王静怡, 佐长赓, 牛新湘, 等. 贝莱斯芽孢杆菌处理对厚皮甜瓜保鲜效果及保护酶活性的影响 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(17): 355−362. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110250

WANG Jingyi, ZUO Changgeng, NIU Xinxiang, et al. Effect of *Bacillus velezensis* Treatment on the Preservation Effect of Muskmelon and Protective Enzyme Activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(17): 355−362. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110250

· 贮运保鲜 ·

贝莱斯芽孢杆菌处理对厚皮甜瓜保鲜效果及保护酶活性的影响

王静怡[1,2,3], 佐长赓[1,2], 牛新湘[4,5], 管力慧[1,2], 杨红梅[2,3], 楚　敏[2,3], 王　宁[2,3], 林　青[2,3], 娄　恺[2,3], 史应武[1,2,3,5,*]

(1.新疆大学生命科学与技术学院, 新疆乌鲁木齐 830052;
2.新疆农业科学院微生物应用研究所, 新疆乌鲁木齐 830091;
3.新疆特殊环境微生物实验室, 新疆乌鲁木齐 830091;
4.新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所, 新疆乌鲁木齐 830091;
5.农业农村部西北绿洲农业环境重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830091)

摘　要: 为探究生防菌处理对厚皮甜瓜保鲜效果和保护酶活性的影响，本研究选用西州蜜 25 号厚皮甜瓜作为研究对象，通过在 25 ℃ 和 4 ℃ 条件下在厚皮甜瓜表面接种贝莱斯芽孢杆菌 BG-2，测定贮藏期间拮抗菌在厚皮甜瓜表面定殖特性、保鲜效果和厚皮甜瓜过氧化物酶（Peroxidase，POD）、多酚氧化酶（Polyphenol oxidase，PPO）和苯丙氨酸解氨酶（Phenylalnine ammonialyase，PAL）活性的变化。结果表明，在 25 ℃ 和 4 ℃ 条件下，拮抗菌在厚皮甜瓜表面定殖数量均呈现先上升后下降的趋势且能稳定定殖。接种拮抗菌的厚皮甜瓜腐烂效果、抑制 pH 和可溶性固形物含量的下降显著优于对照组（$P<0.05$）。POD 和 PAL 活性呈现先上升后下降的趋势，PPO 活性在室温下呈现先上升后下降趋势，在低温下呈现缓慢上升趋势。25 ℃ 下，拮抗菌处理组 POD 在第 20 d 时酶活最高，PAL 和 PPO 在第 10 d 时酶活最高；4 ℃ 下，拮抗菌处理组 POD 和 PAL 在第 20 d 时酶活最高。PPO 处理在第 40 d 时酶活最高。且拮抗菌处理过的厚皮甜瓜酶活始终高于病原菌处理组。在 25 ℃ 和 4 ℃ 贝莱斯芽孢杆菌 BG-2 均能在厚皮甜瓜表皮上稳定定殖，抑制贮藏期厚皮甜瓜腐烂，延缓 pH、可溶性固形物、POD、PPO 和 PAL 酶活性下降，且 BG-2 和低温相结合对上述效果更好。本研究为延长新疆厚皮甜瓜贮藏期提供理论依据，为生防菌作用在厚皮甜瓜采后保鲜提供技术支持。

关键词: 贝莱斯芽孢杆菌, 新疆厚皮甜瓜, 贮藏期, 保护酶, 定殖特性, 保鲜效果

中图分类号: S436.5　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2022)17−0355−08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110250

本文网刊:

Effect of *Bacillus velezensis* Treatment on the Preservation Effect of Muskmelon and Protective Enzyme Activity

WANG Jingyi[1,2,3], ZUO Changgeng[1,2], NIU Xinxiang[4,5], GUAN Lihui[1,2], YANG Hongmei[2,3], CHU Min[2,3], WANG Ning[2,3], LIN Qing[2,3], LOU Kai[2,3], SHI Yingwu[1,2,3,5,*]

(1.College of Life Sciences and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830052, China;
2.Institute of Microbiology, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China;
3.Xinjiang Special Environmental Microbiology Laboratory, Urumqi 830091, China;
4.Institute of Soil and Fertilizer and Agricultural Water Conservation, Xinjiang Academy of Agricultural

收稿日期: 2021−11−21

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目（No.31860024）; 国家自然科学基金面上项目（No.41471220）; 新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目（No.2018D01A44）; 国家重点研发计划项目（No.2017YFD0200600）; 新疆农业科学院青年科技骨干创新能力培养项目（xjnkq-2019014）; 自治区科技计划重大专项（2020A01002）; 新疆农业科学院农业科技创新平台能力提升建设专项 (nkypt005)。

作者简介: 王静怡（1996−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: zstarld@163.com。

*** 通信作者:** 史应武（1973−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农业有害生物控制, E-mail: syw1973@126.com。

Sciences, Urumqi 830091, China;
5.Key Laboratory of Northwest Oasis Agricultural Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Urumqi 830091, China)

Abstract: In order to explore the effects of antagonistic bacterium treatment on the preservation effect and protective enzyme activity of muskmelon, this study selected Xizhoumi 25 melon as the research object, and inoculated the melon surface with *Bacillus velezensis* BG-2 at 25 ℃ and 4 ℃. The colonization characteristics, preservation effect, peroxidase (POD), polyphenol oxidase (PPO) and phenylalnine ammonialyase (PAL) of antagonistic bacteria on melon surface during storage were determined. Under the conditions of 25 ℃ and 4 ℃, the number of antagonistic bacteria on melon surface increased firstly and then decreased. The fresh-keeping effect, pH and soluble solid content decreased of muskmelon inoculated with antagonistic bacteria were significantly better than those of control group. POD and PAL activities increased first and then decreased, PPO activity increased first and then decreased at room temperature, and slowly increased at 4 ℃. At 25 ℃, the enzyme activity of POD, PAL and PPO in antagonistic treatment group was the highest on the 20th day, and the highest on the 10th day. Under 4 ℃, POD and PAL activity were the highest on the 20th day. The highest enzyme activity on the 40th day of PPO treatment. The enzyme activity of the antagonistic bacterium treatment was always higher than pathogen treatment. *Bacillus* BG-2 could stably colony on the epidermal of muskmelon at both 25 ℃ and 4 ℃, inhibited the decaed of muskmelon during storage, delayed the decreased of pH, soluble solids content, POD, PPO and PAL enzyme activities, and the combinated of BG-2 and low temperature had better effect on the above. This study provided a theoretical basis for prolonged the storage period of Xinjiang muskmelon and provided technical support for the antagonistic bacterium effect of muskmelon after harvest.

Key words: *Bacillus velezensis*; muskmelon in Xinjiang; storage stages; protective enzymes; colonization characteristics; preservation effect

新疆由于其独特的气候条件, 是重要的瓜果产区。其中, 厚皮甜瓜是新疆主要的特色瓜果之一。厚皮甜瓜为葫芦科(Cuculacere), 黄瓜属(*Cucumis* L.), 一年生草本植物, 对比其他甜瓜, 厚皮甜瓜具有果肉甜度高、口感好、贮藏期长等优点[1]。然而由于其含糖量高, 水分足, 因此在气温高的夏季采摘容易使其受到病原菌的侵染, 缩短其贮藏期, 给生产者带来经济损失[2]。在厚皮甜瓜的贮藏过程中, 自身对病原菌的防御会导致自由基的积累, 自由基的积累会加速其腐败进程[3], 厚皮甜瓜体内的保护酶在清除自由基中发挥了重要作用[4−5]。但在采后贮藏期间, 保护酶的活性会由于外界因素的变化而降低, 因此, 减缓保护酶的活性降低及生防菌在厚皮甜瓜表面稳定定殖对延长厚皮甜瓜贮藏期具有积极意义。

果蔬保鲜的研究多使用物理和化学方式[6], 其中物理保鲜方式主要有低温保鲜、气调保鲜、辐照保鲜、光照处理保鲜、臭氧保鲜和热处理保鲜等, 杜红凤等[7] 通过研究常温、0.5 ℃ 和 3 ℃ 贮藏条件下哈密瓜保护酶 SOD、POD、CAT 活性的变化, 得出 0.5 ℃ 的贮藏条件对哈密瓜保护酶活性下降的抑制作用最为明显; 化学保鲜方式主要是利用植物生长调节剂和化学保鲜剂, 其中, 姚军等[8] 使用 0.5%、1.0% 和 1.5% 浓度的水杨酸对采后哈密瓜进行浸泡处理, 得出不同浓度的水杨酸均可增强 PAL、PPO 和 POD 的活性, 抑制哈密瓜果实腐烂的结论。现今生物保鲜技术以其无污染, 成本低, 效率高等优点成为研究热门[9]。生物保鲜技术主要有微生物拮抗保鲜、天然提取物保鲜和基因工程保鲜, 其中, 微生物拮抗保鲜的主要机理为抑制孢子萌发菌丝生长及诱导植物产生系统抗性[10−11], 刘奎等[12] 探究猕猴桃接种枯草芽孢杆菌 BS-1 对猕猴桃软腐病的抑制效果及保鲜效果, 发现接种 BS-1 可显著降低猕猴桃果实的腐烂率。目前, 对于厚皮甜瓜保鲜效果及采后保护酶活性的变化研究, 化学物理方式仍占据研究的主流[7], 近几年生防菌由于其高效环保的特点逐渐成为研究热点[13], 但把生防菌与温度结合用在厚皮甜瓜贮藏期的研究鲜见报道。

本研究选用西州蜜 25 号厚皮甜瓜, 通过在 4 ℃ 和 25 ℃ 条件下在厚皮甜瓜表面接种贝莱斯芽孢杆菌 BG-2, 测定贮藏期间拮抗菌在厚皮甜瓜表面定殖特性、保鲜效果和厚皮甜瓜 POD、PPO 和 PAL 酶活性的变化趋势, 探究 2 种温度下贝莱斯芽孢杆菌 BG-2 在厚皮甜瓜表面定殖特性、保鲜效果和对厚皮甜瓜贮藏期保护酶活性变化的影响。探讨生物保鲜技术在厚皮甜瓜保鲜领域应用的可能性, 为延长新疆厚皮甜瓜贮藏期的研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

病原菌　来自实验室从腐烂厚皮甜瓜中筛选出的尖孢镰刀菌(*Fusarium oxysporum*)CH-3; 拮抗菌贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*)BG-2 筛选自厚皮甜瓜种植土地; 厚皮甜瓜　选自市场(经新疆农业科学院园艺作物研究所鉴定为西州蜜 25 号), 购买大小相近、重量 3 kg 左右, 成熟度基本一致, 表皮无损伤, 无病害虫害的西州蜜 25 号; 营养琼脂(NA)培养基、营养肉汤(NB)培养基、马铃薯葡萄糖水培养基(PDB)、马铃薯葡萄糖琼脂培养基(PDA)、LB 培养基　青岛高科技工业园海博生物技术有限公司;

NaCl　天津市登峰化学试剂厂；75% 乙醇　天津市广成化学试剂有限公司；过氧化氢酶试剂盒、多酚氧化酶试剂盒、苯丙氨酸解氨酶试剂盒　苏州科铭生物技术有限公司。

UVZ255 型紫外分光光度计　日本岛津自动化设备有限公司；CENTRIFUGE 型高速冷冻离心机 EPPENDORF；GMSX–280 型高压蒸汽灭菌锅　北京市永光明医疗仪器厂；ZWY-2102C 型恒温培养震荡器　上海智城仪器制造有限公司；WY 型手持折射仪　成都豪创光电仪器有限公司；Five Easy Plus 型 pH 计　北京东南仪诚实验室设备有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　拮抗菌处理液的制备　将筛选出的拮抗菌在 NA 板上划线，32 ℃ 培养 24 h，挑取单菌落接种于 500 mL 有 100 mL LB 培养基的锥形瓶中，32 ℃，180 r/min 摇瓶培养 12 h，得到种子液。按 2% 的接种量接种至 500 mL 装有 250 mL NB 培养基的锥形瓶中，32 ℃，180 r/min 摇瓶发酵 3 d，8000 r/min 4 ℃ 离心 5 min，取下层菌体沉淀，用 0.85% 的 NaCl 溶液洗涤 3 次，加入 250 mL 相同浓度 NaCl 溶液重悬菌体得到拮抗菌处理液。

1.2.2　病原菌处理液的制备　在 PDA 平板中心接种一个病原菌菌饼，用 6 mm 打孔器（1×10^5 Pa 灭菌）在长满病原菌的平板上打取 15 个菌饼，接种至含有 100 mL PDB 培养基的 500 mL 锥形瓶中，25 ℃，160 r/min 摇瓶培养 2 d 获得种子液，以 1% 的接种量接种至含有 250 mL 培养基的 500 mL 锥形瓶中，25 ℃，160 r/min 摇瓶发酵 5 d，8000 r/min 4 ℃ 离心 5 min，取下层菌体沉淀，用 0.85% 的 NaCl 溶液洗涤 3 次沉淀，加入 250 mL 相同浓度 NaCl 溶液得到病原菌处理液。

1.2.3　厚皮甜瓜果实损伤后接种处理液　根据汪志浩等[14] 的方法进行改进：将厚皮甜瓜表面用自来水冲洗干净并晾干，用 75% 的乙醇对其进行表面消毒后用无菌水洗 3 遍并晾干，选取厚皮甜瓜一侧 16 cm^2 的瓜面，用无菌针均匀的刺约 2 mm 深的伤口 30 个。

对照（CK）：将消毒处理后的厚皮甜瓜于生理盐水中浸泡 2 min。实验设置 3 个处理，处理 1（T1）：用拮抗菌处理液（1×10^7 CFU/mL）浸泡表面已消毒损伤厚皮甜瓜 2 min；处理 2（T2）：将表面消毒处理后的厚皮甜瓜用无菌棉签蘸取病原菌处理液（1×10^5 CFU/mL）涂抹伤口部位并晾干；处理 3（T3）：将表面消毒处理后的厚皮甜瓜用无菌棉签蘸取病原菌处理液（1×10^5 CFU/mL）涂抹伤口部位，晾干后于拮抗菌处理液中浸泡 2 min。。每种处理选取 360 个厚皮甜瓜，180 个置于 25 ℃，相对湿度 55% 的人工气候箱中，180 个置于温度 4 ℃，相对湿度 85% 的冷库中。常温下每隔 5 d 测定，低温下每隔 10 d 测定，每次测定每种处理选取 9 个瓜。

1.2.4　厚皮甜瓜腐烂率的测定　根据汪志浩等[14] 的方法进行改进，常温下每隔 5 d，低温下每隔 10 d，将病斑半径大于 10 mm 的厚皮甜瓜记为腐烂，记录各组厚皮甜瓜腐烂数量，为方便统计，定义厚皮甜瓜腐烂率计算公式如下：

厚皮甜瓜腐烂率（%）=（腐烂果实数量/果实总数量）×100

1.2.5　厚皮甜瓜酶活测定　将待测厚皮甜瓜切开后称取 5 g 损伤部位果肉，匀浆后吸取 1 mL，采用 POD、PPO、PAL 测试盒进行提取测定，每次测定重复 3 次。

1.2.6　厚皮甜瓜可溶性固形物（TSS）的测定　根据曹建康[15] 的方法进行改进，取伤口部位随机 5 g 厚皮甜瓜果肉于研钵中匀浆，4 层纱布过滤得到汁液，用胶头滴管滴取 3 滴瓜液至手持折射仪检测镜上，读取数值（%），即为厚皮甜瓜可溶性固形物含量。每个处理重复 3 次。

1.2.7　厚皮甜瓜 pH 的测定　根据陈存坤等[16] 的方法进行改进，取伤口部位随机 10 g 厚皮甜瓜果肉于研钵中匀浆，4 层纱布过滤得到汁液，用 pH 计测量 pH，每个处理重复 3 次。

1.2.8　拮抗菌在厚皮甜瓜表面定殖特性的测定　参照李建等[17] 的方法进行改进，常温贮藏厚皮甜瓜每隔 5 d 取样，低温贮藏每隔 10 d 取样。取伤口处 5 g 厚皮甜瓜于无菌研钵中研磨，0.85% 无菌生理盐水稀释 10^4 倍，取 100 μL 稀释液涂布于 NA 板，32 ℃ 恒温培养 16 h 后平板计数拮抗菌 BG-2。每个处理取 3 个重复。

定殖量（CFU/g）=平板菌落数×10^4

1.3　数据处理

本研究每个处理做 3 组平行，每组平行重复 3 次，数据结果以平均值±标准差表示，采用 Excel 2019 进行作图，SPSS26 对实验数据进行整理和分析，用方差分析的最小显著性差异（LSD）进行差异显著性比较，P<0.05 表示差异显著。

2　结果与分析

2.1　不同贮藏温度下拮抗菌 BG-2 对厚皮甜瓜腐烂率的影响

腐烂率是直观表现厚皮甜瓜腐烂情况的指标，由图 1 可知，在 25 ℃ 和 4 ℃ 条件下，T2 处理最早腐烂，分别从第 10 d 和第 20 d 开始，T1 处理腐烂时间最晚且腐烂率显著低于其他处理（P<0.05）。这可能是由于拮抗菌 BG-2 具有广谱抗菌性，而对厚皮甜瓜消毒处理并不能杀灭所有病原菌，另一方面拮抗菌可以诱导厚皮甜瓜保护酶活性增强，提高抗病能力，延缓腐烂。井敏敏等[18] 也通过将拮抗菌接种到贮藏期“台农”芒果上得出拮抗菌可以抑制芒果果实软化的结论。25 ℃ 条件下，第 25 d 时，T2 的腐烂率为 100%，显著高于其他处理（P<0.05），T1 的腐烂率为 33.33%，T3 的腐烂率为 55.56%，均低于 CK，说明拮抗菌 BG-2 可以有效控制病原菌的生长。4 ℃ 条件

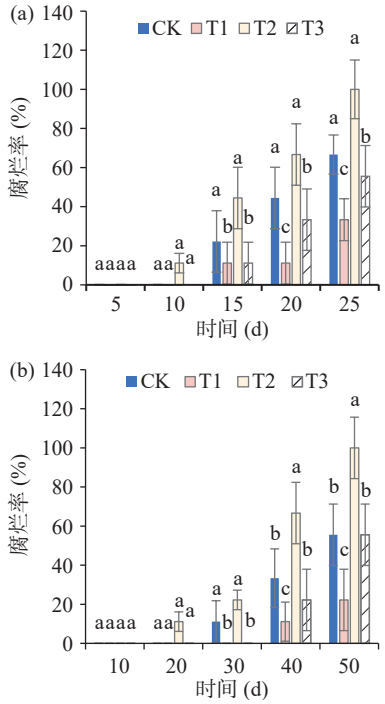

图 1　拮抗菌对新疆厚皮甜瓜腐烂率的影响

Fig.1　Effect of decay rate of antagonistic bacteria on Xinjiang muskmelon

注：(a)：常温(25 ℃)贮藏；(b)：低温(4 ℃)贮藏；不同小写字母表示同一贮藏时间组间差异显著(P<0.05)；图 2~图 7 同。

下，第 50 d 时，T2 的腐烂率为 100%，此时 CK 和 T3 的腐烂率均为 56.00%，T1 的腐烂率为 22.22%，显著低于其他处理(P<0.05)，T1 处理的保鲜效果最好，且相同天数低温 4 种处理腐烂率均低于常温，说明低温可以延缓厚皮甜瓜腐烂，这与王红林等[19] 的研究结果相符。综上表明拮抗菌 BG-2 与低温结合对延缓厚皮甜瓜腐烂效果最好。

2.2　不同贮藏温度下拮抗菌 BG-2 对厚皮甜瓜过氧化物酶活性的影响

植物保护酶在植物防御系统中发挥了重要作用[20−21]，其与某些病原菌的抗病性密切相关，在抵御病原菌入侵中发挥积极作用[22]。研究表明贮藏期水果体内 H_2O_2 含量随贮藏时间延长而增加，过量 H_2O_2 会对植物细胞造成损伤，缩短贮藏期[19]。而 POD 可以抑制果实体内 H_2O_2 的生成[23−26]，平衡活性氧的代谢，延缓果实的衰老[27−28]。由图 2 可知，在 25 ℃ 和 4 ℃ 条件下，4 种处理的过氧化物酶都呈现先上升后下降的趋势。25 ℃ 和 4 ℃ 下 4 种处理均在第 20 d 时酶活达到最高，且 T3 处理显著高于其他处理(P<0.05)，25 ℃ 下为 5.45×10^3 U/g，4 ℃ 下为 3.06×10^3 U/g。整个贮藏期间，T1 和 T3 处理酶活始终高于 CK 处理，这与寇莉萍等[29] 的研究结果相似，这可能是由于厚皮甜瓜受到胁迫后体内 POD 活性上升从而抵御病原菌的侵染，T1 处理酶活上升说明拮抗菌能诱导厚皮甜瓜中 POD 的活性增高[30]，延长厚皮甜瓜贮藏期。

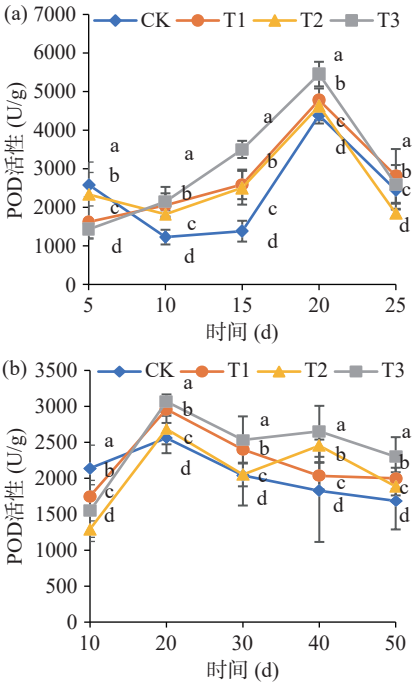

图 2　拮抗菌对新疆厚皮甜瓜过氧化物酶活性的影响

Fig.2　Effect of antagonistic bacteria on POD activity of Xinjiang muskmelon

2.3　不同贮藏温度下拮抗菌 BG-2 对厚皮甜瓜多酚氧化酶活性的影响

PPO 在植物体活性氧系统调控中起着关键作用，能有效维持细胞内自由基的正常水平，同时 PPO 可催化植物体内的酚类物质转变为有毒的醌类物质和单宁，抑制病原菌的生长[31−32]。由图 3 可知，在 25 ℃ 条件下，多酚氧化物酶呈现先上升后下降的

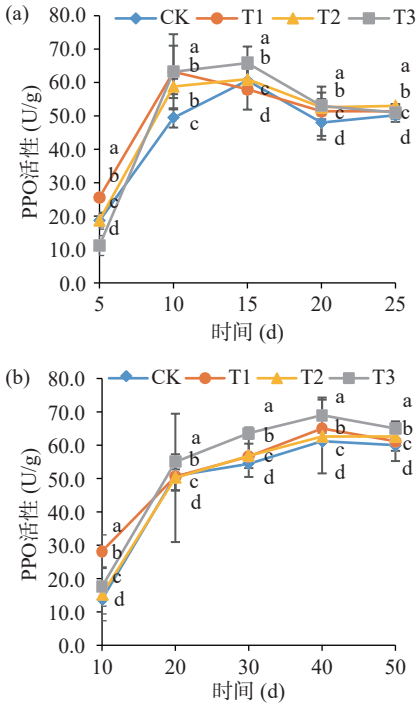

图 3　拮抗菌对新疆厚皮甜瓜多酚氧化酶活性的影响

Fig.3　Effect of antagonistic bacteria on PPO activity of Xinjiang muskmelon

趋势，在 4 ℃ 条件下，多酚氧化物酶呈现缓慢上升的趋势。在 25 ℃ 贮藏期间，T1 处理在第 10 d 时酶活显著高于其他处理（P<0.05），为 63.2 U/g。其余 3 种处理在第 15 d 时酶活达到最高，此时 T3 处理酶活显著高于其他处理（P<0.05），为 65.8 U/g，这可能是由于病原菌和拮抗菌结合具有协同作用[18]。在 4 ℃ 贮藏期间，4 种处理中在第 40 d 时酶活达到最高，T3 处理显著高于其他处理（P<0.05），为 69 U/g，说明低温能有效延长 PPO 活性的上升期，与袁启凤等[33]研究结论相似。2 种贮藏温度下拮抗菌处理酶活始终高于 CK 处理，表明拮抗菌 BG-2 和低温结合处理厚皮甜瓜能有效减缓 PPO 活性的降低，延长厚皮甜瓜贮藏期。

2.4　不同贮藏温度下拮抗菌 BG-2 对厚皮甜瓜苯丙氨酸解氨酶活性的影响

PAL 是苯丙烷类代谢途径的关键酶[34]，合成的酚类、植保素、木质素和异黄酮类物质在抵御病原菌侵染植物体中起着重要作用[35]。由图 4 可知，在 25 ℃ 和 4 ℃ 条件下，苯丙氨酸解氨酶呈现先上升后下降的趋势。在 25 ℃ 贮藏期间，在第 10 d 时酶活达到最高，4 种处理中 T1 处理显著高于其他处理（P<0.05），为 5.55 U/g，是初始值的 1.60 倍，增长较明显。在 4 ℃ 贮藏期间，CK、T1、T3 在第 20 d 时酶活达到最高，其中，T1 处理显著高于其他 2 个处理（P<0.05），为 5.72 U/g，是初始值的 2.31 倍，增长明显。40 d 后 T3 处理 PAL 活性高于其他，可能是由于病原菌与拮抗菌结合在诱导 PAL 酶活性中具有协同作用，T2 处理在整个贮藏期间虽然整体呈上升趋势但增长较为平缓，且对比 T1 和 T3 处理始终处于较低水平。表明拮抗菌 BG-2 处理厚皮甜瓜能有效减缓 PAL 活性的降低从而延长厚皮甜瓜贮藏期。

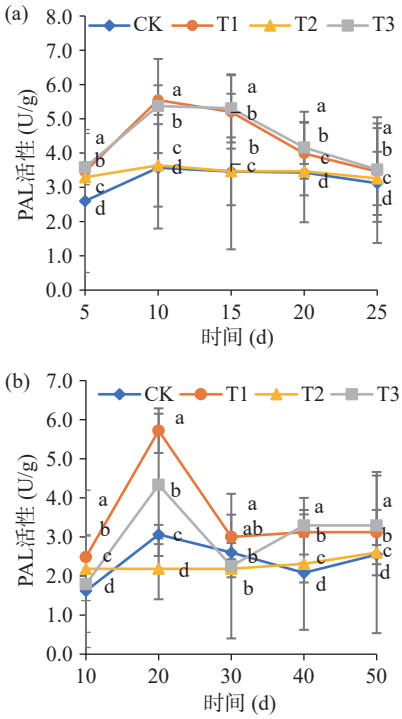

图 4　拮抗菌对新疆厚皮甜瓜苯丙氨酸解氨酶活性的影响

Fig.4　Effect of antagonistic bacteria on PAL activity of Xinjiang muskmelon

2.5　不同贮藏温度下拮抗菌 BG-2 对厚皮甜瓜可溶性固形物的影响

可溶性固形物是判断果实是否成熟及影响果实风味的重要指标[36]。由图 5 可知，在 25 ℃ 和 4 ℃ 条件下，厚皮甜瓜的可溶性固形物含量呈现下降的趋势。在整个贮藏期间，T1 处理和 T3 处理可溶性固形物含量均显著高于 T2 处理（P<0.05）。在 25 ℃ 下，贮藏第 25 d 时，T1 和 T3 处理的可溶性固形物分别下降了 17.25% 和 14.19%，T2 处理下降了 60.59%。在 4 ℃ 下，贮藏第 50 d 时，各处理可溶性固形物含量达到最低，T1 和 T3 处理显著高于 CK 和 T2 处理（P<0.05）。整个 4 ℃ 贮藏过程 T1 和 T3 处理的可溶性固形物含量分别下降了 15.72% 和 14.43%，这与赵鲁宁等[37] 的研究结果一致。果实中可溶性固形物中主要成分是糖类物质，而糖类物质是果实重要的风味物质和能量来源[38]。低温贮藏能有效减缓果实可溶性固形物的下降，延长贮藏期[39]，与本研究中 4 ℃ 下 4 种处理可溶性固形物含量高于 25 ℃ 相符。说明拮抗菌 BG-2 与低温结合能有效抑制厚皮甜瓜贮藏过程中可溶性固形物的下降，降低厚皮甜瓜风味和营养物质的损失。

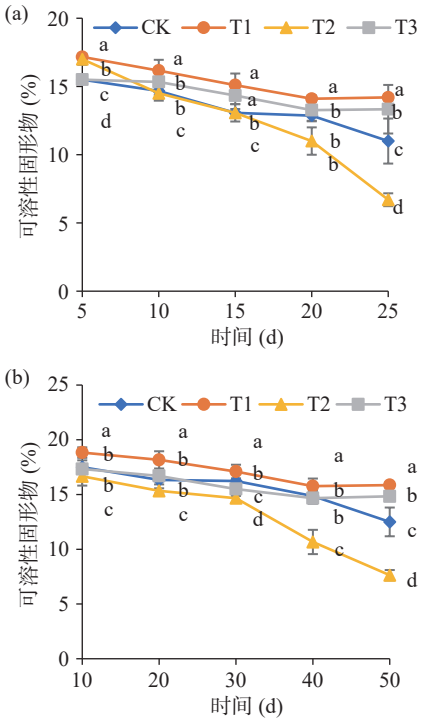

图 5　拮抗菌对新疆厚皮甜瓜可溶性固形物的影响

Fig.5　Effect of antagonistic bacteria on TSS content of Xinjiang muskmelon

2.6　不同贮藏温度下拮抗菌 BG-2 对厚皮甜瓜 pH 的影响

由图 6 可知，在 25 ℃ 和 4 ℃ 条件下，厚皮甜瓜

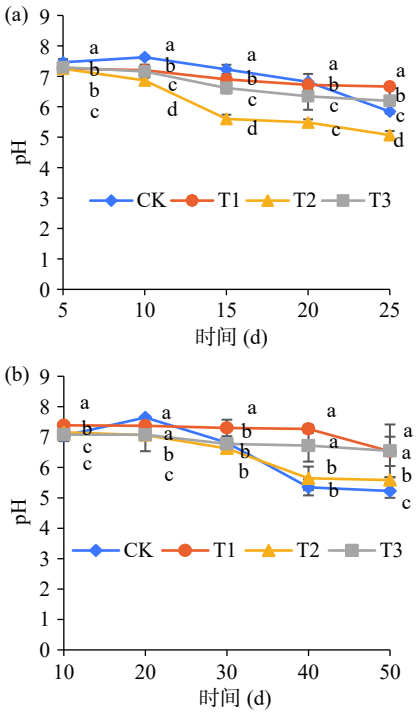

图 6 拮抗菌对新疆厚皮甜瓜 pH 的影响

Fig.6 Effect of antagonistic bacteria on pH of Xinjiang muskmelon

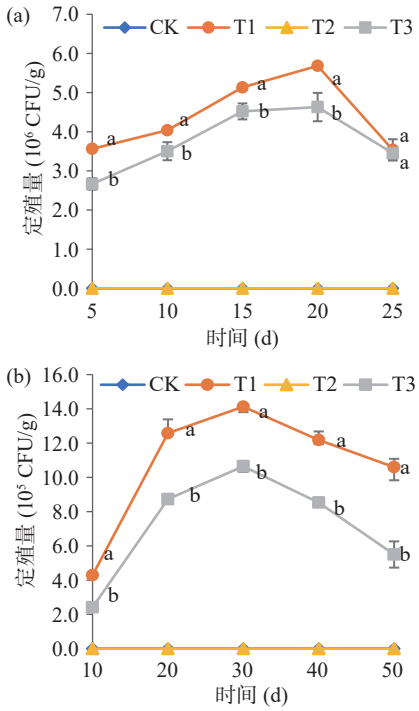

图 7 拮抗菌在新疆厚皮甜瓜表面的定殖特性

Fig.7 Colonization characteristics of antagonistic bacteria on the surface of Xinjiang muskmelon

的 pH 呈现下降的趋势，这是由于在贮藏过程中厚皮甜瓜腐败产生有机酸，导致 pH 降低，CK 处理在第 2 次取样升高的趋势可能是由于厚皮甜瓜的后熟消耗了有机酸[16]。在整个贮藏期间，T1 和 T3 处理抑制 pH 下降的能力优于其他 2 种处理。在 25 ℃ 下，贮藏第 25 d 时，T1 和 T3 处理 pH 显著高于 CK 和 T2 处理（P<0.05），整个贮藏过程 T1 和 T3 处理 pH 分别下降了 8.26% 和 15.09%，T2 处理下降了 30.07%。在 4 ℃ 下，贮藏第 50 d 时，各处理 pH 达到最低，T1 和 T3 处理显著高于 CK 和 T2 处理（P<0.05）。整个贮藏过程中，T1 和 T3 处理 pH 分别下降了 5.28% 和 7.63%，T2 处理下降了 21.93%。说明低温对抑制厚皮甜瓜 pH 下降效果更好，T1 和 T3 处理不仅能抑制厚皮甜瓜前期贮藏过程中 pH 的上升，还能延缓后期 pH 的下降，且与低温结合效果更好。

2.7 不同贮藏温度下拮抗菌 BG-2 在厚皮甜瓜表面的定殖特征

由图 7 可知，在 25 ℃ 和 4 ℃ 条件下，CK 和 T2 处理拮抗菌为 0，T1 和 T3 处理拮抗菌在厚皮甜瓜表面的定殖规律都呈现了先上升后下降的趋势。在 25 ℃ 贮藏条件下，T1 和 T3 处理拮抗菌定殖量在前 20 d 呈现匀速上升的趋势，在第 20 d 达到最高，T1 为 5.68×10^6 CFU/g，T3 为 4.63×10^6 CFU/g。之后拮抗菌定殖量开始下降，在第 25 d 时 T1 保持在 3.54×10^6 CFU/g，T3 保持在 3.45×10^6 CFU/g。在 4 ℃ 贮藏条件下，T1 和 T3 处理拮抗菌定殖量在前 30 d 呈现上升趋势，在第 30 d 达到最高，T1 为 1.41×10^6 CFU/g，T3 为 1.06×10^6 CFU/g。之后拮抗菌定殖量开始下降，在第 50 d 时 T1 保持在 1.06×10^6 CFU/g，T3 保持在 5.50×10^5 CFU/g。说明拮抗菌 BG-2 能在厚皮甜瓜表面稳定定殖且保持有效的定殖量。

3 结论

本研究初步探明了 25 ℃ 和 4 ℃ 下拮抗菌 BG-2 对新疆厚皮甜瓜贮藏期保鲜效果和保护酶活性的影响。结果表明，2 种温度贮藏期贮藏结束时，接种拮抗菌 BG-2 的厚皮甜瓜 T1 处理腐烂率显著低于 T2 处理（P<0.05），对抑制厚皮甜瓜 pH 和可溶性固形物含量的下降也显著优于 CK 和 T2 处理（P<0.05）。厚皮甜瓜保护酶 POD 和 PAL 活性均呈现先上升后下降的趋势，PPO 活性在 25 ℃ 下呈现先上升后下降的趋势，在 4 ℃ 下呈现缓慢上升的趋势。接种拮抗菌 BG-2 的厚皮甜瓜 3 种酶活性显著高于 CK 和 T2 处理（P<0.05）。在 25 ℃ 和 4 ℃ 下贝莱斯芽孢杆菌 BG-2 均能在厚皮甜瓜表面定殖，降低厚皮甜瓜腐烂率，延缓 pH 和可溶性固形物的下降，延缓贮藏期厚皮甜瓜果实内 POD、PPO 和 PAL 活性下降，尤其与低温相结合效果更好。

参考文献

[1] 林德佩. 中国栽培甜瓜植物的起源、分类及进化[J]. 中国瓜菜, 2010, 23(4): 34−36. [LIN D P. Origin classification and evolution for cultivated plants of Chinese melon[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2010, 23(4): 34−36.]

[2] BI Y, GE Y H, WANG C L, et al. Melon production in China[J]. Acta Horticulturae, 2007, 731(1): 493−500.

[3] SHAO X, TU K, TU S, et al. Effects of heat treatment on wound healing in Gala and Red Fuji apple fruits[J]. Journal of Agri-

cultural and Food Chemistry, 2010, 58(7): 4303−4309.
[4] 马超, 王如福, 徐帆, 等. 不同处理对花菇贮藏品质及抗氧化酶活性的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(10): 271−276. [MA C, WANG R F, XU F, et al. Effects of different treatments on the quality and antioxidant enzyme activities of *Lentinus edodes* during storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(10): 271−276.]
[5] HE J, GIUSTI M M. Anthocyanins: Natural colorants with health-promoting properties[J]. Annual Review of Food Science & Technology, 2010, 1(4): 163.
[6] SHARMA S, PAREEK S, ID N A, et al. Modulatory effects of exogenously applied polyamines on postharvest physiology, antioxidant system and shelf life of fruits: A review[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2017(18): 1789.
[7] 杜红凤, 单春会, 安瑞丽, 等. 不同温度对哈密瓜采后贮藏品质及生理的影响[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(10): 31−34. [DU H F, SHAN C H, AN R L, et al. Effect of different temperatures on postharvest storage quality and physiology of Hami melon[J]. Cereals & Oil, 2018, 31(10): 31−34.]
[8] 姚军, 耿新丽, 再吐娜·买买提, 等. 采后水杨酸处理对哈密瓜贮藏特性及防御酶活性的影响[J]. 保鲜与加工, 2018, 18(4): 7−11. [YAO J, GENG X L, ZAI T N, et al. Effects of salicylic acid treatment on postharvest storage characteristic and the defense enzyme activity of hami-melon[J]. Storage and Process, 2018, 18(4): 7−11.]
[9] SANTOYO G, MORENO-HAGELSIEB G, DEL CARMEN-OROZCO-MOSQUEDA M, et al. Plant growth-promoting bacterial endophytes[J]. Microbiological Research, 2016, 183: 92−99.
[10] CONRATH U, BECKERS G J M, LANGENBACH C J G, et al. Priming for enhanced defense[J]. Annual Review of Phytopathology, 2015, 53: 97−119.
[11] 何庆元, 向仕华, 吴萍, 等. 盐胁迫对大豆 POD、SOD 和 CAT 同工酶的影响[J]. 安徽科技学院学报, 2015, 29(3): 10−13. [HE Q Y, XIANG S H, WU P, et al. Effects of salt stress in soybean (*Glycine max*) isoenzyme of POD, SOD and CAT[J]. Journal of Anhui Science and Technology University, 2015, 29(3): 10−13.]
[12] 刘奎, 赵焕兰, 宗宁, 等. 枯草芽孢杆菌 BS-1 菌株对猕猴桃采后软腐病的抑制和保鲜效果评价[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(10): 40−49. [LIU K, ZHAO H L, ZONG N, et al. Inhibition and fresh-keeping effects evaluation of *bacillus subtilis* BS-1 Strain on soft rot of postharvest kiwifruit[J]. Storage and Process, 2021, 21(10): 40−49.]
[13] GAO Y H, GUO R J, and LI S D. Draft genome sequence of *Bacillus velezensis* B6, a rhizobacterium that can control plant diseases[J]. Genome Announcements, 2018, 6(12): 18−34.
[14] 汪志浩, 单春会, 王坚, 等. 拮抗酵母添加方式对哈密瓜保鲜效果的研究[J]. 农产品加工 (学刊), 2013(5): 34−36. [WANG Z H, SHAN C H, WANG J, et al. Antagonistic yeast adding method on preservation effect of cantaloupe[J]. Academic periodical of farm products processing, 2013(5): 34−36.]
[15] 曹建康. 果蔬采后生理生化实验指导 [M]. 中国轻工业出版社, 2013, 50−53. [CAO J K. Experiment guidance of postharvest physiology and biochemistry of fruits[M]. China Light Industry Press, 2013, 50−53.]
[16] 陈存坤, 高芙蓉, 薛文通, 等. 臭氧处理对新疆厚皮甜瓜贮藏品质和生理特性的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(20): 215−220. [CHEN C K, GAO F R, XUE W T, et al. Effects of ozone treatment on storage quality and physiological characteristics of Xinjiang Thick-Skinned melon[J]. Food Science, 2016, 37(20): 215−220.]
[17] 李健, 何鹏飞, 李咏梅, 等. 枯草芽孢杆菌 L1-21 在柑橘上的定殖能力及其防治绿霉病效果[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(5): 31−36. [LI J, HE P F, LI Y M, et al. Colonization ability of *Bacillus subtilis* L1-21 in *Citrus* and its control effect on green mold[J]. Journal of Hua Zhong Agricultural University, 2021, 40(5): 31−36.]
[18] 井敏敏, 田亚琴, 邵远志. 拮抗菌 JS-8 对‘台农’芒果贮藏品质及保护酶活性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(1): 168−173. [JING M M, TIAN Y Q, SHAO Y Z. The effects of *Antagonistic bacterium* JS-8 on storage quality andactivity of protective enzymes of ‘Tai Nong’mango[J]. Food and Fermentation Industries, 2017, 43(1): 168−173.]
[19] 王红林, 袁启凤, 严佳文, 等. 贮藏温度对“紫红龙”火龙果 SA、JA 及酶活性变化的影响[J]. 中国南方果树, 2020, 49(1): 70−74, 80. [WANG H L, YUAN Q F, YAN J W, et al. The effect of storage temperature on the changes of SA, JA and enzyme activities of "Purple Red Dragon" Pitaya[J]. South China Fruits, 2020, 49(1): 70−74, 80.]
[20] 陈士刚, 秦彩云, 王聪慧, 等. 红松 5 个家系未成熟种子的胚性愈伤组织诱导研究[J]. 森林工程, 2021, 37(1): 13−17. [CHEN S G, QIN C Y, WANG C H, et al. Embryogenic callus induction of Korean pine immature seeds from five families[J]. Forest Engineering, 2021, 37(1): 13−17.]
[21] ZHANG Q M, WANG C X, YONG D J, et al. Induction of resistance mediated by an attenuated strain of *Valsa mali* var. Mali using pathogen-apple callus interaction system[J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014(201382): 1−10.
[22] 张宁, 毕研飞, 郭静, 等. 不同抗性甜瓜接种蔓枯病菌后 PAL、PPO 与 POD 活性的变化[J]. 植物生理学报, 2016, 52(8): 1169−1175. [ZHANG N, BI Y F, GUO J, et al. Changes of PAL, PPO and POD activites in melon with different resistances after inoculated with *Didymella bryoniae*[J]. Plant Physiology Journal, 2016, 52(8): 1169−1175.]
[23] 白国荣, 郭敏瑞, 卢娣, 等. 冰温贮藏对新疆吊干杏保鲜效果的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(13): 260−266. [BAI G R, GUO M R, LU T, et al. Improved postharvest quality of apricot (*Prunus armeniaca* L. cv. Diaogan) during storage at near-freezing temperature[J]. Food Science, 2019, 40(13): 260−266.]
[24] 侯媛媛, 朱璇, 王英, 等. 水杨酸处理对杏果实冷害及活性氧代谢的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(4): 195−199. [HOU Y Y, ZHU X, WANG Y, et al. Effect of salicylic acid treatment on chilling injury and the metabolism of reactive oxygen species inapricot fruits stored at low temperature[J]. Food Science, 2014, 35(4): 195−199.]
[25] 杜鑫宇, 尹航, 李莹, 等. 低温持续胁迫下不同烟草品种苗期

耐寒性生理指标的变化[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2020, 35(2): 124−130. [DU X Y, YIN H, LIN Y, et al. Changes in physiological indexes of cold tolerance in different tobacco varieties at seedling stage under continuous low temperature stress[J]. Journal of Inner Mongolia University for Nationalities, 2020, 35(2): 124−130.]

[26] HAMADA A E et al. Maize roots and shoots show distinct profiles of oxidative stress and antioxidant defense under heavy metal toxicity[J]. Environmental Pollution, 2020(113705): 258.

[27] ZHANG Q M, WANGC X, YONGD J, et al. Induction of resistance mediated by an attenuated strain of *Valsa mali* var. Mali using pathogen-apple callus interaction system[J]. The Scientific World Journal, 2014(2014): 1−10.

[28] GRIGORAS A G. Catalase immobilization-A review[J]. Biochemical Engineering Journal, 2017, 117(B): 1−20.

[29] 寇莉萍, 张萌, 郭晓成, 等. 茉莉酸甲酯处理对石榴贮藏品质及相关酶活性的影响[J]. 包装工程, 2021, 42(9): 64−71. [KOU L P, ZHANG M, GUO X C, et al. Effects of methyl jasmonate treatment on storage quality and enzymes activities of pomegranate[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(9): 64−71.]

[30] 颜尘栋, 金春吉, 金辉, 等. YBUF5 和 YBUF7 菌株对人参锈腐病的防病作用及几种防御酶活性的影响[J]. 延边大学农学学报, 2021, 43(3): 14−20, 54. [YAN C D, JIN C J, JIN H, et al. Effect of YBUF5 and YBUF7 strains on preventing ginseng rust rot and the activity of several defensive enzymes[J]. Journal of agronomy of Yanbian University, 2021, 43(3): 14−20, 54.]

[31] 余晓燕, 毕阳, 李永才, 等. *Trichothecium roseum* 蛋白激发子诱导杏果抗黑斑病的作用机理[J]. 食品科学, 2015, 36(4): 254−259. [XU X Y, BI Y, Li Y C, et al. Mechanism of Alternaria rot resistance induced in apricot fruits by protein elicitor from *Trichothecium roseum*[J]. Food Science, 2015, 36(4): 254−259.]

[32] MA L, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Recent developments in novel shelf life extension technologies of fresh-cut fruits and vegetables[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 64: 23−38.

[33] 袁启凤, 李仕品, 严佳文, 等. 不同贮藏温度对火龙果紫红龙可溶性蛋白质含量和抗氧化酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(2): 186−189. [YUAN Q F, LI S P, YAN J W, et al. Effects of different storage temperatures on soluble protein content and antioxidant enzyme activity of Dragon fruit Amarylla[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(2): 186−189.]

[34] XIAO M Y et al. Phenylalanine ammonia lyases mediate broad-spectrum resistance to pathogens and insect pests in plants[J]. Science Bulletin, 2020, 65(17): 1425−1427.

[35] 杜欣谊. 苯丙氨酸解氨酶的研究进展[J]. 现代化农业, 2016(7): 24−26. [DU X Y. Research progress of phenylalanine ammonia lyase[J]. Modernizing Agriculture, 2016(7): 24−26.]

[36] 潘越, 李婷婷, 吴彩娥, 等. 低温等离子体处理对新疆小白杏保鲜效果及品质的影响[J]. 食品科学, 2022: 1−12. [PAN Y, LI T T, WU C E, et al. Efficacy of cold plasma on preservation effect and storage quality of apricot fruits[J]. Food Science, 2022: 1−12.]

[37] 赵鲁宁, 周秋阳, 杨慧慧, 等. 季也蒙毕赤酵母 Y35-1 菌株对枇杷采后炭疽病的抑菌效果及保鲜作用[J]. 食品科学, 2019, 40(4): 170−177. [ZHAO L N, ZHOU Q Y, YANG H H, et al. Inhibitory effect of *Pichia guilliermondii* Y35-1 against postharvest anthracnose infection in loquat fruit and its effect on quality preservation[J]. Food Science, 2019, 40(4): 170−177.]

[38] 廖光联, 钟敏, 黄春辉, 等. 果实糖代谢及其相关酶基因研究进展[J]. 江西农业大学学报, 2020, 42(1): 187−195. [LIAO G L, ZHONG M, HUANG C H, et al. Progress in research on sugar metabolism and related enzyme genes in fruit[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2020, 42(1): 187−195.]

[39] 关博洋, 殷菲胧, 刘云芬, 等. 贮藏温度对采后龙眼果实糖代谢及其相关酶活性的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(5): 348−355. [GUAN B Y, YIN F L, LIU Y F, et al. Effects of storage temperature on sugar metabolism and related enzyme activities of postharvest Longan fruits[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(5): 348−355.]