

酸性硫酸钙（ACS）减压浸泡对干制灰枣黑曲霉病抑制及贮藏品质的影响

万常帅¹, 岳文涛¹, 吴斌^{2*}, 张平^{2*}, 张政², 刘玉洁³

(1. 新疆农业大学食品科学与药学学院, 新疆乌鲁木齐 830052) (2. 新疆农业科学院农产品贮藏加工研究所, 新疆农产品加工与保鲜重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830091) (3. 新疆大学生命与科学技术学院, 新疆乌鲁木齐 830046)

摘要: 为了探明酸性硫酸钙 (Acidic Calcium Sulfate, ACS) 处理对灰枣黑曲霉病及贮藏品质的影响, 以新疆灰枣为试材, 通过体外分析 ACS 对黑曲霉 (*Aspergillus niger*, *A. niger*) 菌落生长、孢子萌发和菌丝体生成的抑制效果, 通过体内减压浸泡试验研究其对灰枣贮藏品质参数的影响。结果表明: ACS 处理对 *A. niger* 菌落总数、孢子萌发和菌丝生长具有显著抑制作用, ACS-10⁻¹ (10 000 mg·L⁻¹) 抑制率均为 100%。扫描电镜显示 ACS 能显著破坏 *A. niger* 微观结构。ACS 能有效降低灰枣黑曲霉病的发病率, 其中 ACS-10⁻¹ 较 CK 组抑制率达 100%。ACS 减压浸泡还可显著降低灰枣自然发病率, 延缓水分含量下降, 维持可溶性固形物 (Total Soluble Solids, TSS)、可滴定酸 (Titratable Acid, TA) 和抗坏血酸 (Ascorbic Acid, AsA) 含量, 降低表面微生物数量, 贮藏 60 d, ACS 处理组自然发病率较 CK 组降低 39.29%, 水分含量、TA 和 AsA 高 3.14%、8.13% 和 2.54%, 菌落总数和霉菌及酵母菌落总数下降了 1.13 和 1.43 log₁₀ CFU/g。综上所述, ACS 减压浸泡处理是一种安全、有效的灰枣杀菌贮藏保鲜方法, 可为新疆灰枣产业保质技术研究提供理论依据。

关键词: 酸性硫酸钙; 黑曲霉; 病害防控; 灰枣; 贮藏品质

文章编号: 1673-9078(2026)04-132-140

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.4.1959

Effects of Acidic Calcium Sulfate Vacuum Impregnation on Inhibition of Black Mold Infection and Storage Quality of Dried Gray Jujube

WAN Changshuai¹, YUE Wentao¹, WU Bin^{2*}, ZHANG Ping^{2*}, ZHANG Zheng², LIU Yujie³

(1. College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China) (2. Institute of Agricultural Products Storage and Processing, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Xinjiang Key Laboratory of Agricultural Product Processing and Preservation, Urumqi 830091, China)
(3. College of Life Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: To investigate the effects of acidic calcium sulfate (ACS) treatment on black mold infection and storage quality of gray jujube, *in vitro* assays were conducted to evaluate the inhibitory effects of ACS on *Aspergillus niger* colony growth, spore

引文格式:

万常帅,岳文涛,吴斌,等. 酸性硫酸钙 (ACS) 减压浸泡对干制灰枣黑曲霉病抑制及贮藏品质的影响[J]. 现代食品科技, 2026, 42(4): 132-140.

WAN Changshuai, YUE Wentao, WU Bin, et al. Effects of acidic calcium sulfate vacuum impregnation on inhibition of black mold infection and storage quality of dried gray jujube [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(4): 132-140.

收稿日期: 2024-12-31; 修回日期: 2025-02-27; 接受日期: 2025-03-04

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发任务专项 (2022B02026; 2022B03006); 新疆维吾尔自治区重大科技专项 (2022A02006); 新疆维吾尔自治区科技创新领军人才项目—高层次领军人才 (2022TSYCLJ0040); 农业科技创新稳定支持项目 (xjnkylwdzc-2023003-2)

作者简介: 万常帅 (1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: 1095986264@qq.com

通讯作者: 张平 (1964-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 果品贮藏保鲜, E-mail: zhangpingyys@163.com; 共同通讯作者: 吴斌 (1973-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: 42042615@qq.com

germination, and mycelium development in Xinjiang gray jujube. Further, *in vivo* vacuum-impregnation treatments were performed to examine their effects on the storage quality parameters of gray jujube. The results showed that ACS treatment had a significant inhibitory effect on *A. niger* colony formation, spore germination, and mycelial development, with ACS-10⁻¹ (10 000 mg·L⁻¹) exhibiting 100% inhibition in all cases. Scanning electron microscopy showed that ACS significantly disrupted the microstructure of *A. niger*. ACS could effectively reduce the incidence of black mold infection in grey jujube. Compared with the CK group, ACS-10⁻¹ exhibited 100% inhibition. Vacuum impregnation with ACS also significantly reduced natural decay, slowed moisture loss, maintained total soluble solids, titratable acid (TA), and ascorbic acid (AsA) levels, and decreased surface microbial counts. After 60 days of storage, natural decay was 39.29% lower in the ACS-treated group than in the CK group; moisture content and TA and AsA levels were 3.14%, 8.13% and 2.54% higher, respectively, and total colony counts as well as mold and yeast counts decreased by 1.13 and 1.43 log₁₀ CFU/g, respectively. In summary, vacuum impregnation with ACS is a safe and effective postharvest sanitizing and preservation method for gray jujube. The results provide a theoretical basis for quality preservation technology in the Xinjiang gray jujube industry.

Key words: acidic calcium sulfate; *Aspergillus niger*; disease control; gray jujube; storage quality

灰枣 (Gray Jujube), 鼠李科枣属植物。在新疆喀什、若羌和阿克苏等地区广泛种植, 其干制后品质优良, 果实肉厚、酸甜可口、风味独特, 深受消费者喜爱^[1,2]。据新疆统计年鉴数据显示, 2023 年新疆红枣产量高达 326.66 万 t, 其中灰枣是新疆红枣产业的主导品种之一, 但在贮运销售期间, 灰枣面临营养品质降低及真菌病害侵袭等诸多问题。黑曲霉 (*Aspergillus niger*, *A. niger*) 是灰枣采后主要致病菌之一, 易引起灰枣出现黑斑、腐烂等症状, 严重损害商品价值与食用安全^[3,4]。传统化学防治方法, 如合成杀菌剂、有机农药等虽能在一定程度上控制病害发生, 但会造成环境污染、农药残留等风险, 对人体健康和生态环境构成潜在威胁^[5,6]。一氧化氮 (Nitric Oxide, NO)^[3]和植物精油^[7]熏蒸处理能有效控制黑曲霉病的发生和抑制黑曲霉的生长, 较好的维持果实贮藏品质, 但剂量控制困难, 用量不当影响效果与品质; 且受环境温湿度、气体成分影响大。因此, 探寻一种安全、有效的病害防治方法以及提高灰枣贮藏品质的措施, 成为当前新疆灰枣产业发展中亟待解决的问题。

酸性硫酸钙 (Acidic Calcium Sulfate, ACS) 是一种新型杀菌防腐保鲜剂^[8], 具有来源广泛、安全环保等优势, 近年来在农产品保鲜和病害防治领域显示出良好的应用前景。ACS 稀释液已获美国食品药品监督管理局 (Food and Drug Administration, FDA) 批准, 可用于防止食品酶促褐变及霉菌生长^[9]。ACS 在果实的贮藏中表现出了良好的保鲜效果和病害抑制作用, ACS 显著抑制了匍枝根霉 (*Rhizopus stolonifer*, *R. stolonifer*) 和灰霉菌 (*Botrytis cinerea*, *B. cinerea*) 的生长, 减少了水蜜桃和葡萄果实的病斑面积和发病率^[10,11]。此外, ACS 通过抑制荔枝果皮和水蜜桃中多酚氧

化酶 (Polyphenol Oxidase, PPO)、过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 及多聚半乳糖醛酸酶 (Polygalacturonase, PG) 的活性, 延缓了果实的衰老褐变过程^[9,12,13]。ACS 还能够延缓葡萄和鲜糯玉米的硬度、TSS 和水分等参数的下降, 维持果实采后品质^[11,14]。目前, ACS 在果实采后病害防控研究多集中于鲜果, 对干制果品病害抑制及贮藏品质影响尚缺乏系统研究。

本研究以新疆灰枣为试材, 用 ACS 减压浸泡处理, 研究其对黑曲霉病的抑制机制及对贮藏品质的影响。通过体外和体内试验, 分析评价 ACS 对黑曲霉菌落生长、孢子萌发、菌丝体生成的抑制、贮藏品质变化、自然发病率和表面微生物总量的作用效果。以期找到有效控制黑曲霉病和保鲜灰枣良好贮藏品质的技术方法, 为灰枣产业可持续发展提供理论依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 原料与试剂

灰枣产自新疆喀什麦盖提县, 采用传统晾晒法干制而成, 干制灰枣含水量为 20%±2%, 选取果形相近、大小均匀, 且无病虫害、无机械伤的灰枣用于体内抑菌和贮藏试验。

黑曲霉菌 (*A. niger*), 由新疆农业科学院微生物应用研究所提供。

ACS 液体, 购自德蓝水技术股份有限公司; 马铃薯葡萄糖琼脂 (Potato Dextrose Agar, PDA), 购自北京陆桥技术股份有限公司; 马铃薯葡萄糖肉汤 (Potato Dextrose Broth, PDB)、平板计数琼脂, 购自北京奥博星生物技术有限责任公司; 电镜固定液, 购自武汉赛维尔生物科技有限公司; 吐温 80、甲醇、无水乙醇、

氢氧化钠、碳酸氢钠,购自天津市北联精细化学品开发有限公司;盐酸,购自天津市光复精细化工研究所;苯酚、酒石酸钾钠、邻苯二甲酸氢钾、草酸,购自天津市致远化学试剂有限公司。所用试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器设备

VS-1300L-U 超净工作台,苏州安泰空气技术有限公司;LDZX-75L 立式高压蒸汽灭菌器,上海申安医疗器械厂;SPX-100 B-Z 生化培养箱,上海博讯实业有限公司医疗设备;JYX027X3 减压熏蒸装置,上海善如水保鲜科技有限公司;T6-新世纪紫外分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司;905 Titrand 全自动电位滴定仪,瑞士万通集团;PAL-1 数显糖度计,日本 Atago 公司;PC-16A 水分测定仪,浙江森达仪器制造有限公司;5810R 台式高速大容量离心机,德国 Eppendorf 公司;DM3000LED 荧光正置显微镜,德国徕卡公司;JSM-7610FPlus 场发射扫描电子显微镜,日本电子 JEOL 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 ACS 稀释液的配置

参考刘晨霞等^[10]的方法,将 ACS 液体用蒸馏水分别稀释至 10^{-1} 、 10^{-2} 和 10^{-3} 倍,使用 pH 计重复测定 3 次,记录 pH 值,获得 ACS- 10^{-1} (pH 值 0.68)、ACS- 10^{-2} (pH 值 1.36)、ACS- 10^{-3} (pH 值 2.04) ACS 稀释液。

1.3.2 *A. niger* 孢子悬浮液的制备

依据 Lu 等^[15]的方法,在 28 °C 恒温条件下,将 *A. niger* 在 PDA 培养基上培养 7 d。用无菌蒸馏水洗脱孢子,并用无菌纱布去除附着的菌丝。用血球计数板计数,调节孢子悬浮液的浓度为 1×10^6 CFU/mL。

1.3.3 供试培养基的制备

参考刘晨霞等^[10]的方法,将灭菌后的 PDA 培养基分别与 ACS- 10^{-1} 、ACS- 10^{-2} 、ACS- 10^{-3} 倍稀释液按 1:1 (V/V) 均匀混合,制备成加药培养基,同时以无菌水混合 PDA 作为 CK,倒入平板冷却凝固。

1.3.4 测定指标

1.3.4.1 ACS 处理对 *A. niger* 菌落直径的影响

将 *A. niger* 接种于 PDA 平板中央,在 28 °C 恒温箱培养 7 d,采用十字法测量菌落直径,每个处理重复测量 3 次,取平均值。根据公式计算抑菌率:

$$d = \frac{d_0 - d_1}{d_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

d ——抑菌率, %;

d_0 ——CK 菌落直径, mm;

d_1 ——处理组菌落直径, mm。

1.3.4.2 ACS 处理对 *A. niger* 孢子萌发率的影响

参考 Yang 等^[16]的方法并稍作修改,滴加 200 μ L 的 *A. niger* 孢子悬浮液 (1×10^6 CFU/mL) 于 PDA 平板中心,涂布均匀后在 28 °C 恒温箱培养,在培养后的不同时间点,4、8、12、16、20 和 24 h 时,从培养皿中取少量含有孢子的培养基,放在载玻片上,滴加一滴无菌水,盖上盖玻片,轻轻压平,在显微镜下,放大合适倍数,观察孢子萌发情况。每次试验观察时,每组处理随机选取多个视野,对至少 200 个孢子进行萌发情况统计,当胚芽管的长度等于或超过孢子直径时,计算孢子萌发。根据公式计算孢子萌发率:

$$N = \frac{n_1}{n_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

N ——孢子萌发率, %;

n_1 ——萌发孢子数, 个;

n_0 ——观察总孢子数, 个。

1.3.4.3 ACS 处理对 *A. niger* 菌丝干重的影响

参考陈燕^[17]的方法稍作修改,将灭菌 PDB 培养基分别与 ACS- 10^{-1} 、 10^{-2} 、 10^{-3} 倍稀释液按 1:1 (V/V) 混匀配置成 20 mL 带药培养基,然后倒入 100 mL 锥形瓶中。接着将 100 μ L 的孢子悬浮液 (1×10^6 CFU/mL) 加入锥形瓶中,以无菌水混合 PDB 作为 CK。用封口膜密封后将所有锥形瓶置于 28 °C、120 r·min⁻¹ 的恒温振荡培养箱中培养 48 h。培养结束后,通过预先称重的滤纸过滤菌丝体,用无菌水洗涤三次,获得湿菌丝体,将湿菌丝体在 70 °C 烘箱中干燥至恒重,称得的质量为菌丝体的干重。

1.3.4.4 ACS 处理对 *A. niger* 微观形态结构的影响

将 *A. niger* 接种于 PDA 平板中央,在 28 °C 恒温箱中培养 7 d。从菌落周围小心切取 3×3 mm 的菌丝片段后,迅速置于 2.5% (V/V) 戊二醛溶液中,在 4 °C 冰箱中固定 12 h,保持霉菌的形态和结构完整。固定完成后,使用不同体积分数的乙醇 (50%、70%、80%、90%、100%) 对样本进行梯度脱水处理,每次 15 min,去除水分。采用 CO₂ 临界点干燥法对样本进行干燥处理。样本粘贴在扫描电镜铝板上,离子溅射喷金,厚度在 1 μ m 左右。在加速电压 5 kV 下进行观察,选择典型视野采集图像。

1.3.4.5 ACS 减压浸泡处理对灰枣黑曲霉病的抑制作用

选取大小均匀、无病虫害、无机械伤的灰枣果实,用 75% (V/V) 的乙醇清洗后用无菌水洗涤两次,置于无菌试验台,吹干表面水分。沿果实纵向将灰枣切开,

随机分组装盒, 每组分别用 ACS-10⁻¹、-10⁻²、-10⁻³ 倍稀释液浸泡, 以蒸馏水浸泡为 CK 组。样品盒迅速放入减压熏蒸装置 (0.3 m×0.3 m×0.3 m) 中, 抽至 50 kPa 低压, 持续时间 3 min。减压浸泡处理完成后, 将灰枣取出, 晾干表面水分, 用无菌喷雾瓶均匀喷洒 2 mL 的 *A. niger* 孢子悬浮液 (1×10⁶ CFU/mL)。随后将保鲜盒置于温度为 (23±2) °C、相对湿度为 80%±10% 的环境中贮藏 10 d, 定期观察果实病害发生情况, 记录发病果实数量。每个处理设置 3 个平行, 试验重复两次。

$$C = \frac{C_x}{C_y} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

C ——病害发生率, %;

C_x ——发病果实数, 个;

C_y ——体内接种果实数, 个。

1.3.4.6 ACS减压浸泡处理对灰枣发病率和品质的影响

选取大小均匀、无病虫害、无机械伤的灰枣果实, 随机分组装盒, 每盒约 500 g, 依据体外和体内抑菌试验结果, 筛选出的最佳 ACS-10⁻¹ 对灰枣进行处理。试验共设置两个处理组, CK 组用蒸馏水在 50 kPa 下减压浸泡 3 min, ACS 处理组则用 ACS-10⁻¹ 稀释液在 50 kPa 下减压浸泡 3 min。浸泡结束后, 将灰枣晾干表面水分, 放置在常温 (23±2) °C、避光、相对湿度为 50%±5% 的环境下贮藏。每 10 d 取一次样, 进行各项品质指标测定。自然发病是指灰枣在常规贮藏条件下, 自然出现菌斑、流水、霉变的现象。

$$k = \frac{k_x}{k_y} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

k ——自然发病率, %;

k_x ——发病果实数, 个;

k_y ——总果实数, 个。

水分含量测定: 称取去核灰枣 50 g, 将其带果皮纵切成条, 然后横切成碎片 (每片厚约 0.5 mm), 充分混合均匀。从中称取 2.0 g 切碎的灰枣样品, 置于水分测定仪中进行测定, 结果以 % 表示。TSS 测定: 称取 2.0 g 切碎的灰枣样品, 将果肉与蒸馏水按 1:1 (V/V) 混合匀浆, 过滤后用 PAL-1 型数显糖度计测定上清液 TSS 含量, 结果以 % 表示。TA 测定: 采用酸碱滴定法^[18]测定, 结果以酒石酸百分数表示。AsA 测定: 采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法^[18]测定。菌落总数测定: 采用 GB 4789.2-2022 菌落总数测定方法^[19]。霉菌和酵母计数: 采用 GB 4789.15-2016 霉菌和酵母计数方法^[20]。

1.4 数据处理

每个处理试验均进行三次重复, 采用 Excel 2016 软件对数据进行处理, 使用 Origin 2021 制图, SPSS 20.0 进行差异显著性分析 ($P<0.05$), 通过 Duncan 检验分析多组间差异显著性, t 检验比较两组数据均值是否存在显著差异, 所有数据表示为平均值 ±SE。

2 结果与讨论

2.1 ACS处理对*A. niger*体外的抑制作用

如图 1a、1b 所示, 在对 *A. niger* 体外生长抑制效果的研究中, 随着时间的延长, *A. niger* 菌落直径在 CK 组中逐渐增大, 呈现生长趋势。ACS 处理组显著抑制了 *A. niger* 的生长 ($P<0.05$), 且抑制效果与 ACS 呈质量浓度依赖性。培养 7 d 时, ACS-10⁻¹ 处理组可以完全抑制了 *A. niger* 的生长, 抑菌率达到 100%; ACS-10⁻² 和 ACS-10⁻³ 处理组相较 CK 组, 菌落直径分别降低了 15.78% 和 9.13% ($P<0.05$), 表明 ACS 处理能够有效抑制 *A. niger* 的菌落扩展。

由孢子萌发率可知 (图 1c), CK 组 *A. niger* 在 4~8 h 时孢子萌发速率最快, 呈现出快速生长的态势。ACS 处理组的孢子萌发在相同时间段内均有所推迟, 且萌发率显著降低 ($P<0.05$)。ACS-10⁻¹ 处理组孢子萌发率始终为 0。在培养 24 h 时, CK 组的孢子萌发率高达 91.59%, 而 ACS-10⁻² 和 ACS-10⁻³ 处理组分别为 77.03% 和 84.68%, 分别降低了 15.9% 和 7.54% ($P<0.05$), 表明 ACS 处理对 *A. niger* 孢子萌发率具有显著的抑制作用, 延缓孢子萌发过程。

由图 1d 可知, 培养 48 h 后, ACS 处理对 *A. niger* 的菌丝体生成产生了显著的抑制作用 ($P<0.05$)。ACS-10⁻² 和 ACS-10⁻³ 处理组的菌丝干重分别为 0.094 g 和 0.164 g, 相较 CK 组分别降低了 63.49% 和 36.28%。ACS-10⁻¹ 处理前后, 菌丝体干重基本不变, 表明 ACS 可以完全抑制 *A. niger* 菌丝生长。ACS 处理对 *A. niger* 的生长繁殖具有多方面的显著抑制作用, 且 ACS-10⁻¹ 处理组效果最为显著。

ACS 处理对 *A. niger* 的菌落生长、孢子萌发和菌丝生长均有显著抑制作用, 且质量浓度越高抑制效果越明显, 这与刘晨霞^[21]ACS 抑制 *R. stolonifer* 生长的结论相符。ACS 的酸性特性可能是抑制 *A. niger* 生长的关键因素之一, 酸性环境或许干扰了 *A. niger* 细胞内的 pH 平衡, 进而影响其酶活性和代谢进程, 最终抑制其生长繁殖^[10, 22, 23]。

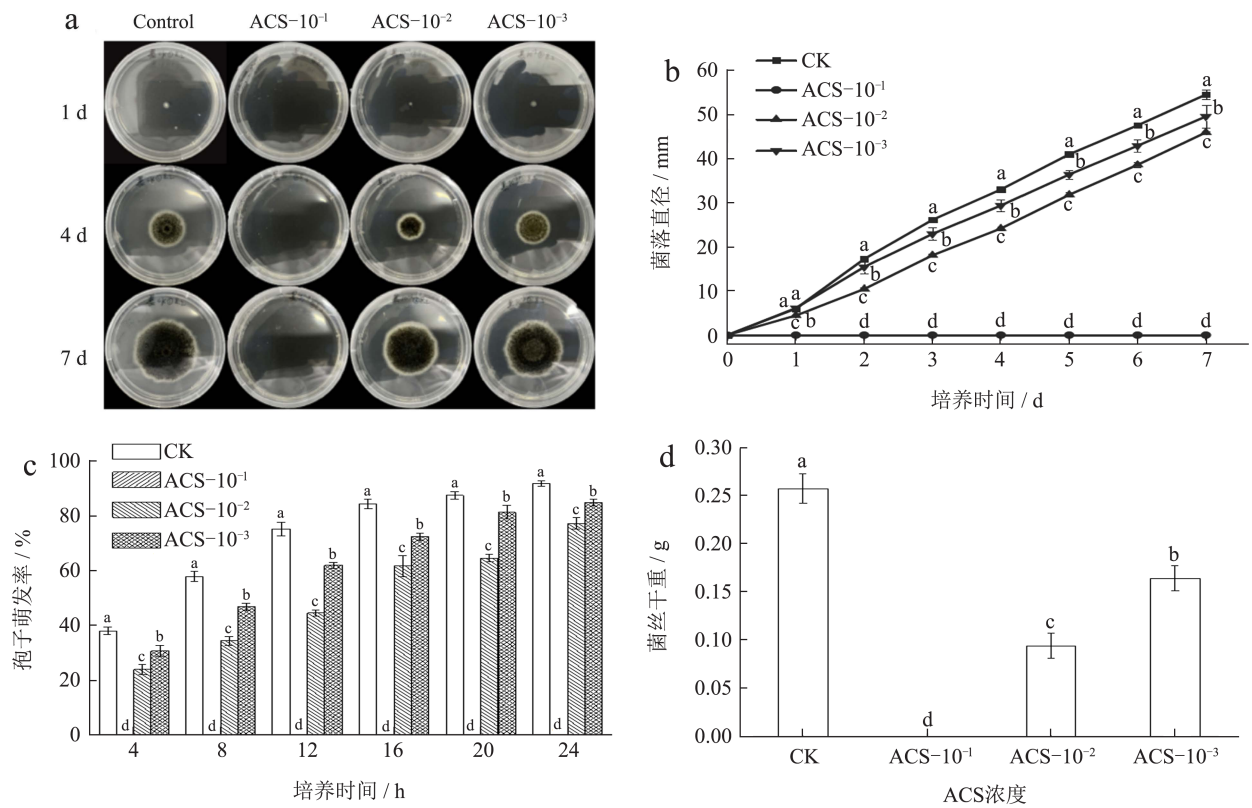


图 1 ACS 处理对黑曲霉 (*A. niger*) 体外的抑制作用

Fig.1 *In vitro* inhibitory effects of ACS treatment on *A. niger*

注：a：对照组和 ACS 处理组培养 7 d 时黑曲霉 (*A. niger*) 生长情况，b：ACS 对 *A. niger* 菌落扩展直径影响，c：ACS 对 *A. niger* 孢子萌发率影响，d：ACS 对 *A. niger* 菌丝干重影响。不同小写字母代表显著性差异 ($P < 0.05$)，ACS 表示酸性硫酸钙 (Acidic calcium sulfate) 下同。

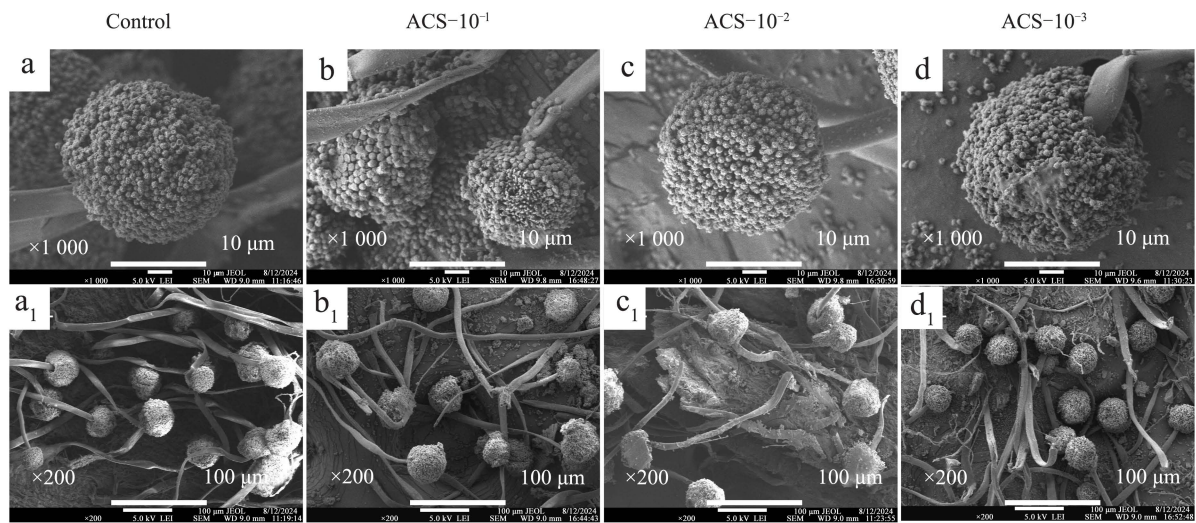


图 2 ACS 处理对 *A. niger* 分生孢子和菌丝形态的影响

Fig.2 Effect of ACS treatment on conidial and mycelial morphology of *A. niger*

2.2 ACS处理对*A. niger*表面微观结构的影响

从图 2a 扫描电镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 中可以清晰发现，CK 处理组的 *A. niger* 菌丝呈现出结实、光滑且完整的形态，分生孢子圆润饱满，与菌丝紧密相连，整体结构完整且健康。ACS 处理组

的 *A. niger* 微观结构发生了显著变化。在图 2c 和 2d 中，ACS-10⁻² 和 ACS-10⁻³ 处理后分生孢子表面出现轻微腐蚀现象，呈现出刻蚀外观，可以观察到囊泡脱落形成的凹坑，表明 ACS 处理已经对分生孢子的结构造成了一定程度的损害。此外，ACS-10⁻¹ 处理 (图 2b)，*A. niger* 的

结构遭受了极为严重的破坏,分生孢子头发生严重塌陷和脱落,菌丝体扭曲萎缩程度加剧,出现破裂现象。ACS处理能够显著破坏 *A. niger* 的微观结构,使其形态发生改变,且破坏程度随着 ACS 质量浓度的增加而加剧。由微观结构可知,ACS 处理导致 *A. niger* 的分生孢子和菌丝体受到不同程度损害,从形态学上直接解释了 ACS 的抑菌机制。

2.3 ACS减压浸泡处理对灰枣体内黑曲霉病发生的抑制作用

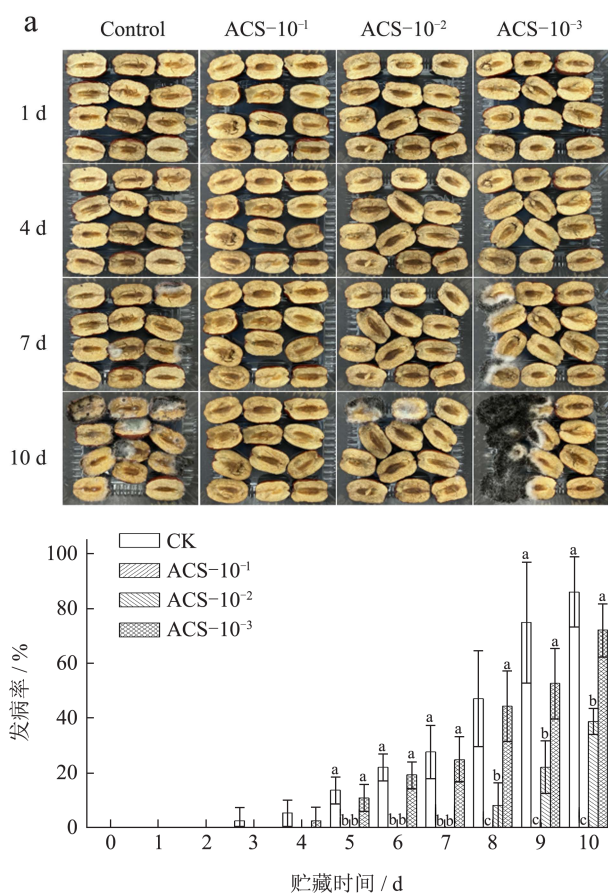


图3 ACS减压浸泡处理对灰枣黑曲霉病的抑制作用

Fig.3 Inhibitory effect of ACS decompression immersion treatment on black currant disease of gray jujube

注: (a) 不同处理组灰枣创面病变症状及 (b) 发病率情况。

在体外试验 ACS 对 *A. niger* 抑制效果的基础上,为了进一步提高 ACS 抑菌效果,减少处理时间,通过减压浸泡技术开展灰枣体内试验,探究 ACS 对灰枣黑曲霉病发生的抑制作用。如图 3a、3b 所示,贮藏 3 d 时,CK 组已经开始出现明显的病变症状,而 ACS 处理组未出现发病现象。随着时间的延长,发病率呈现逐渐上升的趋势。10 d 时,CK 组全部发病,病害情况严重;ACS 处理组发病率均显著低于 CK 组。其中,ACS-10⁻¹ 处理组效果最显著,抑制率高达 100%。

与 CK 组相比,ACS-10⁻² 处理组发病率降低了 47.22% ($P < 0.05$),表现出较强的抑制效果;较低质量浓度的 ACS-10⁻³ 处理组与 CK 组相比发病率无显著性差异,但发病率低于 CK 组,10 d 时发病率降低了 13.89%。通过体内试验发现,ACS 减压浸泡处理能有效降低灰枣黑曲霉病的发病率,ACS-10⁻¹ 处理组的抑制率达 100%,表明该处理能有效防止灰枣在贮藏过程中被黑曲霉侵染。综上所述,ACS 减压浸泡处理在灰枣体内能够有效抑制 *A. niger* 的侵染,显著提升了 ACS 在产业中的应用,降低黑曲霉病的发生风险。

2.4 ACS减压浸泡处理对灰枣自然发病率的影响

干果在贮藏过程中极易受到病原菌的侵染,易引起病害发生,直接影响其食品安全性和商品价值。在图 4 中,贮藏期前 30 d 内,CK 组和 ACS 处理组均未出现明显的病害现象,果实保持相对良好的状态。自 40 d 开始,各处理组出现发病的果实,表明病原菌开始侵染灰枣。随着贮藏时间的延长,发病趋势愈发严重,发病率呈显著上升趋势。60 d 时,ACS 处理组发病率为 5.67%,相较 CK 组降低了 39.29% ($P < 0.05$)。Wang 等^[9]采用 2.5% 和 5% 质量浓度的 ACS 浸泡处理荔枝果实,贮藏 15 d 后 CK 组腐烂率达 48%,而 ACS 处理组未见腐烂,与本试验结论相似。表明,ACS 减压浸泡处理对灰枣表面的病原菌具有显著的抑制作用,能够有效降低灰枣在贮藏过程中的自然发病率,从而延长灰枣的贮藏期。

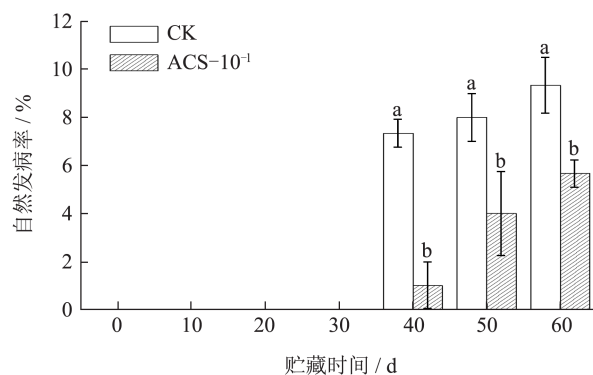


图4 ACS减压浸泡处理对灰枣贮期自然发病率的影响

Fig.4 Effect of ACS decompression soaking treatment on the natural incidence of gray jujube during the storage period

2.5 ACS减压浸泡处理对灰枣贮藏品质参数的影响

2.5.1 ACS减压浸泡对灰枣水分含量、TSS、TA和AsA含量的影响

由图 5a 可知,贮藏期间灰枣水分含量整体呈现下

降趋势,这是果实内部水分不断蒸发所致^[3]。ACS处理组与CK组之间水分变化未表现出显著差异,但ACS处理组的水分含量均高于CK组。在贮藏60 d时,CK组较0 d下降了13.94%,而ACS处理组仅下降了10.95%。表明ACS减压浸泡处理对灰枣贮藏期水分含量的下降具有一定的延缓作用,维持灰枣的原有质地和口感,减少因水分流失导致的品质劣变。

灰枣的TSS呈现出先上升后下降的变化趋势(图5b)。0 d时,CK组和ACS处理组TSS含量相同,糖分等可溶性物质含量相近。在整个贮期,ACS处理组TSS含量始终低于CK组,在10、20、30、40 d时,两组之间差异显著($P<0.05$)。ACS处理组TSS含量的上升和下降速度均小于CK组。这是由于灰枣在贮藏过程中,水分含量降低会促使糖度相对增加,而ACS减压浸泡处理相较于CK组减缓了水分蒸发速度,延缓了TSS含量的下降,有助于维持灰枣口感和风味的稳定性^[14]。

在图5c中,ACS处理组和CK组灰枣TA含量变化趋势基本一致,均呈现波动下降的规律。但ACS处理组均显著高于CK组($P<0.05$)。60 d时,处理组TA含量为CK组的1.08倍($P<0.05$)。这可能是由于ACS处理抑制了有机酸的消耗^[6],维持了TA含量保持在较高水平,这有助于维持灰枣的酸度,保证其良好的口感和风味。

AsA作为灰枣中重要的营养物质和抗氧化剂,其含量在贮藏过程中不断下降(图5d)。但与CK组相比,ACS处理组果实AsA含量下降速度明显减缓,两组间差异显著($P<0.05$)。在60 d时,CK组AsA含量较0 d时下降了10.07%,而处理组仅下降了8.62%($P<0.05$)。表明ACS减压浸泡处理能够有效抑制灰枣果实中AsA的氧化降解,有助于保留灰枣的营养价值和抗氧化特性。

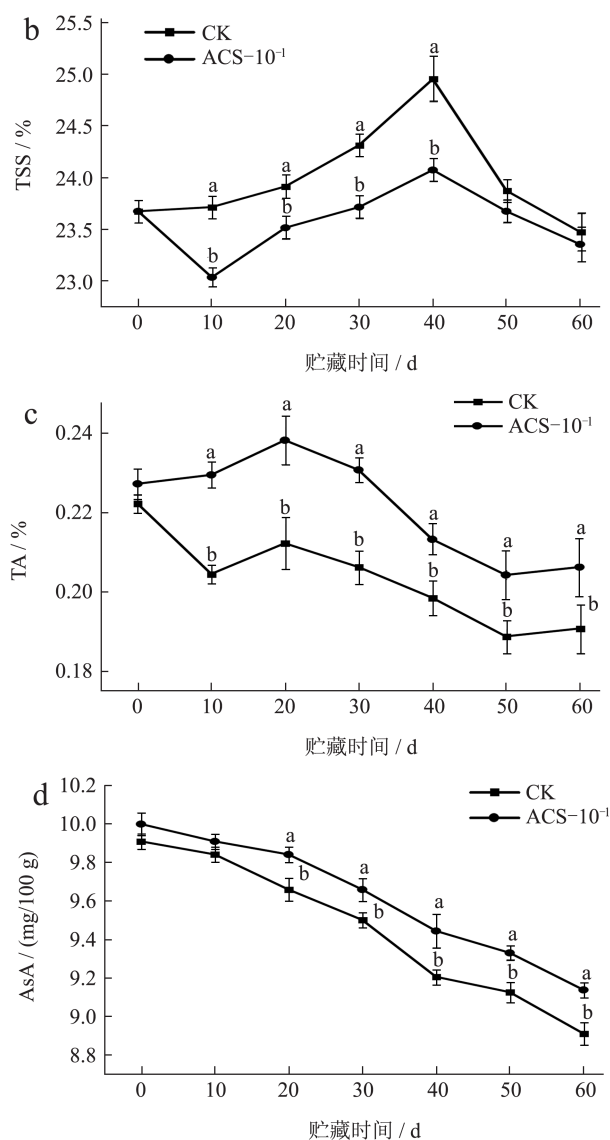
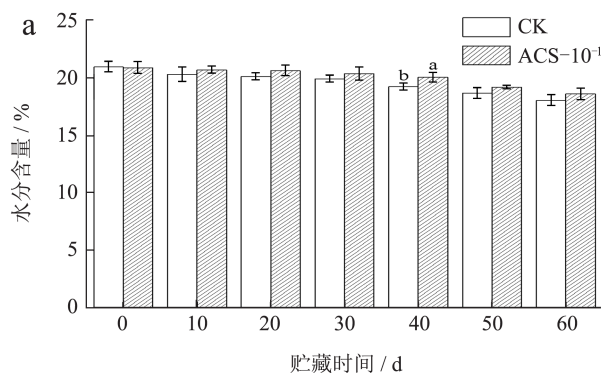


图5 ACS减压浸泡处理对灰枣贮期品质参数的影响

Fig.5 Effects of ACS depressurization soaking treatment on storage quality parameters of Chinese jujubes

注:a:Aw(水分含量),b:TSS(可溶性固形物),c:TA(可滴定酸),d:AsA(抗坏血酸)。

水分含量与干枣质构特性密切相关^[24],本研究中,ACS减压浸泡处理有效减缓了灰枣水分散失,维持了果实较好的质地和口感,ACS处理可能改变了灰枣果皮的通透性,减少了水分的蒸发通道^[21]。灰枣在贮藏期间,TSS含量变化受多种因素影响。贮藏前期,一方面水分含量降低会促使糖度相对增加,另一方面淀粉等大分子降解也会使TSS含量上升,ACS减压浸泡处理减缓了水分蒸发速度,同时可能影响了淀粉降解过程,从而延缓了TSS含量的上升;贮藏后期,由于呼吸代谢消耗,TSS含量下降,ACS处理组TSS下降

幅度小于 CK 组^[3,25,26], 表明 ACS 影响了红枣的呼吸代谢和物质转化过程, 致使 TSS 的生成与消耗趋于平衡。TA 含量在贮藏过程中呈波动下降^[27], TA 下降可能与有机酸的消耗有关^[3], ACS 处理使 TA 含量保持较高水平, 可能是抑制了酸性物质的分解或促进了其合成^[6]。AsA 作为重要营养和抗氧化物质, 易在贮藏中被氧化分解^[28], ACS 处理有效延缓了 AsA 含量下降。Wang 等^[9]和 He 等^[13]通过研究表明 ACS 可以通过调节果实内部的氧化还原环境, 降低活性氧对 AsA 的破坏, 增强了抗氧化酶系统对 AsA 的保护作用; 同时, 较高的酸含量对 AsA 的氧化分解也具有一定的保护作用^[29]。

2.5.2 ACS减压浸泡处理对灰枣表面微生物的影响

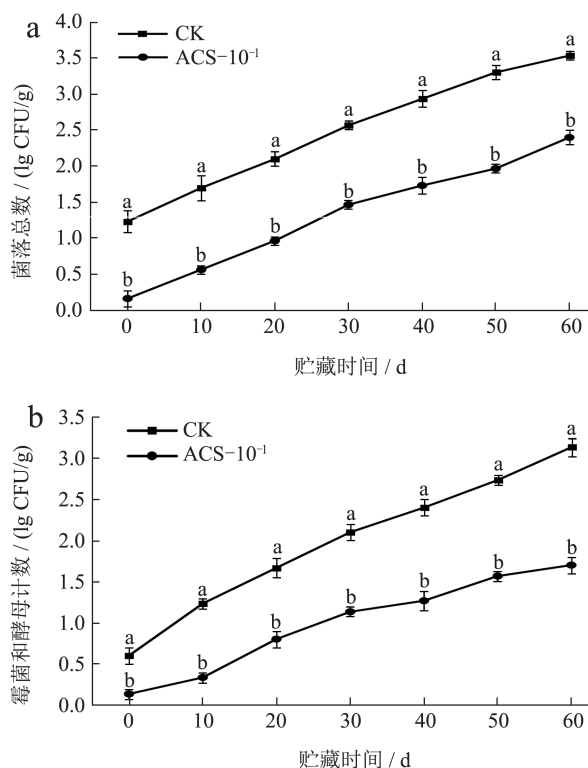


图 6 ACS 减压浸泡处理对灰枣贮期表面微生物的影响

Fig.6 Effect of ACS decompression soaking treatment on surface microorganisms of gray jujube during storage period

干果表面微生物数量超标会对其品质产生严重影响, 微生物的生长代谢会消耗干果中的营养成分, 加速干果的腐败变质速度^[17]。在图 6 中, 灰枣果实表面微生物数量随着时间的延长呈现显著上升趋势, 减压浸泡处理对表面微生物数量具有良好的控制作用, ACS 处理显著 ($P < 0.05$) 低于 CK 组。0 d 时, ACS 减压浸泡处理组菌落总数和霉菌及酵母菌落总数分别下降了 1.07 和 0.47 lg CFU/g ($P < 0.05$); 在 60 d 时, 分别下降了 1.13 和 1.43 lg CFU/g ($P < 0.05$)。表明 ACS 减压浸泡处理能够有效降低灰枣表面细菌、霉菌

和酵母的数量, 减少微生物对灰枣的侵害, 从而降低灰枣果实因微生物污染导致的品质劣变风险, 延长了灰枣的贮藏期。这是由于 ACS 改变了灰枣表面的微生物生存环境, 使其不利于微生物生长繁殖, 或者直接对微生物产生了抑制作用。

3 结论

研究结果表明, ACS 对 *A. niger* 的生长繁殖具有多方面的显著抑制作用, 且呈质量浓度依赖性, ACS-10⁻¹ 处理组能完全抑制 *A. niger* 的菌落生长、孢子萌发和菌丝生长。ACS 处理造成对 *A. niger* 微观结构发生显著变化, 从形态学上为其抑菌机制提供了证据。体内试验发现, ACS 减压浸泡处理能有效降低灰枣黑曲霉病的发病率, ACS-10⁻¹ 处理组抑制率达 100%。此外, ACS 减压浸泡处理对灰枣多个品质参数产生积极影响。有效减缓灰枣水分散失, 抑制 TSS、TA 和 AsA 的下降和分解, 维持了灰枣的原有质地和口感。同时, ACS 减压浸泡处理显著降低了灰枣表面微生物数量, ACS 处理组菌落总数和霉菌及酵母菌落总数均显著低于对照组, 能减少微生物对灰枣的侵害, 降低变质风险, 延长贮藏期。ACS 减压浸泡处理在灰枣贮藏保鲜方面效果显著, 是一种安全且高效的方法。然而, 本研究仅对 ACS 对灰枣黑曲霉病的抑制及贮藏品质的影响进行了初步探讨, 其深层次的作用机制值得进一步研究。

参考文献

- [1] WANG N, LI Q, LIU M, et al. Structural characterization of alkali-extracted jujube polysaccharides and their effects on the fecal microbiota *in vitro* [J]. LWT, 2023, 184: 115087.
- [2] MAO J, SUN H, CAO L, et al. Comparative analysis of the quality characteristics of high-moisture jujube with different degrees of dehydration [J]. LWT, 2024, 198: 116026.
- [3] 陈燕, 张健, 魏佳, 等. 一氧化氮熏蒸抑制干制灰枣黑曲霉病及贮藏品质保持 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 297-303.
- [4] 刘艳祥. 新疆红枣果实两种真菌病害病原鉴定及关键防治技术研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016.
- [5] TIAN S, CHEN Y, WANG Q, et al. Effects of four disease-controlling agents (chlorothalonil, CuCl₂, harpin, and melatonin) on postharvest jujube fruit quality [J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 8209.
- [6] LIU Y, LIU Q, LI X, et al. Effects of postharvest chitosan and potassium sorbate coating on the storage quality and fungal community of fresh jujube [J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 205: 112503.
- [7] 曹家乐, 杨永兴, 连雅丽, 等. 植物精油熏蒸对李光杏干贮藏品质的影响 [J]. 保鲜与加工, 2022, 22(3): 7-14, 20.
- [8] HUANG H, ZHUANG Y, TANG X S, et al. Dietary acidic calcium sulfate enhances growth, digestive enzyme activities, intestinal

- histology and resistance against *Aeromonas hydrophila* in juvenile largemouth bass, *Micropterus salmoides* [J]. *Aquaculture Reports*, 2023, 29: 101467.
- [9] WANG C Y, CHEN H, JIN P, et al. Maintaining quality of litchi fruit with acidified calcium sulfate [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(15): 8658-8666.
- [10] 刘晨霞,乔勇进,黄宇斐,等.酸性硫酸钙处理对水蜜桃采后匍枝根霉致病力的影响[J].*核农学报*,2019,33(7):1377-1385.
- [11] 张恺洳,翟荣臻,米黑里巴,等.酸性硫酸钙对红地球葡萄采后灰霉病的抑制[J].*现代食品科技*,2020,36(8):134-140,353.
- [12] 刘晨霞,乔勇进,黄宇斐,等.酸性硫酸钙对水蜜桃贮藏保鲜效果的研究[J].*上海农业学报*,2019,35(1):80-86
- [13] HE H, LIU C, WANG Q, et al. Acidic calcium sulfate improved chilling tolerance and aroma quality by regulating reactive oxygen species metabolism and biosynthesis of volatiles in peaches[J]. *LWT*, 2025, 215: 117157.
- [14] 王春芳,王娟紫,柳洪入,等.酸性硫酸钙处理对采后鲜糯玉米贮藏品质的影响[J].*食品工业科技*,2024,45(2):300-306.
- [15] LU X, YU S, YU B, et al. Biochemical mechanism of chlorine dioxide fumigation in inhibiting *Ceratocystis fimbriata* and black rot in postharvest sweetpotato[J]. *Food Chemistry*, 2024, 461: 140952.
- [16] YANG F, LIU S, TIAN Z, et al. Calcium disodium edetate controls citrus green mold by chelating Mn^{2+} and targeting pyruvate synthesis in the pathogen [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2023, 206: 112529.
- [17] 陈燕.一氧化氮熏蒸对干果贮期病害抑制及毒素清除作用的研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2020.
- [18] 曹建康,姜微波,赵玉梅.果蔬采后生理生化实验指导[M].北京:中国轻工业出版社,2007.
- [19] GB 4789.2-2022,食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定[S].
- [20] GB 4789.15-2016,食品安全国家标准 食品微生物学检验 霉菌和酵母计数[S].
- [21] 刘晨霞.酸性硫酸钙对水蜜桃采后软腐病的抑制作用及其贮藏品质的研究[D].上海:上海师范大学,2018.
- [22] 吉钟山,谈智,孙巍,等.酸性硫酸钙杀菌因子初探[J].*中国消毒学杂志*,2013,30(5):409-410.
- [23] 付霞丽,郑紫方,马志倩,等.酸性硫酸钙对临床常见致病微生物的杀灭能力[J].*中国农业科学*,2021,54(13):2906-2915.
- [24] WANG J, FENG L. Research article study and application on mathematical model of hot-air drying for red jujubes [J]. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 2015, 9(2): 123-126.
- [25] YAO L I U, LEI X M, GUO Y X, et al. Effects of methionine treatment on storage quality and antioxidant activity of postharvest jujube fruit [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2023, 22(9): 2893-2904.
- [26] MORSY N E, RAYAN A M. Effect of different edible coatings on biochemical quality and shelf life of apricots (*Prunus armenica* L. cv Canino) [J]. *Journal Food Meas Charact*, 2019, 13(4): 3173-3182.
- [27] ISLAM A, ACIKAI M R, OZTURK B, et al. Combined effects of Aloe vera gel and modified atmosphere packaging treatments on fruit quality traits and bioactive compounds of jujube (*Zizyphus jujuba* Mill.) fruit during cold storage and shelf life [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 187: 111855.
- [28] KOU X, HE Y, LI Y, 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.
- [29] CHEN Y, DENG H, ZHANG J, et al. Effect of nitric oxide fumigation on microorganisms and quality of dried apricots during storage [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(12): e15725.