还能显著减少对传统化学农药的依赖^[73]。在当前生物制剂研发领域中,一些有益的拮抗真菌挥发性有机化合物也可用作生物防治剂和生物熏蒸剂来对抗采后水果中的微生物病原菌^[74]。有研究人员将拮抗真菌挥发性有机化合物与可食用薄膜进行结合,结果表明可以显著延长其保留时间,为水果的长期储存和运输中的微生物稳定性提供了保障^[75]。同时,控释型生物熏蒸剂的开发也为该领域带来了新的机遇,通过精确控制拮抗真菌挥发性有机化合物在基质中的释放速率,可以确保其在整个储存周期内都能保持作为有效生物防治剂所需的浓度,从而为樱桃等采后水果提供更加可靠和高效的保鲜方案^[76]。利用现代技术深入研究拮抗微生物的多样性及其生态功能,拓展其应用领域,有望为樱桃采后病害防治领域带来更多的创新和突破。

参考文献

- [1] CHOCKCHASAWASDEE S, GOLDING JB, VUONG QV, *et al.* Sweet cherry: Composition, postharvest preservation, processing and trends for its future use [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2016, 55: 72–83.
- [2] BLANDO F, OOMAH BD. Sweet and sour cherries: Origin, distribution, nutritional composition and health benefits [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2019, 86: 517–529.
- [3] ZHU DS, LIANG JY, LIU H, *et al.* Sweet cherry softening accompanied with moisture migration and loss during low-temperature storage [J]. *J Sci Food Agric*, 2018, 98(10): 3651–3658.
- [4] YAMAN O, BAYINDIRH L. Effects of an edible coating and cold storage on shelf-life and quality of cherries [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2002, 35(2): 146–150.
- [5] WANI AA, SINGH P, GUL K, *et al.* Sweet cherry (*Prunus avium*): Critical factors affecting the composition and shelf life [J]. *Food Packag Shelf*, 2014, 1(1): 86–99.

- [6] ROMANO GS, CITTADINI ED. Sweet cherry quality in the horticultural production chain [J]. *Stewart Postharvest Rev*, 2006, 6(2): 1–9.
- [7] ALIQUE R, ZAMORANO JP, MARTINEZ MA, *et al.* Effect of heat and cold treatments on respiratory metabolism and shelf-life of sweet cherry, type picota cv “Ambrunes” [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2005, 35(2): 153–165.
- [8] PETRACEK PD, JOLES DW, SHIRAZI A, *et al.* Modified atmosphere packaging of sweet cherry (*Prunus avium* L. cv. ‘Sams’) fruit: Metabolic responses to oxygen, carbon dioxide, and temperature [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2002, 24(3): 259–270.
- [9] HARTMANN C. Biochemical changes in harvested cherries [J]. *Postharvest Biol Technol*, 1992, 1(3): 231–240.
- [10] 方莹, 李雨念, 王梅志, 等. 樱桃果实酶促褐变及其影响因素的研究[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2017, 36(4): 60–63.
FANG Y, LI YN, WANG MZ, *et al.* Study on the enzymatic browning in cherry [J]. *J S Cent Minzu Univ (Nat Sci Ed)*, 2017, 36(4): 60–63.
- [11] 郝义, 王岩, 纪淑娟, 等. 保鲜剂对甜樱桃果实贮藏性的影响研究[J]. 食品科技, 2007, 32(12): 192–194.
HAO Y, WANG Y, JI SJ, *et al.* The effects of antistaling agent on the storage of sweet cherry [J]. *Food Sci Technol*, 2007, 32(12): 192–194.
- [12] 杨艳芬. 大樱桃采后生理与贮藏保鲜技术研究进展[J]. 北方园艺, 2009, 11: 122–124.
YANG YF. Research advances in postharvest physiology and storage technology of cherry [J]. *North Hortic*, 2009, 11: 122–124.
- [13] 孙小渊, 胡文忠, 刘程惠, 等. 甜樱桃采后病害、贮藏期间品质变化及其防腐保鲜技术[J]. 食品工业科技, 2019, 40(5): 338–342.
SUN XY, HU WZ, LIU CH, *et al.* Postharvest disease of sweet cherry, quality change during storage and its antisepesis and preservation technology [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(5): 338–342.
- [14] MALIK J, MOOSA A, ZULFIQAR F, *et al.* Biocontrol potential of lipopeptides produced by the novel *Bacillus altitudinis* strain TM22A against postharvest alternaria rot of tomato [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2023, 191: 115541.
- [15] 赵悦菡, 侯召华, 纪海鹏, 等. 樱桃生理变化及保鲜机理研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(23): 197–203.
ZHAO YH, HOU ZH, JI HP, *et al.* Advances in research on physiological changes and fresh-keeping mechanism of cherries [J]. *Food Res Dev*, 2021, 42(23): 197–203.
- [16] SHARMA RR, SINGH D, SINGH R, *et al.* Biological control of postharvest diseases of fruits and vegetables by microbial antagonists: A review [J]. *Biol Control*, 2009, 50(3): 205–221.
- [17] 王静. 大樱桃栽培中常见病害及其防治技术[J]. 河北农机, 2023(17): 127–129.
WANG J. Common diseases in cherry cultivation and their control techniques [J]. *Hebei Agric Mach*, 2023(17): 127–129.
- [18] 张斌, 耿坤, 蒋平, 等. 贵阳地区樱桃常见主要病害及其为害现状[J]. 中国植保导刊, 2015, 35(11): 25–28.
ZHANG B, GENG K, JIANG P, *et al.* Common main diseases of cherry in Guiyang area and their current status of infestation [J]. *China Plant Protect*, 2015, 35(11): 25–28.
- [19] 张立恒. 甜樱桃常见病害及防治措施[J]. 北方果树, 2023(4): 35–37.
ZHANG LH. Common disease and prevention measures of sweet cherry [J]. *North Fruits*, 2023(4): 35–37.
- [20] 刘志恒, 赵远征, 李俞涛, 等. 大樱桃黑斑果腐病菌生物学特性研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2013, 44(2): 148–152.
LIU ZH, ZHAO YZ, LI YT, *et al.* Biological characteristics of black fruit rot caused by *Alternaria alternata* on cherry [J]. *J Shenyang Agric Univ*, 2013, 44(2): 148–152.
- [21] 夏国芳. 甜樱桃生产中常见叶部病害及其防治措施[J]. 农村实用技术, 2023(7): 98–99.
XIA GF. Common foliar diseases in sweet cherry production and their control measures [J]. *Appl Technol Rural Areas*, 2023(7): 98–99.
- [22] 刘红霞, 潘凤荣, 金柏年. 大连地区大樱桃采收后主要病虫害及防治技术要点[J]. 果树资源学报, 2020, 1(1): 45–47.
LIU HX, PAN FR, JIN BN. Control techniques of main diseases and insect pests of cherry after harvest in Dalian area [J]. *J Fruit Resour*, 2020, 1(1): 45–47.
- [23] RABIEY M, ROY SR, HOLTAPPELSD, *et al.* Phage biocontrol to combat *Pseudomonas syringae* pathogens causing disease in cherry [J]. *Microb Biotechnol*, 2020, 13(5): 1428–1445.
- [24] 于凯, 林倩, 卢传兵, 等. 甜樱桃主要病害种类、分布及防治对策[J]. 落叶果树, 2022, 54(1): 53–56.
YU K, LIN Q, LU CB, *et al.* Main disease types, distribution and control measures of sweet cherry [J]. *Deciduous Fruit*, 2022, 54(1): 53–56.
- [25] TIAN SP, QIN GZ, XU Y. Survival of antagonistic yeasts under field conditions and their biocontrol ability against postharvest diseases of sweet cherry [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2004, 33(3): 327–331.
- [26] KURTZMAN CP, DROBY S. *Metschnikowia fructicola*, a new ascospore yeast with potential for biocontrol of postharvest fruit rots [J]. *System Appl Microbiol*, 2001, 24(3): 395–399.
- [27] KARABULUT OA, BAYKAL N. Biological control of postharvest diseases of peaches and nectarines by yeasts [J]. *J Phytopathol*, 2003, 151(3): 130–134.
- [28] KARABULUT OA, ARSLAN U, ILHAN K, *et al.* Integrated control of postharvest diseases of sweet cherry with yeast antagonists and sodium bicarbonate applications within a hydrocooler [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2005, 37(2): 135–141.
- [29] 郭建伟, 高玲玲, 杨丽芬, 等. 樱桃流胶病拮抗内生细菌的筛选与初步鉴定[J]. 江苏农业科学, 2015(9): 172–174.
GUO JW, GAO LL, YANG LF, *et al.* Screening and primarily identification of endophytic bacteria antagonistic to cherry gummosis [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2015(9): 172–174.
- [30] 张倩. 甜樱桃采后致腐微生物鉴定及其生防菌筛选和作用机制研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
ZHANG Q. Identification and biocontrol mechanism research of postharvest spoilage microorganisms in sweet cherry [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2020.
- [31] 张立新, 张晓宇, 高振峰, 等. 内生细菌 TY-6 对樱桃采后灰霉病菌的抑菌效果和定殖特性研究[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(1): 60–65.
ZHANG LX, ZHANG XY, GAO ZF, *et al.* Antifungal activity of endophytic bacteria TY-6 against *Botrytis cinerea* and its colonization characteristics in postharvest cherry [J]. *Storage Process*, 2020, 20(1): 60–65.
- [32] AHMAD T, XING FG, NIE CR, *et al.* Biocontrol potential of lipopeptides produced by the novel *Bacillus subtilis* strain Y17B against postharvest alternaria fruit rot of cherry [J]. *Front Microbiol*, 2023, 14: 1150217.

- [33] ZHANG Q, SHI WC, ZHOU B, *et al.* Variable characteristics of microbial communities on the surface of sweet cherries under different storage conditions [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2021, 173: 111408.
- [34] RUNGJINDAMAI N, XU XM, JEFFRIES P, *et al.* Identification and characterisation of new microbial antagonists for biocontrol of *Monilinia laxa*, the causal agent of brown rot on stone fruit [J]. *Agronomy*, 2013, 3(4): 685–703.
- [35] SOPHIA B, MICHAEL S, XU XM, *et al.* Field application of *Bacillus subtilis* and *Aureobasidium pullulans* to reduce *Monilinia laxa* post-harvest rot on cherry [J]. *Eur J Plant Pathol*, 2022, 163(3): 761–766.
- [36] WANG CW, WANG Y, WANG L, *et al.* Biocontrol potential of volatile organic compounds from *Pseudomonas chlororaphis* ZL3 against postharvest gray mold caused by *Botrytis cinerea* on Chinese cherry [J]. *Biol Control*, 2021, 159: 104613.
- [37] 李昕. 三种樱桃病害生防菌分离筛选与鉴定研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2022.
- LI X. Isolation, screening and identification of biocontrol bacterium to 3 diseases of cherry [D]. Yantai: Yantai University, 2022.
- [38] 陈雨诗. 贝莱斯芽孢杆菌的抑菌特性以及对甜樱桃果实采后软腐病的生防效果[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- CHEN YS. The bacteriostasis of *Bacillus velezensis* and its effect on postharvest soft of sweet cherry [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2020.
- [39] 朱杰, 程亮, 张纲, 等. 樱桃叶斑病生防菌株萎蔫芽孢杆菌菌株 QH-588 的筛选鉴定[J]. 南方农业学报, 2021, 52(11): 3022–3033.
- ZHU J, CHENG L, ZHANG G, *et al.* Screening and identification of *Bacillus atrophaeus* QH-588 for biological control of cherry leaf spot [J]. *J South Agric*, 2021, 52(11): 3022–3033.
- [40] BOSCH Y, BRITT E, PERREN S, *et al.* Dynamics of the apple fruit microbiome after harvest and implications for fruit quality [J]. *Microorganisms*, 2021, 9(2): 272.
- [41] 静玮. 采后热水喷淋处理及与拮抗菌结合在甜樱桃贮藏保鲜上的应用[D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
- JING W. Studies on postharvest hot water rinsing and brushing treatment and combination with yeast antagonist on preservation of sweet cherry fruits [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008.
- [42] CABANAS CM, HERNANDEZ A, SERRADILLA MJ, *et al.* Improvement of shelf-life of cherry (*Prunus avium* L.) by combined application of modified-atmosphere packaging and antagonistic yeast for long-distance export [J]. *J Sci Food Agric*, 2023, 103(9): 4592–4602.
- [43] DE PAIVA E, SERRADILLA MJ, RUIZ-MOYANO S, *et al.* Combined effect of antagonistic yeast and modified atmosphere to control *Penicillium expansum* infection in sweet cherries cv. ambrunes [J]. *Int J Food Microbiol*, 2017, 241: 276–282.
- [44] ROMANAZZI G, SANZANI SM, BI Y, *et al.* Induced resistance to control postharvest decay of fruit and vegetables [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2016, 122: 82–94.
- [45] QIN GZ, TIAN SP, XU Y, *et al.* Enhancement of biocontrol efficacy of antagonistic yeasts by salicylic acid in sweet cherry fruit [J]. *Physiol Molecul Plant Pathol*, 2003, 62(3): 147–154.
- [46] QIN GZ, TIAN SP, XU Y, *et al.* Combination of antagonistic yeasts with two food additives for control of brown rot caused by *Monilinia fructicola* on sweet cherry fruit [J]. *J Appl Microbiol*, 2006, 100(3): 508–515.
- [47] IPPOLITO A, SCHENA L, PENTIMONE I, *et al.* Control of postharvest rots of sweet cherries by pre-and postharvest applications of *Aureobasidium pullulans* in combination with calcium chloride or sodium bicarbonate [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2005, 36(3): 245–252.
- [48] STANEVICIENE R, LUKSA J, STRAZDAITE-ZIELIENE Z, *et al.* Mycobiota in the carposphere of sour and sweet cherries and antagonistic features of potential biocontrol yeasts [J]. *Microorganisms*, 2021, 9(7): 1423.
- [49] 雷兴梦, 易兰花, 邓丽莉, 等. 拮抗微生物对枣果实采后病害生物防治的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(2): 287–292.
- LEI XM, YI LH, DENG LL, *et al.* Advances in biological control of postharvest diseases of jujube by antagonistic microorganisms [J]. *Food Ferment Ind*, 2022, 48(2): 287–292.
- [50] 周银迪. 生防菌 Ag8 对樱桃根癌病的防效及相关基因生物学功能研究[D]. 天津: 天津农学院, 2021.
- ZHOU YD. Study on the control effect of biocontrol bacteria Ag8 on cherry crown gall and the biological function of related genes [D]. Tianjin: Tianjin Agricultural University, 2021.
- [51] 郝良卿, 吴澎, 李睿, 等. 贝莱斯芽孢杆菌对甜樱桃软腐病生防效果的研究[J]. 中国果菜, 2022, 42(1): 59–68.
- XI LQ, WU P, LI R, *et al.* Biocontrol effect of *Bacillus velezensis* soft rot of sweet cherry [J]. *China Fruit Veget*, 2022, 42(1): 59–68.
- [52] SCHENA L, NIGRO F, PENTIMONE I, *et al.* Control of postharvest rots of sweet cherries and table grapes with endophytic isolates of *Aureobasidium pullulans* [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2003, 30(3): 209–220.
- [53] CASTORIA R, DE CURTIS F, LIMA G, *et al.* *Aureobasidium pullulans* (LS-30) an antagonist of postharvest pathogens of fruits: Study on its modes of action [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2001, 22(1): 7–17.
- [54] ZHANG XK, LI BQ, ZHANG ZQ, *et al.* Antagonistic yeasts: A promising alternative to chemical fungicides for controlling postharvest decay of fruit [J]. *J Fungi*, 2020, 6(3): 158.
- [55] CHAN ZL, TIAN SP. Induction of H₂O₂-metabolizing enzymes and total protein synthesis by antagonistic yeast and salicylic acid in harvested sweet cherry fruit [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2006, 39(3): 314–320.
- [56] 王友升, 田世平. 罗伦隐球酵母、褐腐病菌与甜樱桃果实不同温度下的互作效应[J]. 中国农业科学, 2007(12): 2811–2820.
- WANG YS, TIAN SP. Interaction between *Cryptococcus laurentii*, *Monilinia fructicola* and sweet cherry fruit at different temperatures [J]. *Sci Agric Sin*, 2007(12): 2811–2820.
- [57] CHAVES-LOPEZ C, SERIO A, GIANOTTI A, *et al.* Diversity of food-borne *Bacillus* volatile compounds and influence on fungal growth [J]. *J Appl Microbiol*, 2015, 119(2): 487–499.
- [58] GAO ZF, ZHANG BJ, LIU HP, *et al.* Identification of endophytic *Bacillus velezensis* ZSY-1 strain and antifungal activity of its volatile compounds against *Alternaria solani* and *Botrytis* [J]. *Biol Control*, 2017, 105: 27–39.
- [59] TORAL L, RODRIGUEZ M, MARTINEZ-CHECA F, *et al.* Identification of volatile organic compounds in extremophilic bacteria and their effective use in biocontrol of postharvest fungal phytopathogens [J]. *Front Microbiol*, 2021, 12: 773092.
- [60] ASARI S, MATZEN S, PETERSEN MA, *et al.* Multiple effects of *Bacillus amyloliquefaciens* volatile compounds: Plant growth promotion and growth inhibition of phytopathogens [J]. *Fems Microbiol Ecol*, 2016,

- 92(6): fiw070.
- [61] WENKE K, KAI M, PIECHULLA B. Belowground volatiles facilitate interactions between plant roots and soil organisms [J]. *Planta*, 2010, 231: 499–506.
- [62] SANTRA HK, BANERJEE D. Antifungal activity of volatile and non-volatile metabolites of endophytes of *Chloranthus elatior* Sw [J]. *Front Plant Sci*, 2023, 14: 1156323.
- [63] YE XF, CHEN Y, MA SY, *et al.* Biocidal effects of volatile organic compounds produced by the myxobacterium *Corrallococcus* sp. EGB against fungal phytopathogens [J]. *Food Microbiol*, 2020, 91: 103502.
- [64] OONMETTA-AREE J, SUZUKI T, GASALUCK P, *et al.* Antimicrobial properties and action of galangal (*Alpinia galanga* Linn.) on *Staphylococcus aureus* [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2006, 39(10): 1214–1220.
- [65] 张倩, 陈雨诗, 许春艳, 等. 贝莱斯芽孢杆菌防治甜樱桃采后软腐病的效果和机理[J]. *食品科学*, 2023, 44(7): 229–239.
- ZHANG Q, CHEN YS, XU CY, *et al.* Efficacy and action mechanism of *Bacillus velezensis* on controlling postharvest soft rot of sweet cherry fruits [J]. *Food Sci*, 2023, 44(7): 229–239.
- [66] WANG L, JIN P, WANG J, *et al.* *In vitro* inhibition and *in vivo* induction of defense response against *Penicillium expansum* in sweet cherry fruit by postharvest applications of *Bacillus cereus* AR156 [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2015, 101: 15–17.
- [67] DELGADO-ADAMEZ J, FUENTES-PEREZ G, VELARDO-MICHARET B, *et al.* Application of microbial antagonists in combination with sodium bicarbonate to control postharvest diseases of sweet cherries [J]. *Acta Hort*, 2017, (1161): 529–534.
- [68] RODRIGUES PL, SILVA JL, ALFAIA JP, *et al.* Biocontrol potential of yeasts in citrus postharvest by production of β -1,3-glucanase enzyme and killer activity: A review [J]. *Citrus Res Technol*, 2020, 41: 1–18.
- [69] OZTEKIN S, KARBANCIOGLU-GULER F. Bioprospection of *Metschnikowia* sp. isolates as biocontrol agents against postharvest fungal decays on lemons with their potential modes of action [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2021, 181: 111634.
- [70] 王小佳, 于有伟, 张少颖. *ε*-聚赖氨酸对樱桃采后病原菌橘青霉和链格孢菌的抑菌作用研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(4): 1301–1309.
- WANG XJ, YU YW, ZHANG SY. Inhibitory effects of ϵ -polylysine on *Penicillium citrinum* and *Alternaria alternata* inoculated on fresh cherry [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(4): 1301–1309.
- [71] WANG X, XIE S, MU X *et al.* Investigating the resistance responses to *Alternaria brassicicola* in “Korla” fragrant pear fruit induced by a biocontrol strain *Bacillus subtilis* Y2 [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2023, 199: 112293.
- [72] DUKARE AS, PAUL S, NAMBI VE, *et al.* Exploitation of microbial antagonists for the control of postharvest diseases of fruits: A review [J]. *Crit Rev Food Sci*, 2019, 59(9): 1498–1513.
- [73] ORO L, FELIZIANI E, CIANI M, *et al.* Biocontrol of postharvest brown rot of sweet cherries by *Saccharomyces cerevisiae* Disva 599, *Metschnikowia pulcherrima* Disva 267 and *Wickerhamomyces anomalus* Disva 2 strains [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2014, 96: 64–68.
- [74] NAPITUPULU TP. Antagonistic fungal volatiles as potential biocontrol countermeasure for microbial postharvest fruit diseases [J]. *Egypt J Biolo Pest Control*, 2023, 33: 100.
- [75] ZUHAL O, YAVUZ Y, KERSE S. Edible film and coating applications in fruits and vegetables [J]. *Alinteri J Agric Sci*, 2018, 33(2): 221–226.
- [76] OPOKU-DAMOAH Y, ZHANG R, TA HT, *et al.* Therapeutic gas-releasing nanomedicines with controlled release: Advances and perspectives [J]. *Explor*, 2022, 2(5): 20210181.

(责任编辑: 于梦娇 蔡世佳)

作者简介



李嘉慧, 主要研究方向为果蔬保鲜。
E-mail: 19508695613@163.com



梁彬, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品微生物与果蔬保鲜。
E-mail: liangbin1989311@163.com