

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2024.10.009

解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 对 5 种果实采后贮藏品质的影响

卢清琛^{1,2,3}, 张敏^{2,3}, 刘帮迪^{2,3}, 郭淑珍^{2,3}, 张照香^{3,4}, 孙静^{2,3}, 高海娜^{3,5}, 刘贵巧^{1,3*}

(1. 河北工程大学 生命科学与食品工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 农业农村部规划设计研究院, 北京 100125; 3. 农业农村部产地初加工重点实验室, 北京 100121; 4. 滨州市沾化区农业技术推广中心, 山东 滨州 256800; 5. 北京工商大学 北京食品营养与人类健康高精尖创新中心, 北京 100048)

摘要: 为探究解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 (*Bacillus amyloliquefaciens* GSBa-1) 对不同果实的成熟和腐烂抑制作用, 选用冬枣、软枣猕猴桃、芒果、甜瓜和梨作为研究对象, 将果实用 1×10^8 cfu/mL 的解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 菌液浸泡 15 s, 对常温贮藏期间 5 种果实病情指数、硬度、相对电导率、呼吸强度、总酚含量等指标进行测定。结果表明: 解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 可以分别降低冬枣和芒果呼吸强度和乙烯释放量峰值: 25.78%、10.93% 和 11.97%、2.92%, 并将梨呼吸强度和乙烯释放量出现峰值的时间延迟 5 d, 有效维持果实硬度, 延缓可滴定酸降解速率和转色, 降低果实相对电导率; 与未经解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 处理的果实相比, 有效诱导了芒果和冬枣总酚含量的增加, 提高芒果和冬枣 DPPH 自由基清除能力, 在第 4 天, 将芒果和冬枣病情指数降低至 0.2、0, 由于贮藏时间较短, 梨果实并没有出现发病。但该菌株并不能降低甜瓜和软枣猕猴桃的病情指数和相对电导率。结论: 解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 可以延缓冬枣、芒果和梨的成熟衰老, 抑制冬枣和芒果的腐烂, 可以有效对冬枣和芒果进行保鲜, 对甜瓜和软枣猕猴桃保鲜效果不理想。

关键词: 解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1; 生防菌; 拮抗; 保鲜; 贮藏品质

Effect of *Bacillus amyloliquefaciens* GSBa-1 on Postharvest Storage Quality of Five Fruits

LU Qingchen^{1,2,3}, ZHANG Min^{2,3}, LIU Bangdi^{2,3}, GUO Shuzhen^{2,3}, ZHANG Zhaoxiang^{3,4}, SUN Jing^{2,3}, GAO Haina^{3,5}, LIU Guiqiao^{1,3*}

(1. School of Life Sciences and Food Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China; 2. Academy of Agricultural Planning and Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China; 3. Key Laboratory of Agro-products Postharvest Handling, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100121, China; 4. Agricultural Technology Extension Center of Zhanhua, Binzhou 256800, Shandong, China; 5. Beijing Advanced Innovation Center for Food Nutrition and Human Health, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: To investigate the effect of *Bacillus amyloliquefaciens* GSBa-1 on the ripening and rotting of different fruits, jujube, kiwifruit, mango, melon and pear were selected as the research objects. The fruits were soaked in 1×10^8 cfu/mL *B. amyloliquefaciens* GSBa-1 for 15 s, and the disease index, hardness, relative conductivity, respiratory intensity and total phenol content of the five fruits were measured during normal temperature storage. The results showed that *B. amyloliquefaciens* GSBa-1 reduced the respiratory intensity and ethylene release peak of jujube and mango (25.78%, 10.93%, and 11.97%, 2.92%, respectively), and delayed the respiratory intensity and ethylene release peak of pear by 5 days, maintained fruit hardness, delayed the degradation of titratable acids and color transformation, and reduced the relative electrical conductivity of the fruits. Compared with the fruits treated without *B. amyloliquefaciens* GSBa-1, it effectively induced the increase of total phenol content in mango and jujube and improved their scavenging ability against DPPH free radical. The dis-

基金项目: 2022 年度食品科学与工程“双一流”学科建设培育项目(BTBUKF202210); 农业农村部规划设计研究院自主研发项目(QD202115);

农业农村部规划设计研究院科技创新团队建设项目(CXTD-2021-08)

作者简介: 卢清琛(1999—), 女(汉), 硕士研究生, 研究方向: 果蔬加工与保鲜技术。

*通信作者: 刘贵巧(1969—), 女(汉), 教授, 硕士, 研究方向: 微生物资源与利用。

ease index of mango and jujube was to 0.2 and 0, respectively on the 4th day. Due to the short storage time, no disease occurred in pear. However, the strain failed to lower the disease index and relative conductivity of melon and kiwifruit. Conclusion: *B. amyloliquefaciens* GSBa-1 could delay the aging of jujube, mango and pear and inhibit the rotting of jujube and mango, thereby preserving jujube and mango, but its preservation effect is not ideal for melon and kiwifruit.

Key words: *Bacillus amyloliquefaciens* GSBa-1; biocontrol bacterium; antagonistic effect; preservation; storage quality

引文格式:

卢清琛,张敏,刘帮迪,等. 解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 对 5 种果实采后贮藏品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(10):59-68.

LU Qingchen, ZHANG Min, LIU Bangdi, et al. Effect of *Bacillus amyloliquefaciens* GSBa-1 on Postharvest Storage Quality of Five Fruits[J]. Food Research and Development, 2024, 45(10):59-68.

目前,在果蔬采后贮藏领域如何既减少贮运损失,又满足绿色、环保、高质等消费者日益变化需求,已经成为我国农产品贮藏保鲜技术的研发趋势^[1]。拮抗菌保鲜技术是利用拮抗微生物对果蔬病原菌的抑制作用从而达到保鲜效果。拮抗菌具有环境友好性好和耐受性强等独特优点^[2],十分符合我国果蔬贮藏保鲜的发展需求,已经成为果蔬采后保鲜领域的热点生物保鲜技术。现主要应用于果蔬采后保鲜的拮抗菌有细菌、真菌、放线菌。拮抗菌的生物抑菌机制包括营养空间竞争、真菌寄生、抗真菌抗生素、挥发性代谢物的分泌以及诱导宿主抗性^[3]。Wang 等^[4]将伯克霍尔德氏菌 B-1(*Burkholderia contaminans* B-1)应用于草莓果实采后病害预防中,明显延缓了伤口致病孢子的萌发,抑制了菌丝体的生长。但是拮抗菌保鲜作为一种新颖的生物保鲜技术,其研发历史较短,研究理论和技术基础较其他物理化学保鲜方式不充分,因此针对不同果蔬和不同菌种的拮抗保鲜效果需要开展详细的探究。

在果蔬采后病害控制过程中,拮抗菌的生物防治作用具有较好的应用前景。目前,芽孢杆菌被认为是适用于果蔬保鲜的一种拮抗菌。Ying 等^[5]发现从解淀粉芽孢杆菌 PJ(*B. amyloliquefaciens* PJ)培养液中分离出的一种新的抗菌肽对草莓有高抗菌活性,可有效延长草莓贮藏周期,保持贮藏品质。目前,拮抗菌应用于果蔬保鲜的方式主要是通过浸渍和淋水方法施用,郑香香等^[6]指出将杏浸泡在芽孢杆菌 HB-2(*Bacillus amyloliquefaciens*) 发酵液中 3 min,将杏腐烂率降低至 4.0% 以下。但是此类方法在应用中具有一定的技术限制性,清洗、喷洒或者浸泡处理后,果蔬表面湿度激增,在缺乏良好通风条件时,反而容易增加果蔬在贮藏中被微生物侵染的风险^[7]。王潇冉^[8]将洋葱伯克氏菌

B-1(*B. contaminans* B-1)的发酵液采用喷淋和浸泡两种方式对草莓果实进行处理,研究发现在贮藏过程中喷洒菌液不仅没有抑制草莓腐烂现象,反而增加了贮藏损失。因此,探究拮抗菌浸泡清洗方式是否对多种果实具有抑菌保鲜作用,具有较高的实际应用价值。

解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1(*Bacillus amyloliquefaciens* GSBa-1)是从中国传统白酒发酵酒曲分离出的具有高抗氧化活性、高产凝乳酶^[9]和胞外多糖^[10]特性的一株芽孢杆菌,前期试验发现该菌在体外条件下具有抑制霉菌生长的特性,推测其可用于果蔬保鲜,但解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 在果蔬保鲜方面研究鲜见。本研究选用核果类的芒果、冬枣,仁果类的梨,瓜果类的甜瓜和浆果类软枣猕猴桃这 5 类具有代表性的果实,通过浸泡处理研究解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 对这 5 种果实贮藏品质和成熟衰老的影响。探讨解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 在拮抗菌保鲜领域应用的可能性。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

冬枣(沾冬 1 号)[*Ziziphus jujuba* (Girard) Boiss. Zhanhua No.1]: 山东沾化;软枣猕猴桃(丹阳 LD133)[*Actinidia arguta* (Sieb. et Zucc.) Planch. ex Miq. 'DanyangLd133']: 吉林白山;芒果(台农一号)[*Mangifera indica* Linn, Tainung No.1]: 广西百色;甜瓜品种为绿宝石甜瓜(*Cucumis melo*, 'Lv Bao Shi'): 河北沧州;梨品种为长城小蜜梨(*Pyrus bretschneideri*): 北京密云。果实均选用八成熟的果实。所有果实从采收到运输至实验室仅经过 24 h,且全程使用冷链运输。试验果实样品运抵实验室后,静置 12 h 即可开展试验。

解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 由北京工商大学乳品实验室通过前期研究从传统酒曲中筛选得到^[11],菌株使

用前冷冻保存,浸泡处理 12 h 活化备用。

氢氧化钠、酚酞指示剂、浓硫酸(均为分析纯):上海麦克林生化科技有限公司;福林酚试剂:北京索莱宝科技有限公司;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基清除能力试剂盒:南京建成生物工程研究所公司;马铃薯葡萄糖肉汤培养基(potato dextrose broth, PDB):国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

LQ-C5002 电子天平:深圳市飞亚衡器有限公司;TGL-16gR 高速冷冻离心机:上海安亭科学仪器厂;CHROMA METER CR-400 色差计:日本柯尼卡美能达传感公司;GY-3 型水果硬度计:浙江托普仪器有限公司;PAL-BX ACID F5 型数显糖度计:日本 ATAGO 公司;GC7890F 气相色谱仪:上海天美科学仪器有限公司;UV-2100UNICO 紫外分光光度计:上海化科实验器材有限公司;DW-86L388J 低温保存箱:青岛海尔医疗股份有限公司;A11 basic 液氮研磨机:广州 IKA 公司;Nikon D800 相机:日本尼康公司;DNM-9602 型酶标仪:普朗医药仪器有限公司;DDS-11A 型电导仪:上海鹏顺科学仪器有限公司;RE-52 旋转真空蒸发器:中国上海生物化学仪器厂;KQ5200E 超声清洗仪:昆山市超声仪器有限公司。

1.3 样品处理方法

解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 培养液制备:挑取活化后的解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 于装有 PDB 培养基的锥形瓶中,在 30 °C 条件下 150 r/min 摇床培养 24 h,制备成浓度为 1×10^8 cfu/mL 的菌悬液。该菌悬液浓度参考阎然等^[12]的研究结果,并且在前期预试验中发现该浓度能够有效抑制冬枣、柑橘的腐烂。

选取大小均一,表面无机械损伤,无病虫害的果实。每种果实设置两个处理组,以菌液处理为试验组,以清水处理为对照组,具体处理方式如下。

解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 处理组(antagonistic bacteria treatment, ABT):在浸泡前对菌液进行摇匀,冬枣和软枣猕猴桃每 10 个果实用 500 mL 菌液浸泡,芒果和梨每 5 个用 500 mL 菌液浸泡,甜瓜每 2 个用 500 mL 菌液浸泡,将果实在菌液中浸泡 15 s 沥干,保证每个果实上菌的均匀性和量的一致性。将沥干后的果实平铺置于果蔬贮藏箱内,不同水果置于单独的贮藏箱体中,避免相互影响。常温贮藏期间,设定箱体贮藏条件,湿度维持在 $(80.0 \pm 0.5)\%$,贮藏温度维持在 (25 ± 1) °C,贮藏周期和取样点根据不同果实而确定。试验组每组用于试验的果实样品数量为 30 个,每组设 3 个重复,每个重复各 10 个果实。

对照组(CK):将新鲜的冬枣、软枣猕猴桃、芒果、甜瓜和梨用清水浸泡 15 s 后捞出风干后置于果蔬贮

藏箱内,贮藏条件完全同 ABT 组。对照组用于试验的果实样品数量为 30 个,对照组设 3 个重复,每个重复各 10 个果实。

试验期间,每种果实设置 4 个时间点进行取样(如表 1 所示),由于每种果实在常温下的贮藏期有所差异,根据前期试验基础设定冬枣和软枣猕猴桃贮藏期为 6 d,芒果和甜瓜贮藏期为 12 d,梨的贮藏期为 15 d,而后分别对果实后熟品质进行测定。其中,每组果实每次取样 10 枚,共取 3 次样,进行品质测定,结果取平均值。

表 1 果实取样时间点设置
Table 1 Time points for sampling of fruits

果实	贮藏时间/d			
冬枣	0	2	4	6
软枣猕猴桃	0	2	4	6
芒果	0	4	8	12
甜瓜	0	4	8	12
梨	0	5	10	15

1.4 贮藏理化指标测定方法

1.4.1 发病情况和病情指数统计

参照卫赛超等^[13]的方法根据果实病斑面积比规定为 4 个级别:没有病斑为 0 级;病斑面积比小于 $\frac{1}{10}$ 为 1 级,病斑面积比 $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{5}$ 为 2 级,病斑面积比 $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{2}$ 为 3 级;病斑面积比大于 $\frac{1}{2}$ 为 4 级,病情指数(D)计算公式如下。

$$D = \frac{\sum(n \times a)}{N \times A}$$

式中:n 为病级果数;a 为该级代表数值;N 为总果数;A 为最高级代表数值。

1.4.2 果实色泽

参照刘帮迪等^[14]的方法,果实色泽采用色差计分别对果皮和果肉的色泽参数 L*值和 a*值和 b*值进行测定,每组样品选取 10 个果实测定,记录 L*值、a*值和 b*值,取平均值。

1.4.3 硬度

参照刘帮迪等^[14]的方法,果实硬度采用水果硬度计进行测定,选择各果实赤道附近 1 cm 厚度果实切块,测定果肉硬度(N)。

1.4.4 相对电导率

采用周新群等^[15]的方法,称取 3 g 果实,切成 1 mm 厚的薄片,25 mL 试管中定容,摇床 110 r/min 振荡 30 min,此时电导率记为 P_1 ;煮沸 10 min 迅速冷却,加水至原刻度,再测定溶液电导率 P_2 ,去离子水电导率 P_0 。其中,甜瓜果皮称取 3 g。相对电导率(P,%)计算公式如下。

$$P = \frac{P_1 - P_0}{P_2 - P_0} \times 100$$

1.4.5 呼吸强度

采用气相色谱法进行测定^[14],每次取10个果实置于2 L密闭玻璃容器内20 min,收集玻璃容器内的1 mL顶空气体,注入气相色谱仪,该仪器配备氢火焰离子化检测器(flame ionization detector, FID)、甲烷转化炉和填充活性氧化铝(80/100目)的不锈钢填充柱(内径3 mm×2 mm柱长)。注射器、色谱柱和检测器的温度分别设定为60、120、360 °C用于呼吸强度测量,重复3次,结果取平均值,单位为mg/(kg·h)。

1.4.6 乙烯释放量

乙烯释放量同样采用气相色谱法进行测定^[14],仪器配备氢火焰离子化检测器(FID)、甲烷转化炉和填充活性氧化铝(80/100 mesh)的不锈钢填充柱(内径3 mm×2 mm柱长)。注射器、色谱柱和检测器的温度分别设定为60、120、150 °C用于乙烯测量,重复3次,结果取平均值,单位为μg/(kg·h)。

1.4.7 可溶性固形物和可滴定酸含量

使用数显糖度计进行可溶性固形物含量(%) and 可滴定酸含量(%)测定^[16],取新鲜果汁600 μL滴入样品槽,计数测量结果。若未出现示数,可进一步将果汁稀释20/50倍,再进行测定,测定后数值需乘回相应倍数,重复3次[可滴定酸含量折算系数以相应果实酸型计(%),可溶性固形物含量折算系数以可溶性糖计(%)]。

1.4.8 总酚含量和DPPH清除自由基能力测定

参考Feng等^[17]的方法,采用总酚含量和DPPH自由基清除能力试剂盒进行测定。果实的总酚含量和DPPH自由基清除能力均以果实鲜重计算。

1.5 数据处理

采用Microsoft Excel 2019软件对数据进行处理分析,SPSS 22.0软件进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 解淀粉芽孢杆菌GSBa-1处理对5种果实病情指数的影响

减少果蔬贮藏过程中发病率是大部分拮抗菌保鲜的目标。病情指数可以非常直观地反映果实的腐烂程度,即病情指数越大,腐烂越严重。解淀粉芽孢杆菌GSBa-1处理对5种果实病情指数的影响如表2所示。

由表2可知,随着贮藏时间的延长,冬枣、软枣猕猴桃、芒果和甜瓜逐渐开始腐烂,ABT处理的冬枣(4~6 d)、芒果(4 d)的病情指数显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)低于CK,而ABT处理的软枣猕猴桃(4~6 d)和甜瓜(8~12 d)病情指数极显著高于CK($P<0.01$),ABT处理对冬枣和芒果起到保护作用,能有效抑制冬枣芒果

表2 解淀粉芽孢杆菌GSBa-1处理对5种果实病情指数的影响
Table 2 Effect of *Bacillus amyloliquefaciens* GSBa-1 treatment on disease index of five fruits

果实	贮藏时间/d	病情指数/%	
		CK	ABT
冬枣	0	0	0
	2	0	0
	4	0.60±0.06**	0
	6	6.00±0.06*	5.60±0.10
软枣猕猴桃	0	0	0
	2	0	0
	4	7.12±0.01	8.27±0.01**
	6	9.20±0.01	11.20±0.01**
芒果	0	0	0
	4	1.20±0.04**	0.20±0.06
	8	8.00±0.58	7.60±0.06
	12	9.20±0.03	11.80±0.06**
甜瓜	0	0	0
	4	0	0
	8	6.60±0.12	8.60±0.12**
	12	14.40±0.21	18.40±0.23**
梨	0	0	0
	5	0	0
	10	0	0
	15	0	0

注:*表示同一果实相同时间内两处理组间差异显著($P<0.05$);**表示同一果实相同时间内两处理组间差异极显著($P<0.01$)。

表面微生物的生长繁殖,抑制冬枣(0~6 d)和芒果(0~8 d)的发病,但会加快软枣猕猴桃和甜瓜的腐烂进程。梨因其耐贮藏的特性,在15 d的常温贮藏过程中未出现发病情况。

2.2 解淀粉芽孢杆菌GSBa-1处理对5种果实色泽的影响

色泽是判断果实成熟度以及果实品质的重要指标之一^[18], L^* 值表示果实的亮度, a^* 值表示红绿值,由负值到正值表示果皮颜色由绿色到红色或黄色转变, b^* 值表示黄蓝值,由负值到正值表示果皮颜色由蓝色到黄色的转变。解淀粉芽孢杆菌GSBa-1处理对5种果实色泽的影响如表3所示。

由表3可知,ABT处理的冬枣(2~4 d)果皮、软枣猕猴桃(4~6 d)果皮和果肉、芒果(4~8 d)果肉、甜瓜(4 d)果皮和果肉和梨(10~15 d)果皮和果肉的 L^* 值均极显著高于CK($P<0.01$),说明ABT处理有利于维持果实色泽。此外,ABT处理冬枣(6 d)果皮的 a^* 值、芒果(4~8 d)果皮和果肉和梨(10 d)果皮和果肉 b^* 值低于CK。推测ABT处理可能会通过抑制冬枣、芒果和梨中花色苷和类胡萝卜素的合成,来抑制果实转色,进而延缓冬枣、梨和芒果的后熟^[19-20]。

表3 解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 处理对 5 种果实色泽的影响
Table 3 Effect of *Bacillus amyloliquefaciens* GSBa-1 treatment on color of five fruits

处理	贮藏时间/d	果皮			果肉		
		L*值	a*值	b*值	L*值	a*值	b*值
冬枣-CK	0	70.78±0.01	-9.11±0.01	49.89±0.01	85.44±0.01	-7.44±0.01	27.33±0.01
	2	58.01±0.09	-4.44±0.01	48.11±0.01	83.56±0.01**	-4.78±0.10**	11.22±0.01**
	4	47.89±0.05	-3.56±0.01	44.44±0.01	70.44±0.91**	-2.11±0.09	6.33±0.01**
	6	39.00±0.58	6.33±0.31**	25.11±0.03	63.22±0.02	-1.89±0.01	4.67±0.09**
冬枣-ABT	0	70.78±0.01	-9.11±0.01	49.89±0.01	85.44±0.01	-7.44±0.01	27.33±0.01
	2	66.00±0.46**	-3.89±0.05**	48.33±0.01**	83.44±0.01	-5.56±0.16	10.78±0.01
	4	59.11±1.73**	-2.78±0.02**	44.78±0.01**	69.00±0.58	-2.00±0.06**	5.33±0.01
	6	40.22±0.12	3.89±0.02	36.22±0.01**	68.78±0.01**	-1.67±0.01**	4.00±0.06
软枣猕猴桃-CK	0	53.33±0.01	-15.44±0.01	37.44±0.01	69.44±0.01	-16.89±0.01	47.89±0.01
	2	37.22±0.01	-15.22±0.01	35.56±0.01**	56.67±0.01**	-15.33±0.01	45.33±0.01
	4	35.22±0.01	-13.67±0.01	31.11±0.01**	49.44±0.01	-12.11±0.04	43.56±0.01
	6	32.56±0.01	-12.44±0.01	26.89±0.01**	35.33±0.03	-11.00±0.58	34.00±0.24
软枣猕猴桃-ABT	0	53.33±0.01	-15.44±0.01	37.44±0.01	69.44±0.01	-16.89±0.01	47.89±0.01
	2	38.33±0.01**	-15.11±0.01**	29.78±0.01	53.89±0.01	-14.67±0.01**	46.78±0.01**
	4	35.33±0.01**	-12.78±0.01**	26.33±0.01	51.67±0.01**	-11.22±0.01**	45.67±0.01
	6	33.78±0.01**	-11.01±0.58**	25.78±0.01	42.33±0.01**	-9.89±0.01**	40.56±0.01**
芒果-CK	0	37.56±0.01	-18.67±0.01	49.89±0.01	77.44±0.01	-4.78±0.01	24.89±0.01
	4	48.44±0.02**	-15.89±0.01	57.78±0.03**	66.20±0.19	-1.89±0.18**	31.47±0.11**
	8	69.11±0.01**	2.89±0.28**	62.33±0.03**	63.22±0.02	5.00±0.18	67.44±0.02**
	12	66.89±0.05**	8.56±0.03**	65.89±0.03**	60.89±0.91	14.56±0.03**	63.22±0.02
芒果-ABT	0	37.56±0.01	-18.67±0.01	49.89±0.01	77.44±0.01	-4.78±0.01**	24.89±0.02
	4	40.53±0.01	-8.91±0.01**	54.36±0.02	68.89±0.12**	-4.00±0.12	31.00±0.18
	8	63.56±0.01	-1.00±0.18	60.44±0.02	66.89±0.01**	6.22±0.12**	61.11±0.04
	12	67.33±0.03	3.78±0.02	60.22±0.02	65.00±0.58	10.33±0.02	68.56±0.01**
甜瓜-CK	0	32.13±0.02	-4.33±0.02	7.33±0.02	75.81±0.06	-6.87±0.01	30.67±0.01
	4	32.27±0.03	-4.60±0.03	8.06±0.01	66.21±0.02	-7.27±0.02**	31.02±0.03
	8	42.44±0.09	-13.67±0.03	22.44±0.03**	65.22±0.03**	-13.78±0.03	44.78±0.02**
	12	65.22±0.03**	-19.67±0.01	25.11±0.01	60.56±0.01	-15.11±0.10	53.56±0.02**
甜瓜-ABT	0	32.13±0.02	-4.33±0.02	7.33±0.02	75.81±0.03	-6.87±0.01	30.67±0.01
	4	32.73±0.02**	-6.40±0.02**	12.53±0.02**	68.89±0.01**	-7.41±0.01	31.47±0.02**
	8	48.00±0.06**	-8.67±0.02**	17.89±0.02	62.33±0.02	-13.44±0.02**	40.11±0.01
	12	48.78±0.03	-12.89±0.01**	29.11±0.06**	61.33±0.02**	-14.33±0.07**	52.11±0.01
梨-CK	0	33.44±0.06	-6.00±0.56	22.22±0.01	45.67±0.01	-2.00±0.06	7.78±0.01
	5	29.33±0.01**	-5.33±0.01	16.78±0.01**	34.78±0.01	-2.00±0.12	6.18±0.01
	10	34.56±0.01	-2.03±0.12	18.56±0.01**	33.22±0.01	-1.89±0.01	5.44±0.01**
	15	27.67±0.01	-1.78±0.01	17.67±0.01**	31.00±0.56	-1.78±0.01	4.13±0.02
梨-ABT	0	33.44±0.06	-6.00±0.56	22.22±0.01	45.67±0.01	-2.00±0.06	7.78±0.01
	5	28.89±0.01	-3.00±0.12**	16.44±0.01	42.89±0.01**	-2.00±0.06	6.84±0.01**
	10	41.00±0.02**	-2.00±0.06**	14.56±0.01	40.78±0.02**	-2.00±0.06	5.22±0.01
	15	29.56±0.02**	-1.11±0.01**	12.67±0.01	39.22±0.01**	-2.00±0.06	5.00±0.06**

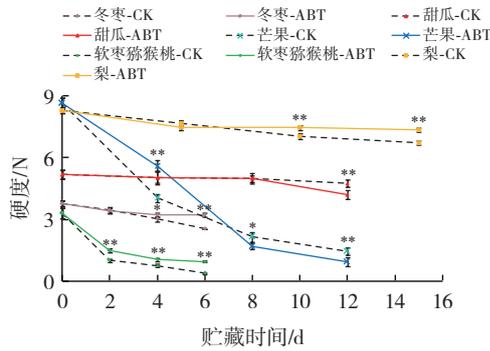
注:*表示同一果实相同时间内两处理组间差异显著($P<0.05$);**表示同一果实相同时间内两处理组间差异极显著($P<0.01$)。

2.3 解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 处理对 5 种果实硬度的影响

果实硬度是判断果实质地,反映果实贮藏性和衡量贮藏效果的主要指标。解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 处理对 5 种果实硬度的影响如图 1 所示。

由图 1 可知,ABT 处理的冬枣(6 d)、软枣猕猴桃

(2~6 d)、芒果(4 d)和梨(10~15 d)的硬度均极显著高于 CK($P<0.01$),其中,软枣猕猴桃在 0~2 d 时硬度下降速率最快,达到 55.14%。在第 12 天,ABT 处理的甜瓜硬度极显著低于 CK 组($P<0.01$),可能是由于对于贮藏后期的甜瓜,由于甜瓜本身快速成熟,抵御能力下降迅速,对拮抗菌不耐受。此时拮抗菌做为外源感染



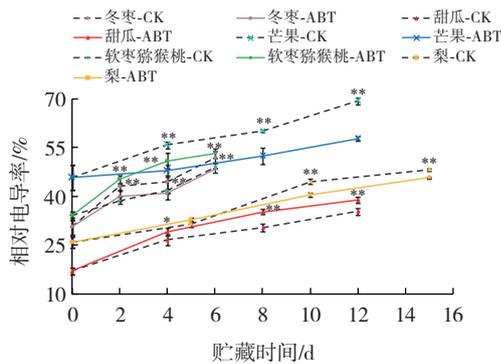
*表示同一果实相同时间内两处理组间差异显著($P < 0.05$); **表示同一果实相同时间内两处理组间差异极显著($P < 0.01$)。

图1 解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 处理对 5 种果实硬度的影响
Fig.1 Effect of *Bacillus amyloliquefaciens* GSBa-1 treatment on hardness of five fruits

菌,加快了甜瓜的腐烂,导致甜瓜硬度的下降^[21]。

2.4 解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 处理对 5 种果实相对电导率的影响

细胞内电解质泄漏是衡量果蔬细胞膜完整性的重要指标之一,通常用相对电导率来表示果蔬细胞膜受损的程度^[22]。解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 处理对 5 种果实相对电导率的影响如图 2 所示。



*表示同一果实相同时间内两处理组间差异显著($P < 0.05$); **表示同一果实相同时间内两处理组间差异极显著($P < 0.01$)。

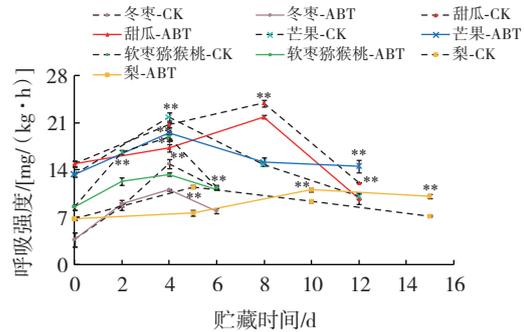
图2 解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 处理对 5 种果实相对电导率的影响
Fig.2 Effect of *Bacillus amyloliquefaciens* GSBa-1 treatment on relative electrical conductivity of five fruits

由图 2 可知,ABT 处理的冬枣(2~6 d)、芒果(4~12 d)和梨(10~15 d)的相对电导率极显著低于 CK($P < 0.01$),说明 ABT 处理可以有效维持冬枣、芒果和梨细胞膜完整性,降低果实膜通透性。然而,在软枣猕猴桃和甜瓜中表现出了相反的变化,ABT 处理的软枣猕猴桃和甜瓜的相对电导率均远高于 CK,说明 ABT 处理促进了软枣猕猴桃和甜瓜细胞膜内电解质的外渗,不利于果蔬保鲜。

2.5 解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 处理对 5 种果实呼吸强度的影响

呼吸强度的变化是果蔬后熟的重要标志之一,呼

吸强度越高,果实代谢速度越快,腐烂速度就越快。解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 处理对 5 种果实呼吸强度的影响如图 3 所示。



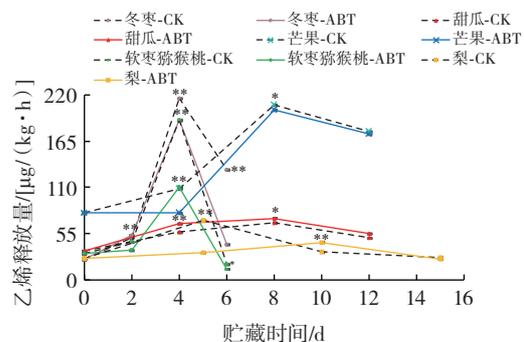
*表示同一果实相同时间内两处理组间差异显著($P < 0.05$); **表示同一果实相同时间内两处理组间差异极显著($P < 0.01$)。

图3 解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 处理对 5 种果实呼吸强度的影响
Fig.3 Effect of *Bacillus amyloliquefaciens* GSBa-1 treatment on respiratory intensity of five fruits

由图 3 可知,ABT 处理可以有效降低冬枣(4~6 d)、软枣猕猴桃(2~4 d)、芒果(4 d)和甜瓜(4~12 d)呼吸强度。与 CK 相比,ABT 处理将冬枣、软枣猕猴桃、芒果和甜瓜的呼吸高峰峰值分别降低了 25.78%、28.93%、10.93% 和 8.34%。此外,ABT 处理将梨呼吸高峰出现时间向后延迟了 5 d。结合表 2 中 ABT 处理的冬枣(4~6 d)和芒果(4~8 d)病情指数低于 CK,说明 ABT 处理可以通过降低冬枣、芒果和梨呼吸强度来抑制果实的发病。

2.6 解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 处理对 5 种果实乙烯释放量的影响

乙烯是一种促进生理活动的调节剂,如果实的成熟和衰老,能够显著影响植物的生长发育,尤其对果蔬的成熟衰老过程起重要作用,它可以提高果蔬呼吸强度,导致果蔬品质下降。解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 处理对 5 种果实乙烯释放量的影响如图 4 所示。



*表示同一果实相同时间内两处理组间差异显著($P < 0.05$); **表示同一果实相同时间内两处理组间差异极显著($P < 0.01$)。

图4 解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 处理对 5 种果实乙烯释放量的影响
Fig.4 Effect of *Bacillus amyloliquefaciens* GSBa-1 treatment on ethylene release of five fruits

由图4可知,ABT处理极显著抑制了冬枣(4~6 d)、软枣猕猴桃(2~4 d)和芒果(4 d)的乙烯释放($P<0.01$),以及ABT处理将梨果实乙烯释放量高峰出现时间延迟至第10天。此外,ABT处理在第4天极显著提高了甜瓜的乙烯释放量($P<0.01$),在第8天显著提高了甜瓜的乙烯释放量($P<0.05$)。结果表明,ABT处理可以降低冬枣、软枣猕猴桃、芒果和梨的乙烯释放量,延缓这4种果实的后熟进程。

表4 解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 处理对 5 种果实可溶性固形物含量、可滴定酸含量、总酚含量和 DPPH 自由基清除能力的影响

Table 4 Effect of *Bacillus amyloliquefaciens* GSBa-1 treatment on soluble solids, titratable acids, total phenol and DPPH free radical scavenging ability

果实	贮藏时间/d	可溶性固形物含量/%		可滴定酸含量/%		总酚含量/($\mu\text{g/g}$)		DPPH 自由基清除能力/(mg Trolox/kg)	
		CK	ABT	CK	ABT	CK	ABT	CK	ABT
冬枣	0	18.50±0.01	18.50±0.01	1.61±0.01	1.61±0.01	600.02±0.01	600.02±0.01	12 111.81±70.15	12 111.81±70.15
	2	23.50±0.01	30.50±0.03**	1.53±0.01	1.55±0.01	590.02±0.13	597.23±0.08**	11 250.12±88.32	11 650.43±39.27**
	4	16.50±0.02	26.50±0.03**	1.49±0.02	1.51±0.01	587.34±0.05	593.23±0.03**	9 062.49±58.72	10 504.95±40.04**
	6	13.50±0.01	21.50±0.03**	1.37±0.06	1.46±0.01	580.26±0.07	588.34±0.04**	6 532.87±71.59	9 964.03±91.85**
软枣猕猴桃	0	5.50±0.01	5.50±0.01	2.11±0.15	2.11±0.02	3.00±0.06	3.00±0.06	23.45±0.11	23.45±0.11
	2	8.50±0.02	16.00±0.01**	2.01±0.02	2.03±0.03	3.21±0.01	3.31±0.01**	24.86±0.18	25.45±0.11*
	4	14.00±0.03**	12.50±0.02	1.86±0.01	1.92±0.02*	3.35±0.02	3.41±0.01	25.29±0.08	25.97±0.01*
芒果	0	11.50±0.02	11.50±0.01	1.35±0.01	1.55±0.02**	3.49±0.02	3.48±0.01	30.69±0.11**	28.62±0.07
	4	9.50±0.08	9.50±0.08	1.63±0.01	1.63±0.01	2.98±0.01	2.98±0.01	2.49±0.03	2.49±0.03
	4	13.50±0.03	14.00±0.05*	1.03±0.02	1.13±0.03*	3.02±0.02	3.13±0.01*	2.49±0.01	2.57±0.01**
	8	14.00±0.03	16.50±0.03**	0.71±0.01	0.83±0.02**	2.99±0.01	3.08±0.01*	2.44±0.01**	2.39±0.01
甜瓜	0	16.50±0.03	16.50±0.03	0.59±0.01	0.68±0.02*	2.53±0.03	2.73±0.02*	2.01±0.02	2.33±0.01**
	0	8.50±0.03	8.50±0.03	1.37±0.06	1.37±0.06	240.02±0.01	240.02±0.01	17.73±0.07	17.73±0.07
	4	18.50±0.03**	11.50±0.06	1.15±0.01	1.13±0.01	239.51±0.02**	236.34±0.04	16.27±0.02**	14.92±0.03
	8	33.50±0.07**	16.50±0.03	0.93±0.03	0.84±0.03	239.26±0.03**	228.74±0.04	15.93±0.03**	14.09±0.04
梨	0	18.50±0.03**	13.50±0.03	0.91±0.03	0.83±0.02	239.33±0.02**	220.43±0.04	5.71±0.01**	1.58±0.02
	0	5.50±0.06	5.50±0.06	0.48±0.02	0.48±0.02	2.52±0.02	2.52±0.02	1.89±0.02	1.89±0.02
	5	6.00±0.03	8.50±0.02**	0.31±0.01	0.33±0.01	2.73±0.03*	2.65±0.02	9.39±0.01**	8.29±0.01
	10	15.00±0.01	17.50±0.01**	0.26±0.01	0.31±0.01*	2.83±0.04	2.76±0.02	11.93±0.01**	10.17±0.01
	15	10.50±0.07	11.50±0.03**	0.25±0.02	0.29±0.01	2.93±0.03	2.88±0.02	16.39±0.01**	13.06±0.01

注:*表示同一果实相同时间内两处理组间差异显著($P<0.05$);**表示同一果实相同时间内两处理组间差异极显著($P<0.01$)。

由表4可知,ABT处理加速了冬枣(0~2 d)、软枣猕猴桃(0~2 d)、芒果(0~8 d)和梨(0~15 d)的可溶性固形物的累积并抑制了冬枣(0~6 d)、软枣猕猴桃(0~6 d)、芒果(0~12 d)和梨(0~15 d)的可滴定酸的降解。但ABT处理的甜瓜可溶性固形物累积速率显著低于CK($P<0.05$),可滴定酸含量与CK相比无显著性差异,说明ABT处理加速消耗甜瓜的营养物质,促进了甜瓜的衰老。果蔬中总酚含量的多少常被作为评价其货架期的重要指标,DPPH自由基清除活性及其抗氧化活性会受到酚类化合物的影响。Aryal等^[18]也指出抗氧化活性与总酚类物质间存在很强的相关性。ABT处理可以极显著提高冬枣(2~6 d)总酚含量和DPPH自由基清除能力($P<0.01$)。ABT处理的软枣猕猴桃(2 d)总酚含量极显著高于CK($P<0.01$),其DPPH自由基清

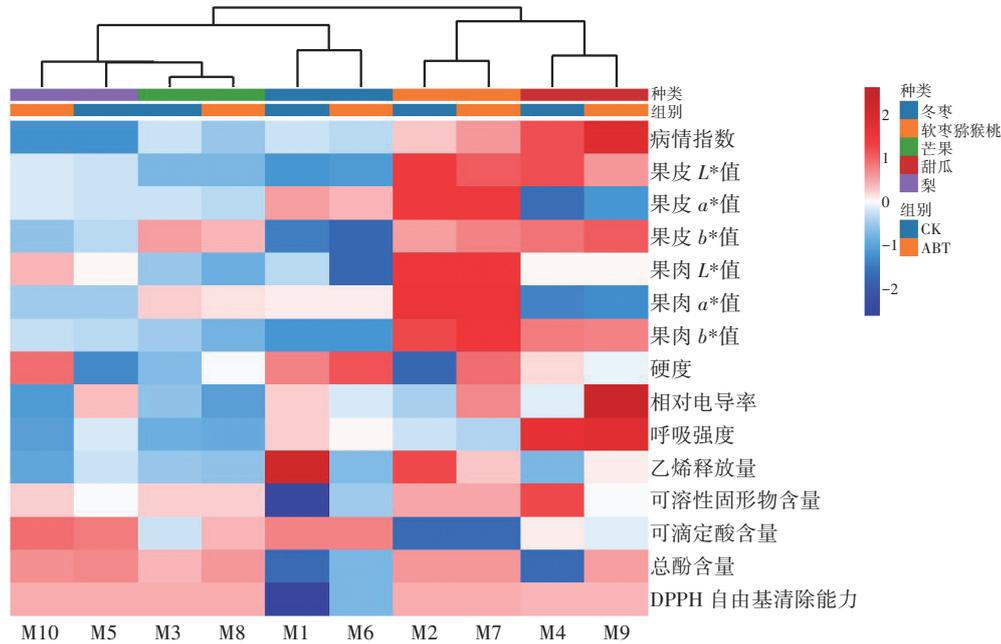
除能力显著高于CK($P<0.05$)。在第4天,ABT处理的芒果总酚含量显著高于CK($P<0.05$),其DPPH自由基清除能力极显著高于CK($P<0.01$),但在甜瓜和梨果实试验当中,ABT处理抑制了贮藏期间甜瓜和梨总酚的合成及DPPH自由基清除能力的提升,加速了甜瓜和梨营养成分的流失,降低了果实的抗氧化活性。

2.7 解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 处理对 5 种果实可溶性固形物、可滴定酸、总酚含量和 DPPH 自由基清除能力的影响

可溶性固形物和可滴定酸可以直接反映果蔬的成熟度,是衡量果实品质的重要指标^[16]。解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 处理对 5 种果实可溶性固形物含量、可滴定酸含量、总酚含量和 DPPH 自由基清除能力的影响如表4所示。

2.8 解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 处理 5 种果实的贮藏品质指标热图分析

通过上述试验表明,5种果实不同处理条件下的生理变化情况表现不一,这也导致果实的耐贮性产生了较大的差异。因此,试验对CK和ABT两种处理方式下的5种果实的生理品质的数据变化情况进行标准化热图分析,旨在观察ABT处理对不同果实的影响,结果如图5所示。



M1. 冬枣-CK; M2. 软枣猕猴桃-CK; M3. 芒果-CK; M4. 甜瓜-CK; M5. 梨-CK; M6. 冬枣-ABT; M7. 软枣猕猴桃-ABT; M8. 芒果-ABT; M9. 甜瓜-ABT; M10. 梨-ABT。

图5 解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 处理 5 种果实的贮藏品质指标热图分析

Fig.5 Heatmap plot of storage quality indexes of five fruits treated with *Bacillus amyloliquefaciens* GSBa-1

由图 5 可知,通过对比样本的生理指标标准化特征值的变化情况,根据 ABT 处理对 5 种果实保鲜产生的不同影响,可将果实分为两类。第一类为 ABT 处理起积极作用的果实,包括冬枣、芒果和梨。对于冬枣,ABT 处理可以通过抑制乙烯释放,降低呼吸强度,降低相对电导率,促进可溶性固形物的累计,提升果实总酚含量和 DPPH 自由基清除能力,来维持果实硬度,抑制果实发病,延缓果实后熟;对于芒果,ABT 处理可抑制乙烯释放量,降低相对电导率,促进可滴定酸含量的增加,提升果实总酚含量,从而维持果实硬度,抑制果实发病;对于梨,ABT 处理可有效维持梨果实的硬度,降低果实相对电导率、呼吸强度和乙烯释放量,抑制果皮转色,进而延缓果实后熟。第二类为 ABT 处理起消极作用的果实,包括软枣猕猴桃和甜瓜。ABT 处理显著提高了软枣猕猴桃的相对电导率,从而增加果实病情指数;对于甜瓜,ABT 处理也提高了甜瓜呼吸强度、乙烯释放量和相对电导率,从而加速了甜瓜的腐烂进程。

3 讨论

3.1 解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 处理对 5 种果实成熟衰老的影响

本试验使用解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 菌液浸泡 5 种呼吸跃变型果实,探究解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 菌液处理对果实成熟衰老的影响。直观的贮藏观察结果和热图分析显示,解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 对冬枣、芒果、软枣猕猴桃和梨的后熟衰老抑制和品质保持具有

较好的效果,但促进了甜瓜的成熟衰老,加剧了贮藏腐烂现象。

呼吸强度和乙烯释放是评价采后果蔬后熟衰老最直观的指标^[16]。ABT 处理后的冬枣(4~6 d)、芒果(4 d)、软枣猕猴桃(2~4 d)的呼吸强度和乙烯释放量均低于 CK 组,ABT 处理将梨呼吸和乙烯释放量峰值出现时间向后延迟 5 d。Janamatti 等^[19]的研究也同样指出 *Pseudomonas putida* BP25 合成的挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs) 2,5-二甲基吡嗪处理可以通过有效抑制果蔬呼吸作用、降低乙烯代谢速率,从而达到延缓芒果成熟衰老的目的。从硬度指标情况也可以看出,在 0~4 d,ABT 处理可以比 CK 更有效地抑制冬枣、软枣猕猴桃、和芒果的软化,ABT 处理组硬度下降速率均小于 CK 组。采后果实软化主要是由于细胞壁降解导致,成熟过程中呼吸作用增强和乙烯释放量的增加会促进细胞壁降解,而采用一些外源处理可以有效减缓果实的细胞壁降解^[14]。可滴定酸是采后果蔬呼吸供能的第一优先级底物,此外采后果蔬有机酸的降解也能够为果蔬合成累积次级代谢产物提供必要的碳结构底物^[20]。在贮藏期间,5 种果实的可滴定酸含量均呈下降趋势。其中,ABT 处理可以有效降低芒果贮藏后期可滴定酸降解。这可能是由于 ABT 处理有效地降低了芒果呼吸作用,从而使果实保持较低的成熟度。冬枣、芒果和梨均会在成熟过程中产生明显的色泽变化, a^* 值代表果实色泽由绿到红的变化。果实成熟过程中伴随着叶绿素的降解和类胡萝卜素及

花色苷等的合成使果实果皮果肉颜色发生变化。ABT处理可以抑制冬枣、芒果和梨的色泽转变,既可能是解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 抑制了这3种果实的成熟进程,也可能是因为解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 抑制了冬枣、芒果和梨表皮类胡萝卜素和花色苷的生物合成^[23]。此外,色素合成和果实的成熟衰老可能存在相互影响的关系。

ABT处理对甜瓜产生了促进成熟和加速腐烂的效果。第12天,ABT处理组甜瓜呼吸强度和乙烯释放量远高于CK组。推测可能是甜瓜表皮富含多糖,解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1,将可溶性固形物等物质作为侵入菌生命活动的碳源^[24],快速增长的解淀粉芽孢杆菌会作为外源侵入菌侵染甜瓜。

综上所述,解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 可以通过降低冬枣、芒果、软枣猕猴桃和梨呼吸强度和乙烯释放,从而维持较高硬度,延缓可滴定酸降解速率和转色情况,进而延缓果实的后熟与衰老。并且,解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 可能还会对冬枣、芒果和梨色素合成累积和细胞壁降解产生一定的抑制作用,但还需要进一步研究来证明该推论。

3.2 解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 对5种果实腐烂发病的影响

通过探究解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 处理对果实腐烂的影响发现,解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 对冬枣和芒果具抑制腐烂果实的效果,但促进软枣猕猴桃和甜瓜果实的腐烂进程,对梨腐烂发病没有明显促进或者抑制作用。

病情指数是综合发病率与腐烂程度的指标,是直观反映果实腐烂情况的重要参数。ABT处理的冬枣(4~6 d)、芒果(4~8 d)病情指数均大幅度低于CK。这可能是因为解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 明显降低了冬枣和芒果的呼吸强度,延缓了其成熟进程,从而保持较高的抗病性。Chen等^[25]研究表明 *Paenibacillus brasiliensis* YS-1 处理可以通过有效抑制新余蜜橘的呼吸作用,从而抑制其发病。果实组织的相对电导率反映了组织细胞膜的完整性与衰老程度,并且在贮藏期间保持较高细胞膜透性也同样有利于果蔬对于外源微生物的抵抗能力^[22]。常温贮藏期间,ABT处理组冬枣(2~6 d)、芒果(4~12 d)的相对电导率明显低于CK。这说明解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 有效抑制了冬枣、芒果离子的渗透率的增加,保护了细胞组织结构不被破坏,从而抑制果实相对电导率上升。总酚作为一种具有较强的抗氧化性、抑菌性、清除活性氧自由基的代表性生物活性物质,可提高DPPH自由基清除能力和抗病性,达到保护果实延长果实货架期^[26]。本研究发现,在第4天,ABT处理可以有效提升冬枣和芒果的总酚含量,并保持更高的DPPH自由基清除能力。说明解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 有效刺激了冬枣、芒果果实的防御系统,诱导总酚含量和DPPH自由基清除能力的提升来提高果实

抗性,进而减少果实的腐烂。

解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 处理加速并加剧了软枣猕猴桃和甜瓜的贮藏腐烂。软枣猕猴桃和甜瓜ABT处理组的相对电导率均高于CK组。这说明解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 不适宜作为甜瓜和软枣猕猴桃贮藏的拮抗菌使用。推测可能由于甜瓜和软枣猕猴桃表皮富含多糖,使解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 在短期内大量繁殖^[24],从而使果实受到逆境胁迫,促进果实表面气孔关闭,使呼吸作用降低,同时刺激植物产生抗性物质^[27]。此外,虽然在第12天,ABT处理的甜瓜、软枣猕猴桃病情指数高于CK组,但是果肉硬度较CK组更高且果肉没有出现明显的软烂现象。这可能说明解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 作为一种外源侵染菌主要作用于这两种果实的果皮。

在梨果实的试验当中,由于成熟度较低,贮藏时间较短,梨果实并没有出现明显发病情况。综上分析解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 处理可有效抑制果实腐烂的机制可能是菌株侵染果实,对芒果和冬枣产生一个逆境胁迫,刺激果实增加如总酚等抗性物质的含量,提高DPPH自由基清除能力,诱导果实抗病性。但该菌株并不一定适用于所有的果蔬,对于甜瓜、西瓜、猕猴桃、蓝莓、枸杞等表皮富含多糖的果实可能不能使用解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 作拮抗保鲜菌株。

4 结论

通过解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 菌液浸泡芒果、冬枣、甜瓜、梨和软枣猕猴桃为代表的5种果实,观测该拮抗菌处理的保鲜效果。结果表明,浓度为 1×10^8 cfu/mL的解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 能够有效对冬枣产生延缓后熟和抑制腐烂的作用,保鲜效果明显;对芒果贮藏前期(0~8 d)具有延缓后熟和抑制腐烂的作用,第12天时ABT处理的芒果发病指数远高于CK,是由于贮藏时间过长,芒果自身抵抗机制下降,拮抗菌浓度过高致使芒果在12 d时不耐受;解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 处理对梨起到良好的抑制后熟作用,但由于梨耐储的特性,未观察到梨的腐烂现象;对于软枣猕猴桃和甜瓜,解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 起到加速果实腐烂的作用。在后续的试验中可以进一步对解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 菌液中发挥主要抑菌作用的有效成分进行探究,为生产应用提供理论基础和技术支撑。

参考文献:

- [1] 李岚欣,孙洁,辛奇,等.乡村振兴背景下我国猕猴桃产业技术高质量发展分析[J].保鲜与加工,2022,22(7):82-90.
LI Lanxin, SUN Jie, XIN Qi, et al. Analysis and review of high-quality development kiwifruit industry technology under rural revitalization in China[J]. Storage and Process, 2022, 22(7): 82-90.
- [2] WANG Z S, SUI Y, LI J S, et al. Biological control of postharvest

- fungal decays in citrus: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(4): 861-870.
- [3] ZHANG X K, LI B Q, ZHANG Z Q, et al. Antagonistic yeasts: A promising alternative to chemical fungicides for controlling postharvest decay of fruit[J]. Journal of Fungi, 2020, 6(3): 158.
- [4] WANG X R, SHI J F, WANG R F. Effect of *Burkholderia contaminans* on postharvest diseases and induced resistance of strawberry fruits[J]. The Plant Pathology Journal, 2018, 34(5): 403-411.
- [5] YING T T, WU P J, GAO L L, et al. Isolation and characterization of a new strain of *Bacillus amyloliquefaciens* and its effect on strawberry preservation[J]. LWT - Food Science and Technology, 2022, 165: 113712.
- [6] 郑香香, 张娜, 阎瑞香, 等. 不同芽孢杆菌处理对杏采后保鲜效果及诱导抗性的影响[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(2): 46-53.
ZHENG Xiangxiang, ZHANG Na, YAN Ruixiang, et al. Effects of different Bacillus treatments on postharvest preservation and induced resistance of apricot[J]. Storage and Process, 2019, 19(2): 46-53.
- [7] ZHAO P, NDAYAMBAJE J P, LIU X, et al. Microbial spoilage of fruits: A review on causes and prevention methods[J]. Food Reviews International, 2022, 38(sup1): 225-246.
- [8] 王潇冉. 洋葱伯克氏菌(*Burkholderia contaminans*)对草莓采后灰霉病的生物防治及机理研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2019.
WANG Xiaoran. Biological control of postharvest gray mold of strawberry by *Burkholderia contaminans* and its mechanism[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2019.
- [9] 赵华, 郑喆, 张曼, 等. 解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 凝乳酶对羊奶干酪成熟特性的影响[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(4): 74-84.
ZHAO Hua, ZHENG Zhe, ZHANG Man, et al. Effect of *Bacillus amyloliquefaciens* GSBa-1 rennet on ripening properties of goat milk cheese[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 40(4): 74-84.
- [10] 赵雯, 腾军伟, 张健, 等. 解淀粉芽孢杆菌 GSBa-1 胞外多糖的发酵制取、流变学特性和应用[J]. 食品科学, 2017, 38(16): 1-9.
ZHAO Wen, TENG Junwei, ZHANG Jian, et al. Production of exopolysaccharide by fermentation with *Bacillus amyloliquefaciens* GSBa-1, its rheological characterization and application[J]. Food Science, 2017, 38(16): 1-9.
- [11] 腾军伟, 赵笑, 杨亚威, 等. 酒曲中产凝乳酶微生物菌株的分离筛选及鉴定[J]. 食品科学, 2017, 38(16): 23-28.
TENG Junwei, ZHAO Xiao, YANG Yawei, et al. Isolation and identification of microbial strains producing rennet from jiuqu, a traditional Chinese fermentation starter[J]. Food Science, 2017, 38(16): 23-28.
- [12] 阎然, 傅茂润, 陈蕾蕾, 等. 解淀粉芽孢杆菌 NCPSJ7 对采后脐橙绿霉病的防治作用及机制[J]. 食品科学, 2021, 42(17): 193-200.
YAN Ran, FU Maorun, CHEN Leilei, et al. Effect and mechanism of *Bacillus amyloliquefaciens* NCPSJ7 against green mold on navel oranges[J]. Food Science, 2021, 42(17): 193-200.
- [13] 卫赛超, 谢晶. 不同包装方式对芒果低温模拟运输贮藏中品质及代谢的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(5): 227-234.
WEI Saichao, XIE Jing. Effects of different packaging methods on the quality and metabolism of mango fruit during simulated low-temperature transportation and storage[J]. Food Science, 2022, 43(5): 227-234.
- [14] 刘帮迪, 张雅丽, 柯泽华, 等. LED 光照对青熟香蕉贮运中后熟调控的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 295-302.
LIU Bangdi, ZHANG Yali, KE Zehua, et al. Effects of LED light on the ripening regulation of green mature banana during storage and transportation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(20): 295-302.
- [15] 周新群, 冯欣欣, 孙洁, 等. 脱水预处理对冷冻紫薯花色苷损失的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(13): 32-41.
ZHOU Xinqun, FENG Xinxin, SUN Jie, et al. Effect of dehydration pretreatment on loss of anthocyanins in frozen purple potato[J]. Food Science, 2023, 44(13): 32-41.
- [16] 舒畅, 刘帮迪, 张万立, 等. 近冰温冷藏对‘金冠’苹果贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(1): 244-251.
SHU Chang, LIU Bangdi, ZHANG Wanli, et al. Improving postharvest quality of apple (*Malus domestica* borkh. cv. golden delicious) fruit by storage at near freezing temperature[J]. Food Science, 2020, 41(1): 244-251.
- [17] FENG X X, SUN J, LIU B D, et al. Effect of gradient concentration pre-osmotic dehydration on keeping air-dried apricot antioxidant activity and bioactive compounds[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(7): e16688.
- [18] ARYAL S, BANIYA M K, DANEKHU K, et al. Total phenolic content, flavonoid content and antioxidant potential of wild vegetables from western Nepal[J]. Plants, 2019, 8(4): 96.
- [19] JANAMATTI A T, KUMAR A, KAUR C, et al. Fumigation by bacterial volatile 2, 5-dimethylpyrazine enhances anthracnose resistance and shelf life of mango[J]. European Journal of Plant Pathology, 2022, 164(2): 209-227.
- [20] LIU B D, XIN Q, ZHANG M, et al. Research progress on mango post-harvest ripening physiology and the regulatory technologies[J]. Foods, 2022, 12(1): 173.
- [21] VIVAS ZÁRATE D H, VÁSQUEZ MINA J V, DUQUE AGUIRRE L, et al. Influence of a biological coating and a wax on postharvest quality of mango (*Mangifera indica* L.) variety 'Keitt'[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2022, 16(5): 4225-4235.
- [22] ZHANG M, LIU W, LI C H, et al. Postharvest hot water dipping and hot water forced convection treatments alleviate chilling injury for zucchini fruit during cold storage[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 249: 219-227.
- [23] KOU X H, HE Y L, LI Y F, et al. Effect of abscisic acid (ABA) and chitosan/nano-silica/sodium alginate composite film on the color development and quality of postharvest Chinese winter jujube (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Dongzao)[J]. Food Chemistry, 2019, 270: 385-394.
- [24] LUCIANO-ROSARIO D, KELLER N P, JURICK W M 2nd. *Penicillium expansum*: Biology, omics, and management tools for a global postharvest pathogen causing blue mould of pome fruit[J]. Molecular Plant Pathology, 2020, 21(11): 1391-1404.
- [25] CHEN C Y, WAN C P, GUO J H, et al. *Paenibacillus brasiliensis* YS-1: A potential biocontrol agent to retard Xinyu tangerine senescence [J]. Agriculture, 2020, 10(8): 330.
- [26] 刘帮迪, 范新光, 舒畅, 等. 长时间近冰点温度贮藏对杏果货架品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(1): 223-230.
LIU Bangdi, FAN Xinguang, SHU Chang, et al. Effect of near freezing temperature storage on the shelf quality of apricots after long time cold storage[J]. Food Science, 2020, 41(1): 223-230.
- [27] CARMONA - HERNANDEZ S, REYES - PÉREZ J, CHIQUITO - CONTRERAS R G, et al. Biocontrol of postharvest fruit fungal diseases by bacterial antagonists: A review[J]. Agronomy, 2019, 9(3): 121.