白梦涵, 马俊杰, 陈婉婷, 等. 采前喷施寡雄腐霉菌对采后西梅果实霉腐病和苯丙烷代谢的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(12): 393−400. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050296

BAI Menghan, MA Junjie, CHEN Wanting, et al. Effects of Pre-harvest Spraying of *Pythium oligandrum* on Mold Rot and Phenylpropanoid Metabolism in Postharvest Plum Fruits[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(12): 393−400. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050296

·贮运保鲜·

采前喷施寡雄腐霉菌对采后西梅果实霉腐病和苯丙烷代谢的影响

白梦涵[1], 马俊杰[1], 陈婉婷[1], 金莉莉[1], 唐彭丽[1], 宋娅楠[1], 王　尊[1], 崔宽波[2,*]

（1.新疆农业大学食品科学与药学学院, 新疆乌鲁木齐 830052;
2.新疆维吾尔自治区农业科学院农业装备研究所, 新疆乌鲁木齐 830091）

摘　要: 为探究不同浓度的寡雄腐霉菌（*Pythium oligandrum*，*P. oligandrum*）前处理对西梅果实贮藏期、货架期间贮藏品质及抗病性和苯丙烷代谢的影响，本试验以新疆‘法兰西’西梅为试材，使用寡雄腐霉菌稀释液（750 倍）对采前西梅进行喷施处理，喷洒清水作为对照组（CK），在 4~6 ℃，相对湿度 80%~90% 的条件下贮藏，每隔 8 d 取一次样。结果表明，采前喷施 750 倍寡雄腐霉菌制剂可显著抑制果实硬度下降，较 CK 组高 32.2%（P<0.05）；降低失重率，较 CK 组低了 37.3%；抑制西梅果实的呼吸强度，处理组占 CK 组的 75.2%。同时，采前喷施寡雄腐霉菌处理显著提升了苯丙氨酸解氨酶（PAL）活性，较对照组提高了 17.6%（P<0.05）；肉桂酸-4-羟化酶（C4H）比对照组提升了 26.2%（P<0.05），以及 4-香豆酰-CoA 连接酶（4CL）的活性，也提升了 8.9%，同时促进了总酚、类黄酮和木质素含量的积累。综上所述，寡雄腐霉菌处理可延缓西梅果实采后劣变：维持果实品质特性，增强抗病性延长贮藏期。该试验为西梅的绿色保鲜的工作贡献了理论支撑与技术借鉴。

关键词: 西梅, 寡雄腐霉菌, 采后品质, 采后病害, 苯丙烷代谢

中图分类号: TS255.36　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)12−0393−08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050296　　本文网刊:

Effects of Pre-harvest Spraying of *Pythium oligandrum* on Mold Rot and Phenylpropanoid Metabolism in Postharvest Plum Fruits

BAI Menghan[1], MA Junjie[1], CHEN Wanting[1], JIN Lili[1], TANG Pengli[1], SONG Yanan[1], WANG Zun[1], CUI Kuanbo[2,*]

（1.College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;
2.Institute of Agricultural Equipment, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China）

Abstract: In order to explore the effects of different concentrations of *Pythium oligandrum* pretreatment on the storage quality, disease resistance and phenylpropanoid metabolism of plum fruits during storage and shelf life, Xinjiang 'France' plum was used as the test material in this experiment. The pre-harvest plum was sprayed with *P.oligandrum* diluent (750 times), and the water was sprayed as the control group (CK). It was stored at 4~6 ℃ and relative humidity of 80%~90%, and the samples were taken every 8 days. The results showed that the pre-harvest spraying of 750 times *P. oligandrum* preparation could significantly inhibit the decrease of fruit hardness, which was 32.2% higher than that of CK group (P<0.05). The weight loss rate was reduced by 37.3% compared with the CK group. Inhibit the respiration intensity of plum fruit, the treatment group accounted for 75.2% of the CK group. At the same time, pre-harvest spraying of *P. oligandrum* significantly increased the phenylalanine ammonia lyase (PAL) activity by 17.6% compared with the control group (P<0.05). The cinnamic acid-4-hydroxylase (C4H) was increased by 26.2% (P<0.05) compared with the control group, and

收稿日期: 2025−05−29

基金项目: 自治区重点研发项目（2022B02018-4）; 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目（2022D01A262）; 国家自然科学基金项目（32460613）。

作者简介: 白梦涵（1999−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工贮藏, E-mail: baimenghan0215@163.com。

*** 通信作者:** 崔宽波（1982−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品加工技术, E-mail: 30877141@qq.com。

the activity of 4-coumaroyl-CoA ligase (4CL) was also increased by 8.9%, while promoting the accumulation of total phenol, flavonoids and lignin content. In summary, the treatment of *P. oligandrum* can delay the postharvest deterioration of plum fruits: Maintain fruit quality characteristics, enhance disease resistance and prolong storage period. This experiment provides theoretical support and technical reference for the green preservation of plum fruits.

Key words: prunes; *Pythium oligandrum*; postharvest quality; postharvest diseases; phenylpropanoid metabolism

西梅(*Prunus domestica* L)作为蔷薇科李属的果实,因其独特的营养价值和风味,被誉为第三代功能性水果[1]。该果实色泽鲜艳,酸甜多汁,富含多酚、维生素和矿物质,深受消费者喜爱[2−3]。然而,西梅属于呼吸跃变型果实,成熟期主要集中在高温的 8 月下旬至 9 月上旬。西梅采后由于其呼吸作用增强,代谢活动加剧,加上其高含水特性,极易导致汁液流失、组织软化和微生物侵染,进而加速果实品质下降[4]。鉴于西梅采后易衰老的特性,研究如何通过优化采前处理技术来延长西梅果实的保鲜期具有重要的现实意义。

西梅在采后运输、贮藏和销售阶段易被微生物侵染而引起腐烂,严重影响其品质和保鲜期。西梅病原菌主要包括链格孢菌、灰葡萄孢菌和皮落青霉,其中皮落青霉(*Penicillium crustosum*)侵染引起的霉腐病是西梅果实的主要病害[5]。皮落青霉是一种食源性病原菌,能够产生霉菌毒素、抗菌素等,具有较强的环境适应性,会对人们健康产生不良影响[6]。该菌作为常见的果蔬采后病原菌,在果蔬收获、加工和储存过程中引起腐烂,容易侵染柑橘[7]、油桃[8] 等高糖水果,导致水果腐败劣变。目前对皮落青霉的防治以化学杀菌剂(咪鲜胺、抑霉唑等)为主,但存在耐药风险等问题;新兴生物如利用贝莱斯芽孢杆菌、寡雄腐霉菌等拮抗微生物进行生物防控,具有安全低残,环保无污染等特点。

采前处理作为采后保鲜的基础,通过调控果实的生理状态和环境条件,能够有效提升果实的耐贮性和抗病性,为后续的采后保鲜技术奠定基础[4]。寡雄腐霉菌(*Pythium oligandrum*, *P. oligandrum*)作为一种对植物有益的微生物,通过其独特的生物防治和代谢调节作用[9],能有效延缓果蔬衰老、保持品质,减少采后病害的发生[10]。因其绿色环保、无污染,所以被认为是果蔬保鲜领域的一种新型生物保鲜技术,具有广阔的应用前景[11]。寡雄腐霉菌制剂能够显著抑制果蔬采后病原菌的生长,减少腐烂率,从而延长果蔬的贮藏期[12]。张永春等[13] 研究发现,寡雄腐霉菌处理对草莓果实灰霉病起到了良好的抑制效果,同时降低果实腐烂率,且能保持果实硬度与可溶性固形物含量。此外,Benhamou 等[14] 研究表明,寡雄腐霉菌处理能够延缓番茄果实的软化进程,维持较高的果胶含量和细胞壁完整性,从而延长其货架期。寡雄腐霉菌制剂还能够通过调控苯丙烷代谢相关酶的活性,增强果蔬的抗病性[15]。王正等[16] 研究发现,寡雄腐霉菌处理显著提高了苹果果实中的苯丙氨酸解氨酶、肉桂酸-4-羟化酶和 4-香豆酰-CoA 连接酶的活性,促进了酚类物质的积累,从而增强了果实的抗病性。类似地,赵晓珍等[17] 研究表明,寡雄腐霉菌处理能够诱导桃果实中苯丙烷代谢相关基因的表达,提高酚类物质的含量,延缓果实的衰老进程。这些研究结果表明,寡雄腐霉菌制剂通过激活苯丙烷代谢途径,能够有效提升果蔬的品质和抗病性。

本试验通过采前施用寡雄腐霉菌制剂处理西梅果实,从苯丙烷代谢角度分析其对西梅果实采后保鲜的作用机制,旨在研究寡雄腐霉菌处理对采后西梅果实贮藏保鲜的积极效果,以期为西梅产业的可持续发展提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

‘法兰西’西梅果实　采自新疆喀什地区疏附县当地果园,采后 12 h 内运回。选取大小均匀,果实硬度为 11.5±0.4 N,可溶性固形物为 25%±0.5% 的西梅果实作为实验样品;霉腐病皮落青霉菌　分离自典型西梅发病果实,由新疆农业大学微生物实验室提供;寡雄腐霉菌(有效成分含量:100 万孢子/克;剂型:可湿性粉剂)　捷克生物制剂股份有限公司;草酸、$NaHCO_3$、三氯乙酸、硫酸、盐酸、丙酮、愈创木酚等试剂　均为分析纯,福晨(天津)化学试剂有限公司;辅酶 A(CoA)　麦克林生化科技有限公司;对香豆酸、苯甲基磺酰氟(PMSF)、L-苯丙氨酸　分析纯,北京索莱宝科技有限公司。

GY-4 果实硬度计　温州孙都仪器有限公司;PHS-3C 型 pH 计　上海仪电科学仪器股份有限公司;PAL-1 数字式糖度计　日本 Atago(爱拓)公司;IKAA11 型分析研磨机　艾卡仪器设备有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1　田间喷施寡雄腐霉菌制剂　实验于新疆喀什地区疏附县当地果园,采用随机单株排列的试验设计进行实验,本研究设置 6 个处理组,每组 3 株果树,重复 3 次。选用生长状况(光照、通风及长势)一致的西梅植株,在果实采收前三周(每隔 7 d 喷一次,在采收前 48 h 喷施最后一次)采用稀释倍数分别为 1000 倍、750 倍、500 倍、250 倍、100 倍的寡雄腐霉菌制剂和清水(对照组)进行田间喷施。各处理组均施用 15 kg 的稀释制剂,确保叶片及果实表面完全湿润。采后立即运至研究所冷库贮藏(温度 4~6 ℃ 和相对湿度 90%~95%)。测定六组西梅果实的硬度、色泽、可溶性固形物、维生素 C、可滴定酸含量、失重率、腐烂率、细胞膜渗透率,对比得出效果最好的制剂浓度(750 倍),进行正式的田间实验。

正式实验采用稀释 750 倍的寡雄腐霉菌制剂及清水对照组进行喷施,采后西梅果实(贮藏条件为温

度 4~6 ℃ 和相对湿度 90%~95%)贮藏期每 8 d 取样进行品质、苯丙烷代谢及抗病性测定；贮藏期结束后，将西梅果实放置室温条件下(24±2 ℃)每 2 d 测定一次货架期品质。

1.2.2　损伤接菌　皮落青霉(*Penicillium crustosum*)：参考贾盼盼等[18]方法，采集典型皮落青霉菌发病的西梅果实，取病健交界处组织置于 75% 乙醇溶液中约 30 s，以杀灭杂菌，然后用无菌水反复冲洗组织，将冲洗干净的组织移到配制好的马铃薯葡萄糖琼脂(PDA)培养基上，置于无菌的恒温培养箱中 25 ℃ 保温培养。待菌落形成后采用稀释法进行单孢分离、培养，并进行鉴定和回接试验。将纯化好的菌种接种到斜面 PDA 培养基上，于 4 ℃ 保存待用。

西梅果实的损伤接种方法参照张正敏等[19]的方式进行。选取大小一致、无机械损伤的果实，将果实表面接种处用无水乙醇和无菌水消毒，然后在果实赤道部位用灭菌打孔钉打一个直径为 3.0 mm、深度为 4.0 mm 的小孔，干燥后注射 15 μL 孢子悬浮液，每组选取 30 个果实，重复三次。接种完成时，在塑料筐上放置一层医用纱布，并套上保鲜袋贮藏(温度 5±1 ℃ 和相对湿度 90%~95%)。每个处理组用果 30 个，重复 3 次。每 8 d 取西梅果实进行发病率、病斑直径的测定。

1.2.3　指标测定

1.2.3.1　果实硬度测定　西梅果实硬度采用 GY-4 果实硬度计，每次随机选取 15 个西梅果实围绕赤道选定两点进行测定。

1.2.3.2　果实呼吸强度测定　参照曹建康等[20]方法，采用碱液吸收法测定，单位为 mg/(kg·h)。

1.2.3.3　果实失重率的测定　果实的失重率采用称重法测定，各处理组随机取 1 kg 西梅，每 8 d 称取并记录贮藏期间质量，各组处理重复三次，计算公式为：

$$失重率(\%)=\frac{初始质量-贮藏期间质量}{初始质量}\times 100$$

1.2.3.4　果实 *P. crustosum* 接种发病率、病斑直径测定　接种发病率按照以下公式计算。

$$发病率(\%)=\frac{发病孔数}{总孔数}\times 100$$

病斑直径采用十字交叉法测定，病斑直径≥ 3.0 mm 记为发病孔。

1.2.3.5　总酚和类黄酮含量测定　总酚和类黄酮含量均参照曹建康等[20]的方法进行测定。取 2.0 g 西梅果肉组织，加入 3.0 mL 预先冷却的 1% HCl-甲醇溶液，在冰浴条件下充分研磨粉碎，离心后分别测定上清液在 280 和 325 nm 处的 OD 值，并重复三次。总酚结果以每克鲜样中含有的没食子酸质量表示，类黄酮结果以每克鲜样中含有的芦丁质量表示，单位均为 mg/g FW。

1.2.3.6　苯丙氨酸解氨酶(phenylalanine ammonia-lyase, PAL)活性的测定　PAL 活性参照曹建康等[20]的方法稍作修改。PAL 活性的测定：取 1.0 g 西梅果实样品加入 5.0 mL 预冷的 0.1 mol/L pH8.8 硼酸-硼砂缓冲液(含 40 g/L PVP、2 mmol/L EDTA 和 5 mmol/L β-巯基乙醇)，离心后取上清液测定，单位为 U/g FW。

1.2.3.7　4-香豆酰-辅酶 A 连接酶(4-coumarate: CoA ligase, 4CL)、肉桂酸羟化酶(cinnamate-4-hydroxy-lase, C4H)活性的测定　参照范存斐等[21]的方法稍作修改。4CL 酶活性测定：取 3 g 冷冻果肉组织，加入 3 mL 0.2 mol/L Tris-HC1 缓冲液(含 25% 甘油、0.1 mol/L DTT、pH8.0)及少量石英砂，然后于 4 ℃、15000×g 条件下离心，收集上清液并立即用于酶活测定；C4H 活性测定：取3 g 冷冻果肉组织，加入 5 mL 提取液 [50 mmol/L pH8.9 Tris-HCI 缓冲液，15 mmol/L β-巯基乙醇，4 mmol/L $MgCl_2$，5 mmo/L V_C，10 μmol/L 亮抑酶肽，1 mmol/L pMSF，0.15%(w/v) PVP，10% 甘油]，在冰浴条件下充分研磨于 4 ℃、12000×g 下离心 20 min，取上清液即为 C4H 粗酶提取液，构建反应体系，并立即在 340 nm 处比色。

1.2.3.8　木质素含量的测定　木质素含量采用北京盒子生工科技有限公司试剂盒测定。

1.3　数据处理

本试验用 Excel 2022 处理基础数据，使用 SPSS 27.0 开展方差分析操作，运用 Duncan's 法对差异显著性进行剖析。$P<0.05$ 代表该指标存在显著性差异，$P<0.01$ 代表该指标存在极显著性差异，*表示同一贮藏时间组间呈显著差异 $P<0.05$，通过 Origin 2024 绘图。

2　结果与分析

2.1　寡雄腐霉菌处理对西梅硬度的影响

如图 1 所示西梅在贮藏 48 d 并继续 7 d 货架期后，西梅硬度整体都呈现下降趋势，但处理组的西梅硬度均高于对照组。贮藏到第 48 d 时，寡雄腐霉菌处理组的西梅硬度比 CK 组高 32.2%($P<0.05$)。在货架期开始后，寡雄腐霉菌处理组西梅果实硬度显著高于对照组($P<0.05$)，在货架期结束时(第 7 d)，寡雄

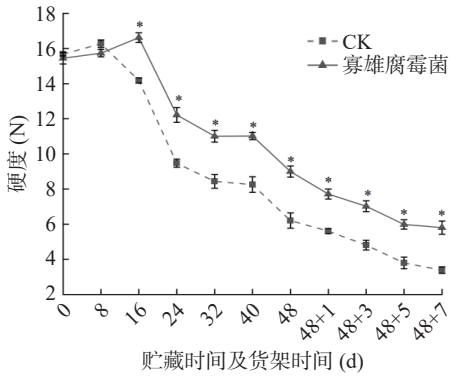


图 1　寡雄腐霉菌处理对西梅硬度的影响

Fig.1　Effect of *Pythium oligandrum* treatment on the hardness of plum

注：*表示同一贮藏时间差异显著($P<0.05$)，图 2~图 6 同。

腐霉菌处理组是 CK 组的 1.7 倍。这说明采前喷施寡雄腐霉菌制剂能抑制西梅果实硬度的下降。

2.2　寡雄腐霉菌处理对西梅呼吸强度的影响

如图 2 所示，西梅果实的呼吸强度整体先上升后下降。在贮藏期的第 24 d 时，CK 组出现呼吸高峰，而处理组在贮藏期的第 32 d 时出现呼吸高峰，比 CK 组晚 8 d 出现。相较于 CK 组，寡雄腐霉菌处理组的呼吸高峰降低了 15.8%（P<0.05）。在贮藏期结束时，寡雄腐霉菌处理组的呼吸强度是 13.4 mg/(kg·h)，是 CK 组的 82.3%，到货架期结束时，寡雄腐霉菌处理组占 CK 组的 75.2%。结果表明，采前施用寡雄腐霉菌能够降低西梅在贮藏及货架期的呼吸强度，显著改善保鲜效果。

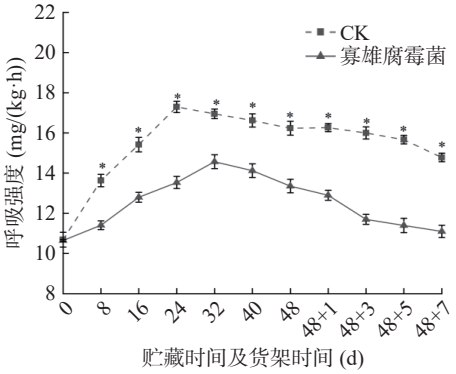


图 2　寡雄腐霉菌处理对西梅呼吸强度的影响

Fig.2　Effect of *Pythium oligandrum* treatment on respiration intensity of *Prunus mume*

2.3　寡雄腐霉菌处理对西梅失重率的影响

采后西梅在贮藏期间和货架期间主要是消耗自身的营养来供给能量，这个过程伴随着西梅的失水过程，继而造成西梅果实失重[22−23]。如图 3 所示，西梅果实的失重率整体呈现上升趋势，在贮藏 24 d 后，与对照组相比，处理组的西梅失重率显著降低（P<0.05）。贮藏结束时，CK 组的失重率为 5.4%，而寡雄腐霉菌处理组的失重率为 3.4%，是 CK 组的 62.7%（P<0.05）。这可能是因为寡雄腐霉菌制剂的前处理调控了西梅果实呼吸与蒸腾作用，进而使得养分消耗及水分流失有所下降。因此，处理组在贮藏期和货架期相比于 CK 组均可显著降低西梅的失重率。

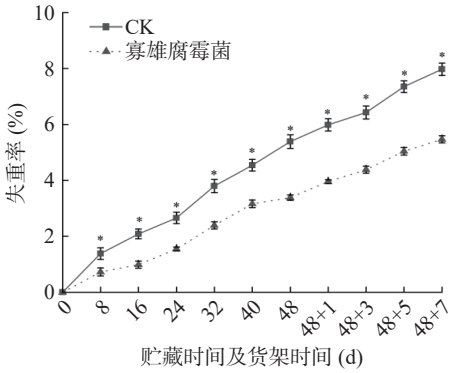


图 3　寡雄腐霉菌处理对西梅失重率的影响

Fig.3　Effect of *Pythium oligandrum* treatment on weight loss rate of plum

2.4　寡雄腐霉菌处理对的西梅果实发病率和病斑直径的影响

如图 4a 所示，在贮藏第 16 d，CK 组发病，1/750

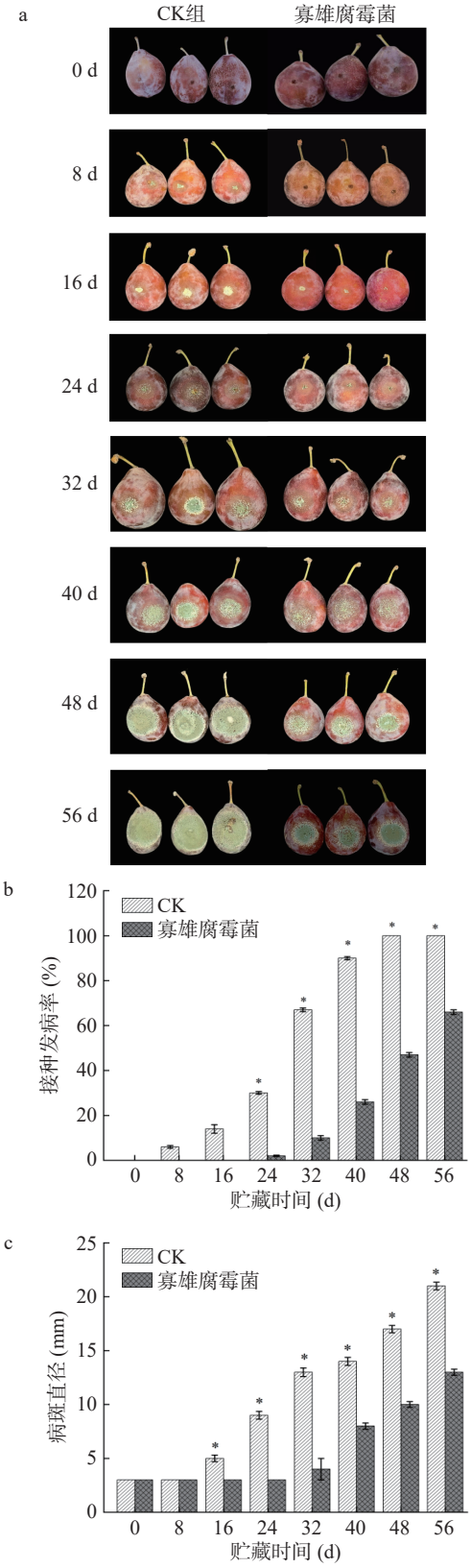


图 4　寡雄腐霉菌处理对西梅接种果实外观(a)、发病率(b)、病斑直径(c)的影响

Fig.4　Effects of *Pythium oligandrum* treatment on appearance (a) inoculation incidence (b) and lesion diameter (c) of *Prunus mume*

处理组贮藏到 32 d 才发病。但采前施用寡雄腐霉菌的处理组明显抑制了西梅果实的发病。

如图 4b 所示，在贮藏到第 8 d 时，对照组开始发病，发病率为 6.0%，但是寡雄腐霉菌处理组并未发病。寡雄腐霉菌处理组在贮藏第 24 d 才出现发病症状，较对照组延迟 16 d。此时寡雄腐霉菌处理组发病率仅为 2.0%，低于对照组的 30.0%，仅为对照组的 6.7%。贮藏 56 d 时，寡雄腐霉菌处理组累计发病率较对照组降低了 34.0%（P<0.05）。

如图 4c 所示，贮藏第 16 d 开始，对照组的病斑直径开始增长，而寡雄腐霉菌处理组到第 32 d 时病斑直径才开始增长。贮藏第 32 d 时，对照组和寡雄腐霉菌处理组的病斑直径分别为 13 mm 和 4 mm。贮藏结束时，寡雄腐霉菌处理组西梅病斑直径较对照组减少 38.1%（P<0.05）。

2.5　寡雄腐霉菌处理对西梅果实 PAL、C4H、4-CL 活性的影响

如图 5a 所示，处理组和对照组的 PAL 活性都是先上升后下降的趋势，但是西梅果实经寡雄腐霉菌处理后，其 PAL 酶活性得到了显著的提升（P<0.05）。西梅果实贮藏初期，无论是否经过寡雄腐霉菌处理，其苯丙氨酸解氨酶活性都迅速升高，并在贮藏到第 32 d，CK组的活性达到最大值（16.7 U/g）；而寡雄腐霉菌处理组在贮藏到 40 d 时达到最大值为 19.6 U/g。寡雄腐霉菌处理组的最高值比 CK 组的最高值高了 17.6%。而后，西梅果实的 PAL 活性逐渐下降。如图 5b 所示，经寡雄腐霉菌处理的西梅，在贮藏第 40 d 时 C4H活性达到 4.19 U/L 的峰值，较同期未处理组高出 26.2%（P<0.05）。至整个贮藏期和货架期结束，处理组的 C4H 活性分别比对照组高 31.1% 和 33.6%（P<0.05）。寡雄腐霉菌处理组和对照组的西梅果实 4CL 活性的变化如图 5c 所示，对照组和寡雄腐霉菌处理组的西梅果实 4CL 活性整体呈现明显的上升趋势。但是西梅果实经寡雄腐霉菌处理后 4CL 的活性始终高于 CK 组。在贮藏期结束和货架期结束时，寡雄腐霉菌处理组西梅果实的 4CL 活性分别为 458.1、575.3 U/L，CK 组的西梅果实 4-CL 活性为 424.0、528.2 U/L，处理组比对照组高 8.0%、8.9%（P<0.05）。

结果表明，采前喷施 750 倍稀释寡雄腐霉菌可以增加西梅果实抗病性相关酶的活性，PAL、C4H、4CL 是代表性的抗病性相关酶，从而增强西梅果实贮藏期间的抗病性。

2.6　寡雄腐霉菌处理对西梅果实苯丙烷代谢产物积累的影响

如图 6a 所示，在整个贮藏期和货架期，西梅果实的总酚含量整体呈上升趋势。寡雄腐霉菌前处理组的西梅果实中的总酚含量一直高于对照组（P<0.05）。其中贮藏第 40 d，寡雄腐霉菌处理组和 CK 组总酚

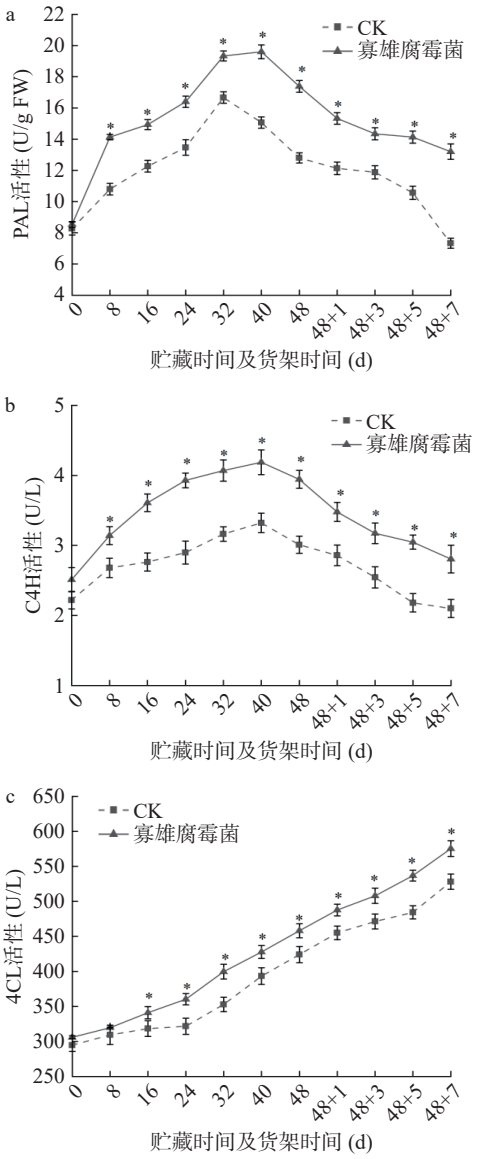


图 5　寡雄腐霉菌处理对西梅果实 PAL(a)、C4H(b)、4CL(c)活性的影响

Fig.5　Effects of *Pythium oligandrum* treatment on PAL (a), C4H (b) and 4CL (c) activities in *Prunus mume* fruits

含量差异最显著，寡雄腐霉菌前处理西梅果实总酚含量比 CK 组果实高出 8.5%（P<0.05）。如图 6b 所示是西梅果实类黄酮含量的变化，贮藏第 32 d 时，寡雄腐霉菌处理组和 CK 组西梅果实类黄酮含量均出现峰值，寡雄腐霉菌前处理果实的类黄酮含量高出对照 5.9%（P<0.05）。在贮藏期结束时，寡雄腐霉菌处理的西梅果实类黄酮含量比对照组高 4.5%（P<0.05）；而货架期结束时高出 7.8%。如图 6c 所示，在整个贮藏期和货架期间，西梅果实中的木质素含量整体呈现明显的上升趋势，贮藏到第 32 d 时，寡雄腐霉菌处理组是对照组的 1.1 倍（P<0.05）。在货架期结束时，寡雄腐霉菌处理组木质素含量较对照组显著提高了 12.1%（P<0.05）。

结果说明，寡雄腐霉菌前处理可促进西梅果实的苯丙烷代谢中 PAL、C4H、4CL 活性，从而增加总酚、类黄酮、木质素这些次生代谢产物含量的积累。

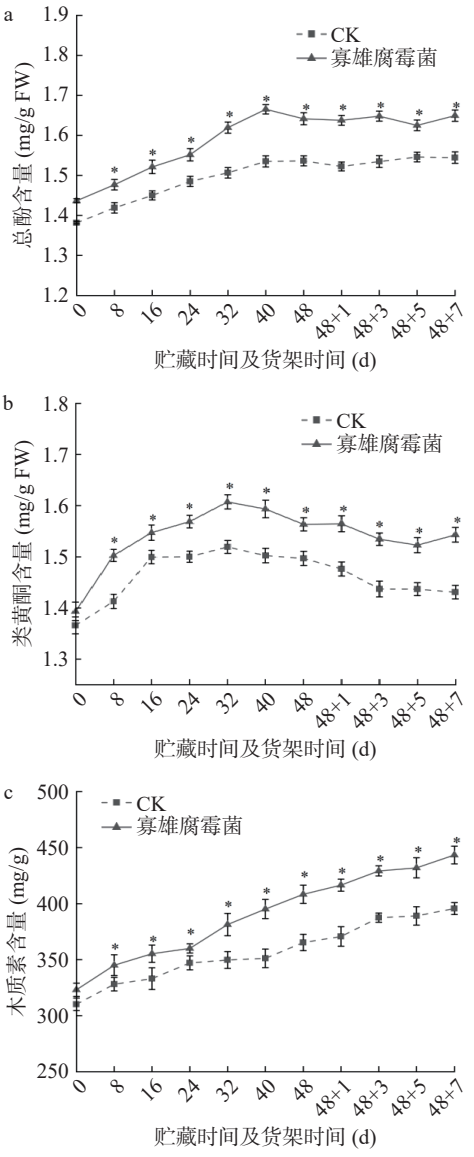


图 6 寡雄腐霉菌处理对西梅果实总酚(a)、类黄酮(b)、木质素(c)含量的影响

Fig.6 Effects of *Pythium oligandrum* treatment on the contents of total phenols (a), flavonoids (b) and lignin (c) in *Prunus mume* fruit

3 讨论

寡雄腐霉菌可作为一种安全无毒害的生物诱导因子,可显著抑制病原菌的侵染,增强采后水果抗病性。本试验研究了采前喷施稀释 750 倍的寡雄腐霉菌制剂对采后西梅果实硬度、呼吸强度、失重率的影响,实验结果表明采前喷施寡雄腐霉菌可显著改善西梅果实采后品质,这一发现与多项前人研究结果相呼应,如余冬冬等[24] 在草莓上的研究表明,寡雄腐霉菌处理能有效改善果实品质,促进植株生长;Tyagi 等[25] 研究发现寡雄腐霉菌能通过诱导植物防御反应延缓番茄果实衰老,间接维持采后品质(如硬度、呼吸强度等)。本试验中处理组的西梅硬度明显高于对照组(P<0.05),这与钱井等[26] 在番茄上的研究结果高度一致,他们发现寡雄腐霉菌能显著延缓果实软化进程。本试验中寡雄腐霉菌处理的西梅腐烂率下降,类似地,谭艳等[27] 指出寡雄腐霉发酵液能显著抑制青、绿霉菌丝生长和孢子萌发,且对柑橘果实的品质无显著影响,这与本研究中寡雄腐霉菌的作用模式一致。

研究表明,苯丙烷代谢产物不仅参与植物防御反应[28],更直接影响果蔬采后品质特性:花青素和类黄酮决定果实色泽[29],酚酸类物质影响风味特征,木质素沉积则调控果实质地。本试验通过研究采前喷施寡雄腐霉菌对采后西梅霉腐病的影响,在破损接种试验中,处理组皮落青霉的接种发病率和病斑直径与对照组呈显著性差异(P<0.05),说明寡雄腐霉菌制剂能够抑制皮落青霉侵染扩展,从而降低病斑直径及发病率。此结果与李伟山等[30] 在辣椒上的结果相似,寡雄腐霉菌处理能显著降低辣椒疫病的病情指数,且对辣椒具有促生效果。苯丙烷代谢是植物重要的防御性次生代谢途径,其产生的多种次级代谢产物在抵御病原菌侵染过程中发挥关键作用[31]。苯丙烷代谢作为植物重要的次生代谢途径,通过 PAL、C4H 和 4CL 等关键酶的级联催化作用[32],将 L-苯丙氨酸逐步转化为反式肉桂酸、酚酸及其衍生物[27]。PAL、4CL 和 C4H 是代表性的抗性相关酶,其参与宿主对各种胁迫的抗性[33]。李丽花等[34] 证实,通过外源处理调控该代谢途径可显著提高杏果实中总酚和类黄酮含量,同时发现代谢强度与品质保持存在剂量效应关系,过度激活反而会导致组织木质化等不良变化。这些发现为通过精准调控苯丙烷代谢来改善果蔬采后品质提供了理论依据。本实验结果表明,采前喷施寡雄腐霉菌处理,与对照组相比显著提高了西梅果实的 PAL、4CL 和 C4H 的活性,还促进了贮藏期间和货架期间总酚、木质素与类黄酮含量的积累,这种效应可能源于寡雄腐霉菌作为生物诱导剂激活了果实的防御系统,其代谢产物刺激了苯丙烷代谢途径的活化[35]。寡雄腐霉菌处理促使果实中酚类物质的生物合成显著增强,不仅提高了总酚和类黄酮等抗氧化物质的含量,还促进了木质素的积累,从而增强了细胞壁的结构完整性[36]。与刘筱等[37] 和李伟山等[35] 在其他水果中的研究结果一致,这表明寡雄腐霉菌处理对苯丙烷代谢的激活作用具有普遍性。特别值得注意的是,这种处理效果在货架期仍能持续保持,说明其对果实品质的改善具有持久效应。

4 结论

本研究结果表明,采前喷施寡雄腐霉菌能有效减缓西梅果实硬度的下降,抑制果实呼吸强度的上升,降低西梅果实的失重率,维持西梅果实的贮藏品质。此外,采前寡雄腐霉菌处理可显著提高西梅果实贮藏及货架期苯丙烷代谢关键限速酶(PAL、C4H 和 4CL)活性,进而促进总酚、木质素和类黄酮这些次生代谢产物含量积累,从而增强果实抗性与贮藏稳定性。综上,本试验通过探究采前喷施寡雄腐霉菌制剂对采后西梅果实贮藏及货架期间品质和抗病性的影

响，为寡雄腐霉菌制剂处理延缓西梅果实采后劣变提供新思路，为绿色保鲜技术开发提供了理论依据。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

［1］王艺菡，王永刚，王剑瑞，等. 欧洲李(西梅)的原产地与保护利用[J]. 新疆林业，2021(4)：29−31. ［WANG Yihan, WANG Yonggang, WANG Jianrui, et al. Origin, protection and utilization of European plum (*Prunus mume*)[J]. Forestry of Xinjiang, 2021(4): 29−31.］

［2］尼格尔热依·亚迪卡尔，朱璇，冯作山，等. ‘法兰西’西梅多酚组分鉴定及抗氧化活性评价[J]. 中国农学通报，2023, 39(34)：143−153. ［NIGARY Yadikar; ZHU Xuan, FENG Zuoshan, et al. Component identification and antioxidant activity evaluation of polyphenols from *Prunus domestica* ‘French'[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(34): 143−153.］

［3］王有信，毕研安，侯瑞斌，等. 优系大果法兰西西梅品种主要性状及栽培技术要点[J]. 果农之友，2024(1)：37−39. ［WANG Youxin, BI Yan'an, HOU Ruibin, et al. Main characters and cultivation techniques of superior French prune variety with big fruit[J]. Fruit Growers' Friend, 2024(1): 37−39.］

［4］张新祺，李文博，赵亚婷，等. 西梅果实采后病原真菌的分离鉴定及 LED 蓝光对其抑制作用[J]. 食品工业科技，2025, 46(17)：224−231. ［ZHANG Xinqi, LI Wenbo, ZHAO Yating, et al. Isolation and identification of postharvest pathogenic fungi of prune fruits and their inhibition by LED blue light[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(17): 224−231.］

［5］WANG Shengqiang, YANG Zhu, ZHANG Tingfu, et al. Molecular characterization of a chrysovirus isolated from the *Citrus* Pathogen *Penicillium crustosum* and related fungicide resistance analysis[J]. Frontiers in Cellular and Infection Microbiology, 2019, 9: 156.

［6］LOUW J P, KORSTEN L. Pathogenicity and host susceptibility of *Penicillium* spp. on *Citrus*[J]. Plant Disease, 2015, 99(1): 21−30.

［7］LOUW J P, KORSTEN L. Postharvest decay of nectarine and plum caused by *Penicillium* spp[J]. European Journal of Plant Pathology, 2016, 146(4): 779−791.

［8］田全明，殷贝贝，祁华梅，等. 采前喷施 CaCl_2 对西梅采后果实软化品质的影响[J]. 新疆农业科学，2024, 61(7)：1717−1726. ［TIAN Quanming, YAN Beibei, QI Huamei, et al. Effect of preharvest spraying of $CaCl_2$ on postharvest fruit softening quality of prunes[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024, 61(7): 1717−1726.］

［9］DARGIRI S A, NAEIMI S, NEKOUEI M K. Enhancing wheat resilience to salinity: The role of endophytic *Penicillium chrysogenum* as a biological agent for improved crop performance[J]. BMC Plant Biology, 2025, 25(1): 354.

［10］彭轶楠，王沛雅，巩晓芳，等. 生防真菌寡雄腐霉原生质体的制备及再生[J]. 菌物学报，2017, 36(6)：679−690. ［PENG Yinan, WANG Peiya, GONG Xiaofang, et al. Preparation and regeneration of protoplasts from *Pythium oligandrum*[J]. Mycosystema, 2017, 36(6): 679−690.］

［11］BĚLONOŽNÍKOVÁ K, HÝSKOVÁ V, CHMELÍK J, et al. *Pythium oligandrum* in plant protection and growth promotion: Secretion of hydrolytic enzymes, elicitors and tryptamine as auxin precursor[J]. Microbiological Research, 2022, 258: 126976.

［12］王子洋，熊雨洁，冯发运，等. 寡雄腐霉对禾谷镰刀菌防效及其产孢诱导剂筛选[J]. 江苏农业科学，2023, 51(18)：101−107. ［WANG Ziyang, XIONG Yujie, FENG Fayun, et al. Control effect of *Pythium oligandrum* against *Fusarium graminearum* and screening of its pathogen inducers[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(18): 101−107.］

［13］张永春，王发鹏，杨军，等. 不同药剂对烟草黑胫病的防治效果[J]. 贵州农业科学，2011, 39(12)：142−144. ［ZHANG Yongchun, WANG Fapeng, YANG Jun, et al. Control effect of eight different pesticides against tobacco black shank[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2011, 39(12): 142−144.］

［14］BENHAMOU N, Le FLOCH G, VALLANCE J, et al. *Pythium oligandrum*: An example of opportunistic success[J]. Microbiology, 2012, 158(11): 2679−2694.

［15］唐勇，吴化雨，赵平，等. 6'-O-咖啡酰熊果苷处理通过激活苯丙烷代谢提高采后蓝莓果实对灰霉病的抗性[J]. 食品科学，2024, 45(13)：256−263. ［TANG Yong, WU Huayu, ZHAO Ping, et al. 6'-O-caffeoylarbutin treatment improves the resistance to gray mold of postharvest blueberry fruit by activating phenanthrene metabolism[J]. Food Science, 2024, 45(13): 256−263.］

［16］王正，李新，张建贵，等. 外源褪黑素介导抗氧化和苯丙烷代谢提高燕麦叶斑病抗性的研究[J]. 草业学报，2024, 33(10)：135−146. ［WANG Zheng, LI Xin, ZHANG Jiangui, et al. Exogenous melatonin mediates the antioxidant system and phenylpropanoid metabolism to induce resistance to leaf spot disease in oat[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(10): 135−146.］

［17］赵晓珍，马玉华，张洪礼，等. 桃果实中酚类物质及其生物活性的研究进展[J]. 贵州农业科学，2019, 47(9)：83−87. ［ZHAO Xiaozhen, MA Yuhua, ZHANG Hongli, et al. Research progress in biological activity of phenolic substance in peach fruit[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2019, 47(9): 83−87.］

［18］贾盼盼，刘晓丹，吝晨晨，等. 壳寡糖对杏果实采后主要病原菌抑菌作用的研究[J]. 新疆农业科学，2012, 49(2)：290−295. ［JIA Panpan, LIU Xiaodan, LIN Chenchen, et al. Study on influencing factors of the antifungal activity on the main postharvest disease-producing fungus of apricot fruit by oligochitosan[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2012, 49(2): 290−295.］

［19］张正敏，杨艺琳，李美琳，等. 2, 4-表油菜素内酯处理对桃果实软腐病及能量代谢的影响[J]. 食品科学，2019, 40(5)：207−213. ［ZHANG Zhengmin, YANG Yilin, LI Meilin, et al. Effect of 2, 4-epibrassinolide treatment on *Rhizopus* rot and energy metabolism in postharvest peach fruit[J]. Food Science, 2019, 40(5): 207−213.］

［20］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. ［CAO Jiankang, JIANG Weibo, ZHAO Yumei. Guidance on postharvest physiological and biochemical experiments of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.］

［21］范存斐，毕阳，王云飞，等. 水杨酸对厚皮甜瓜采后病害及苯丙烷代谢的影响[J]. 中国农业科学，2012, 45(3)：584−589. ［FAN Cunfei, BI Yang, WANG Yunfei, et al. Effect of salicylic acid dipping on postharvest diseases and phenylpropanoid pathway in muskmelon fruits[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(3): 584−589.］

［22］康晨，吴珏，姜安泽，等. 贮藏温度对“黄妃”樱桃番茄果实品质的影响[J]. 中国食品学报，2023, 23(4)：295−304. ［KANG Chen, WU Jue, JIANG Anze, et al. The effects of storage temperature on the quality of 'Huangfei' cherry tomato[J]. Journal of Chi-

nese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(4): 295−304.]
[23] 李伊涵. 采后褪黑素处理对‘金冠’苹果贮藏品质和苯丙烷代谢的影响[D]. 锦州: 渤海大学, 2021. [LI Yihan. Effects of postharvest melatonin treatment on the storage quality and phenylpropanoid metabolism of apple fruit (cv. Golden delicious)[D]. Jinzhou: Bohai University, 2021.]
[24] 余冬冬, 李永军. 不同微生物菌剂对草莓灰霉病的防治效果、植株生长及果实品质的影响[J]. 浙江农业科学, 2023, 64(10): 2482−2486. [YU Dongdong, LI Yongjun. Effects of different microbial agents on the control of gray mold, plant growth, and fruit quality of strawberry[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2023, 64(10): 2482−2486.]
[25] TYAGI K, MAOZ I, KOCHANEK B, et al. Cytokinin but not gibberellin application had major impact on the phenylpropanoid pathway in grape[J]. Horticulture Research, 2021, 8: 51.
[26] 钱井, 郑鄢燕, 李蔚, 等. 1-甲基环丙烯结合寡雄腐霉菌对番茄贮藏品质的影响[J]. 食品科技, 2023, 48(9): 23−29. [QIAN Jing, ZHENG Yanyan, LI Wei, et al. Effects of 1-methylcyclopropene combined with *Pythium oligandrum* on storage quality of tomato[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(9): 23−29.]
[27] 谭艳, 彭良志, 袁玲, 等. 寡雄腐霉发酵液的动物毒性及其对柑橘果实贮藏期青、绿霉病的防治效果[J]. 微生物学报, 2015, 55(11): 1418−1426. [TAN Yan, PENG Liangzhi, YUAN Ling, et al. Toxicity of *Pythium oligandrum* broth to animal and its control effect on rot diseases caused by *Penicillium italicum* and *Penicillium digitatum* in orange fruit storage[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2015, 55(11): 1418−1426.]
[28] NICHOLSON R L, HAMMERSCHMIDT R. Phenolic compounds and their role in disease resistance[J]. Annual Review of Phytopathology, 1992, 30: 369−389.
[29] DIXON R A, PAIVA N L. Stress-induced phenylpropanoid metabolism[J]. The Plant Cell, 1995, 7(7): 1085.
[30] 李伟山, 纠敏, 周冬梅, 等. 寡雄腐霉 GAQ1 对辣椒疫病的防效及对辣椒的促生作用[J]. 植物保护学报, 2022, 49(3): 956−965. [LI Weishan, JIU Min, ZHOU Dongmei, et al. Biological control and growth-promotion effects of mycoparasitic fungus *Pythium oligandrum* GAQ1 against *Phytophthora blight* in pepper[J]. Journal of Plant Protection, 2022, 49(3): 956−965.]
[31] 黄玉平, 彭文娟, 张瑜, 等. NO 处理对草莓果实采后品质和苯丙烷类代谢的影响[J]. 核农学报, 2016, 30(10): 8. [HUANG Yuping, PENG Wenjuan, ZHANG Yu, et al. Effects of nitric oxide treatment on quality and phenolic metabolism in strawberry fruit[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2016, 30(10): 8.]
[32] VOGT T. Phenylpropanoid biosynthesis[J]. Molecular Plant, 2010, 3(1): 2−20.
[33] SHAO Yuanzhi, ZENG Jiaoke, TANG Hong, et al. The chemical treatments combined with antagonistic yeast control anthracnose and maintain the quality of postharvest mango fruit[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(5): 1159−1169.
[34] 李丽花, 张瑞杰, 姚远丽, 等. 24-表油菜素内酯调控苯丙烷代谢增强杏果实抗病性的研究[J]. 现代食品科技, 2017, 33(9): 71−76,19. [LI Lihua, ZHANG Ruijie, YAO Yuanli, et al. 24-epibrassinolide enhances disease resistance in apricot fruits via regulation of phenylpropanoid metabolism[J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(9): 71−76,19.]
[35] 李伟山. 寡雄腐霉 GAQ1 防治根结线虫和辣椒疫病效果评估及机理研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2022. [LI Weishan. Evaluation and mechanism of *Pythium oligandrum* GAQ1 in preventing and controlling root-knot nematode and pepper blight diseases[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2022.]
[36] 姜爱丽, 胡文忠, 孟宪军, 等. 外源水杨酸处理对采后蓝莓果实苯丙烷代谢的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(6): 334−337,341. [JIANG Aili, HU Wenzhong, MENG Xianjun, et al. Effects of exogenous salicylic acid treatment on phenylproanoid metabolic system of postharvest blueberry fruits[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(6): 334−337,341.]
[37] 刘筱, 潘静宇, 李永才, 等. 寡雄蛋白(Oligandrin)处理对马铃薯块茎干腐病及苯丙烷代谢的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(6): 339−344,369. [LIU Xiao, PAN Jingyu, LI Yongcai, et al. Effects of oligandrin treatment on dry rot and phenylpropanoid pathway metabolism of potato tubers[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(6): 339−344,369.]