范雅青, 朱璇, 赵亚婷, 等. 外源 NO 介导能量代谢影响冬枣果实贮藏品质 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(17): 478−484. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100051

FAN Yaqing, ZHU Xuan, ZHAO Yating, et al. Exogenous NO Mediates Energy Metabolism and Affects the Storage Quality of Winter Jujube Fruits[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 478−484. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100051

· 贮运保鲜 ·

外源 NO 介导能量代谢影响冬枣果实贮藏品质

范雅青, 朱　璇*, 赵亚婷*, 张新祺, 吴颖颉, 张　璇
（新疆农业大学食品科学与药学学院, 新疆乌鲁木齐 830052）

摘　要: 为探究一氧化氮（Nitric oxide，NO）处理对采后冬枣果实品质的影响，选取白熟期冬枣果实，用 50 μmol/L 的硝普钠（NO 供体）溶液进行减压渗透处理（0.01 MPa 下浸泡 5 min，常压下浸泡 10 min），以蒸馏水处理作为对照。将果实放入温度为 20±1 ℃、相对湿度保持在 90%~95% 的贮藏库中进行贮藏，定期测定品质及能量代谢相关指标。结果表明，与对照组相比，50 μmol/L NO 处理显著提高果实中琥珀酸脱氢酶（Succinate dehydrogenase，SDH）、H^+-ATPase、Ca^{2+}-ATPase、细胞色素氧化酶（Cytochrome oxidase，CCO）、柠檬酸合酶（Citrate synthase，CS）、乌头酸酶（Aconitase，ACO）、异柠檬酸脱氢酶（Isocitrate dehydrogenase，IDH）、α-酮戊二酸脱氢酶（Alpha-ketoglutarate dehydrogenase，α-KGDH）的活性（$P<0.05$），维持了较高的三磷酸腺苷（Adenosine triphosphate，ATP）含量，抑制冬枣果实转色和细胞膜渗透率的上升，延缓了冬枣果实硬度、可溶性固形物和可滴定酸的下降。综上所述，50 μmol/L NO 处理能够通过调节能量代谢关键酶，维持较高的能量水平和细胞膜的完整性，保持冬枣果实的贮藏品质。研究结果可为采后冬枣贮藏品质方面的应用提供理论参考。

关键词: 冬枣, 一氧化氮, 能量代谢, 贮藏品质
中图分类号: TS255.36　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)17−0478−07
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100051
本文网刊:

Exogenous NO Mediates Energy Metabolism and Affects the Storage Quality of Winter Jujube Fruits

FAN Yaqing, ZHU Xuan*, ZHAO Yating*, ZHANG Xinqi, WU Yingjie, ZHANG Xuan
（College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China）

Abstract: With the aim of investigating the effects of nitric oxide (NO) treatment on the quality of postharvest winter jujube fruits, winter jujube fruits at the white-ripe stage were selected as experimental materials. The fruits were treated with 50 μmol/L sodium nitroprusside (NO donor) solution through vacuum infiltration (soaked for 5 min at 0.01 MPa and then for 10 min at atmospheric pressure), with distilled water treatment as the control. The fruits were stored in a storage room with a temperature of 20±1 ℃ and a relative humidity of 90% to 95%. The quality and energy metabolism-related indicators were regularly determined. The results showed that 50 μmol/L NO could significantly increase the activities of succinate dehydrogenase (SDH), H^+-ATPase, Ca^{2+}-ATPase, cytochrome oxidase (CCO), citrate synthase (CS), aconitase (ACO), isocitrate dehydrogenase (IDH), and α-ketoglutarate dehydrogenase (α-KGDH) compared with control group ($P<0.05$). This treatment also maintained a higher adenosine triphosphate (ATP) content, inhibited the increase in cell membrane permeability, and suppressed the progression of fruit coloration during storage. In conclusion, the treatment with 50 μmol/L NO solution can maintain a higher energy level and cell membrane integrity by regulating key enzymes of energy metabolism,

收稿日期: 2025−10−11
基金项目: 自治区自然基金面上项目（2022D01A196）; 新疆维吾尔自治区天池英才引进计划-青年博士人才项目。
作者简介: 范雅青（1999−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬贮藏及物流工程, E-mail: 1985629783@qq.com。
*** 通信作者:** 朱璇（1971−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 果蔬贮藏及物流工程, E-mail: 13999877961@163.com。
赵亚婷（1989−）, 女, 博士, 讲师, 研究方向: 果蔬贮藏及物流工程, E-mail: zhaoyt@xjau.edu.cn。

and preserve the storage quality of winter jujube fruits. The research results can provide theoretical references for the application of postharvest storage quality of winter jujube.

Key words: winter jujube; nitric oxide; energy metabolism; storage quality

冬枣(*Ziziphus jujuba* Mill. cv. Dongzao)是鼠李科枣属植物[1], 冬枣皮薄多汁, 是我国特有的一种鲜食枣种[2]。冬枣具有较高的营养价值, 作为一种保健食品深受消费者青睐[3]。但是冬枣果实存在采收期集中、采收量大、货架期短等问题, 采收后, 还容易出现脱水、皱缩、软化等品质劣变现象, 严重降低了果实的食用品质和商品价值[1], 限制了冬枣的市场供应[4]。因此, 本研究旨在明确冬枣果实采后贮藏过程中的品质和能量代谢变化规律, 对于深入探究冬枣果实采后贮藏技术具有重要的意义。

已有的研究结果显示, 采后果蔬品质劣变主要与机体的组织能量不足有关, 提高采后果蔬贮藏期间的能量供给可以有效减轻由于能量亏缺引发的胁迫, 影响采后果蔬的贮藏品质[5]。当细胞三磷酸腺苷(Adenosine triphosphate, ATP)合成能力下降, 果蔬组织因能量供应不足而出现功能紊乱和代谢失调, 导致细胞膜结构被破坏、膜系统功能丧失, 从而造成不可逆的细胞损伤, 加速采后果蔬的衰老和品质劣变[6]。外源磷酸三钠处理采后苹果[7] 和硫化氢处理的桃[8], 均可使果实保持较高的 ATP 含量和能荷水平, 抑制果实抗坏血酸、可滴定酸和可溶性固形物含量的下降, 保持果实的贮藏品质。研究发现, 硫化氢处理鲜切苹果在贮藏期间通过保持较高 ATP 含量, 降低细胞膜通透性维持细胞膜的完整性, 抑制果实的褐变[9]。张新宪等[10] 研究发现 1-MCP 处理可以使油桃果实保持较高的 ATP、二磷酸腺苷(Adenosine diphosphate, ADP)含量及能荷水平, 降低桃果的呼吸强度, 延缓可溶性固形物的下降, 维持油桃的贮藏品质。这些结果说明, 采后处理维持的能量稳态对于调控采后果实品质劣变具有重要作用。

一氧化氮(Nitric oxide, NO)是一种生物活性小分子, 能通过生物膜迅速扩散[11]。作为植物体内一种能够参与多种生理过程的关键信号分子[12], NO 能够延缓果蔬组织的衰老进程, 在调控采后果实品质和抗胁迫中发挥着重要作用[13]。NO 对植物生理代谢过程的调节已引起学者的广泛关注。研究表明, 外源 NO 处理莲雾, 可以维持较高的 H^+-ATPase 和 Ca^{2+}-ATPase 活性, 保持较高的能量水平, 抑制果实硬度、可溶性固形物(Soluble solids content, SSC)和可滴定酸(Titratable acidity, TA)含量的上升, 延缓果实絮状绵软组织的扩大[14]。Ren 等[15] 在桃果实上研究发现外源 NO 处理可以提高柠檬酸合酶(Citrate synthase, CS)、乌头酸酶(aconitase, ACO)、异柠檬酸脱氢酶(Isocitrate dehydrogenase, IDH)、α-酮戊二酸脱氢酶(Alpha-ketoglutarate dehydrogenase, α-KGDH)和 ATP 酶活性, 使果实保持较高 ATP 含量, 维持了果实贮藏期间的硬度, 延缓了果实软化。综上, NO 可以作为信使分子参与能量代谢, 维持细胞膜的稳定性, 调控果实采后贮藏品质[16]。

目前 NO 对果实采后贮藏的研究已取得显著进展, 但外源 NO 的浓度、使用的方式和供体、果实的种类和成熟度等都会影响它的有益或有害的效应[12]。而关于冬枣采后能量代谢的报道较少, NO 是否能通过调控能量代谢, 保持冬枣果实贮藏品质未见相关研究。因此, 本课题以 NO 减压渗透处理, 探究 NO 通过能量代谢调控冬枣采后品质劣变的作用机理, 以期为冬枣贮藏保鲜技术研究提供新思路与理论基础。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

冬枣　于 2024 年 9 月 21 日采收, 新疆维吾尔自治区图木舒克市白熟期的冬枣。采摘后, 立即运回新疆农业大学 20±1 ℃ 常温库进行处理。由于新疆冬枣采收期集中、采收量大, 加之受冷藏设施数量的限制, 采后进入冷库前, 以及在销售、消费环节, 常常会经历一个短期的常温贮藏阶段, 但却是果实品质发生急剧变化的关键时期。本研究选择 20±1 ℃ 作为贮藏温度, 旨在研究 NO 在常温条件下对冬枣采后贮藏效果的影响, 以期更全面揭示外源 NO 处理在果蔬品质劣变阶段所起的保鲜作用及其生理机制。挑选出无机械伤害、病虫害侵害且大小均匀、成熟度一致(果实硬度为 13.80±0.60 N, 可溶性固形物 17.70%~19.30%)的冬枣作为后续实验的材料; 硝普钠　北京索莱宝科技有限公司; 75% 酒精　江苏英科医疗制品有限公司; 0.9% 氯化钠　西安京双鹤药业有限公司; 琥珀酸脱氢酶(Succinate dehydrogenase, SDH)活性检测、α-KGDH 活性检测试剂盒　北京索莱宝科技有限公司; ATP 含量检测、ADP 含量检测、单磷酸腺苷(Adenosine monophosphate, AMP)含量检测、细胞色素氧化酶(Cytochrome oxidase, CCO)活性检测、Ca^{2+}-ATPase 活性检测、H^+-ATPase 活性检测、CS 活性检测、ACO 活性检测、IDH 活性检测试剂盒　上海依赫生物科技有限公司。

5810 R 高速冷冻离心机　艾本德(上海)实验室科技有限公司; 5810 R 紫外分光光度计　青岛聚创世纪环保科技有限公司; HB-III 循环水式多用真空泵　郑州长城科工贸有限公司; YG-4 硬度计　浙江艾德堡仪器公司; PAL-BX ACID F5 型糖酸度计　ATAGO(爱拓)中国分公司; A11 高速粉碎研磨机　精艺兴业科技有限公司; HH-4 恒温水浴锅　江苏常州金坛良友仪器有限公司; DNM-9602 酶标仪　北京普朗欣仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品处理 根据预实验的研究结果，将冬枣果实随机分为两组处理，采用 50 μmol/L 硝普钠（NO 供体）溶液进行减压渗透处理，将冬枣果实浸入到装有溶液的真空干燥器中，在 0.01 MPa 条件下保持 5 min，然后放入空气，让果实在常压条件下继续浸泡 10 min，取出自然晾干。在相同条件下，以蒸馏水减压渗透处理用作对照。每个处理设置 3 组重复，处理结束后，将冬枣果实转入 20±1 ℃，相对湿度 90%~95% 的条件下贮藏 20 d，在 0、4、8、12、16、20 d 测定品质指标并取样，将果实经液氮冷冻处理后，于−80 ℃ 冰箱保存备用。

1.2.2 硬度的测定 随机选取每个处理组中的 15 个冬枣果实。用 GY-4 型果实硬度计测定硬度。去除赤道两侧的果皮后，通过硬度计测定硬度，每个样品选取两个点进行测定，结果取其平均值并用 N 表示。

1.2.3 细胞膜渗透率的测定 参考曹建康等[17] 的方法稍作修改。取 8 片冬枣果肉圆片放入试管中，加入 20 mL 蒸馏水后用电导率仪测定其电导率，记为 P1（μs/cm）。将试管摇匀静置 30 min 后测定其电导率，记为 P2（μs/cm）。然后将试管进行 15 min 沸水浴，待冷却到室温后再次测定其电导率，记为 P3（μs/cm），重复 3 次。细胞膜渗透率计算公式为：

$$细胞膜渗透率(\%)=\frac{P2-P1}{P3-P2}\times 100$$

1.2.4 可溶性固形物（SSC）和可滴定酸（TA）含量的测定 用 PAL-BX ACID F5 型糖酸度计测定冬枣果实 SSC 和 TA 含量，重复三次取其平均值。结果以 % 表示。

1.2.5 ATP、ADP、AMP 含量和能荷的测定 使用双抗体一步夹心法 ELISA 试剂盒，测定 ATP、ADP、AMP 含量。称取 1.4 g 冬枣果肉组织加入 2 mL 0.9% 氯化钠溶液混匀，1000×g 离心 20 min 后取上清液待测，按说明书操作步骤依次加入试剂，在 450 nm 波长测定样品 OD 值，计算样品浓度。结果以 nmol/g 表示。能荷（EC）计算公式为：

$$EC=\frac{ATP+0.5ADP}{ATP+ADP+AMP}$$

1.2.6 CCO 活性的测定 使用 ELISA 试剂盒进行测定。称取 1.4 g 冬枣果肉组织加入 2 mL 0.9% 氯化钠溶液混匀，1000×g 离心 20 min 后取上清液待测，按说明书操作步骤依次加入试剂，在 450 nm 波长测定样品 OD 值，计算样品活性，结果以 U/g 表示。

1.2.7 SDH 的活性测定 采用试剂盒测定 SDH 活性。称取 0.2 g 冬枣果肉组织并加入 1 mL 试剂一和 10 μL 试剂二利用匀浆器确保混合物均匀分布。在设定的 4 ℃ 条件下，11000×g 离心 10 min，提取上清液。在 600 nm 波长下记录 120 s 的初始吸光度值 A1，在此基础上进行精确的反应持续 1 min，之后再记录同样时长的吸光度值 A2。依据公式 ΔA=A1−A2，可以得出相关的计算结果。

1.2.8 Ca^{2+}-ATPase 和 H^{+}-ATPase 活性的测定 采用 ELISA 试剂盒测定，结果以 U/g 表示。

1.2.9 CS、ACO、IDH 和 α-KGDH 活性的测定 采用 ELISA 试剂盒测定 CS、ACO、IDH 活性，称取 1.4 g 冬枣果肉组织加入 2 mL 0.9% 氯化钠溶液混匀，1000×g 离心 20 min 后取上清液待测，按说明书操作步骤依次加入试剂，在 450 nm 波长测定样品 OD 值，计算样品活性，结果以 U/g 表示。

α-KGDH 活性采用试剂盒测定，称取 0.2 g 冬枣果肉组织，加入 1 mL 试剂一和 10 μL 试剂二混匀，4 ℃ 11000×g 离心 10 min，取上清液待测，依次加入试剂反应，在 340 nm 处测定样品 OD 值，计算样品活性，结果以 U/g 表示。

1.3 数据处理

所有实验均进行三次重复测定，数据用均值±标准差表示。分别使用 Origin 2022 和 SPSS26.0 软件进行绘制图和统计学分析。图中*表示在同一贮藏时间不同组别之间统计学分析结果具有显著性差异（$P<0.05$）。

2 结果与分析

2.1 NO 处理对冬枣果实贮藏品质的影响

2.1.1 NO 处理对采后冬枣果实颜色变化的影响 冬枣的果皮颜色一般经过白熟期、半红期以及全红期，采后颜色的变化更是衡量果实后熟衰老和氧化程度的关键指标之一[18]。由图 1 可知，冬枣采后，果实外观光滑，颜色整体呈黄绿色调。贮藏前期，果皮颜色由绿转黄，随着贮藏时间的延长，对照组果皮上点红变为片红，第 12 d 对照组果皮红变面积已占整个枣果面积的 70% 以上，在同一贮藏时间点上，外源 NO 处理组果实红变程度均低于对照组，结果表明外源 NO 处理可以延缓果皮红变速率。

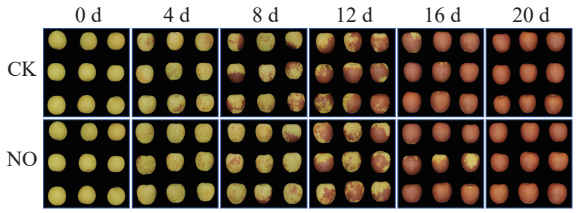


图 1 NO 处理对采后冬枣果实颜色变化的影响

Fig.1 Effects of NO treatment on color changes of postharvest winter jujube fruits

2.1.2 NO 处理对采后冬枣果实硬度、细胞膜渗透率、可溶性固形物、可滴定酸含量的影响 硬度、SSC、TA 是反映果蔬贮藏品质的关键指标[19]。由图 2A 所示，随着贮藏时间的延长，冬枣果实硬度均呈下降趋势，整个贮藏期间 NO 处理的冬枣果实硬度均显著高于对照组（$P<0.05$）。在贮藏第 16 d 和 20 d 时 NO 处理组硬度分别是对照组的 1.24 倍、

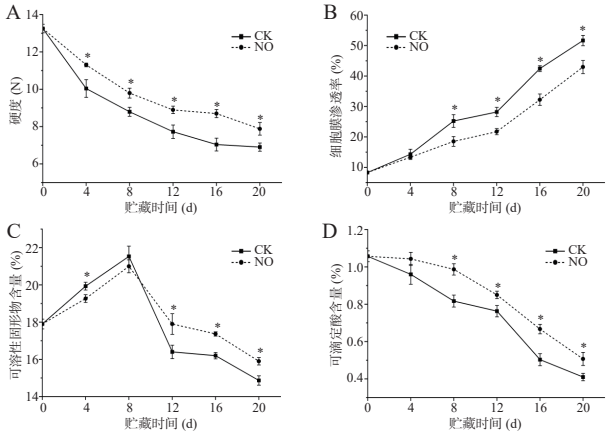


图 2　NO 处理对冬枣果实采后硬度(A)、细胞膜渗透率(B)、可溶性固形物含量(C)、可滴定酸含量(D)的影响

Fig.2　Effects of NO treatment on postharvest firmness (A), cell membrane permeability (B), soluble solid content (C), and titratable acid content (D) of winter jujube fruits

注: 图中“*”表示相同贮藏时间下处理组与对照组差异显著(P<0.05); 图 3~图 5 同。

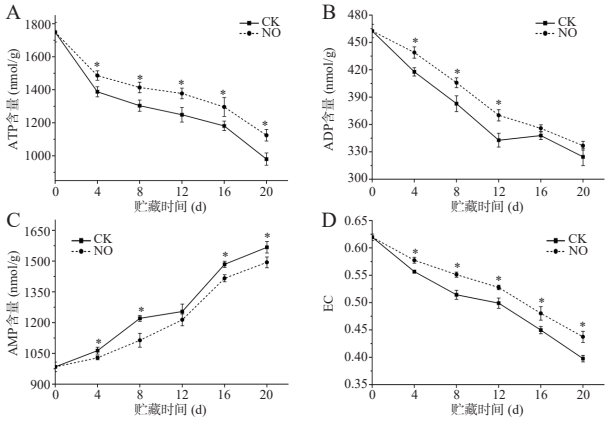


图 3　NO 处理对冬枣果实采后 ATP 含量(A)、ADP 含量(B)、AMP 含量(C)、EC(D)的影响

Fig.3　Effects of NO treatment on the contents of ATP (A), ADP (B), AMP (C), and EC (D) in postharvest winter jujube fruits

1.09 倍(P<0.05)。结果表明 NO 处理可延缓冬枣果实硬度的下降。

如图 2B 所示, 贮藏期间各组冬枣果实的细胞膜渗透率呈上升趋势, 整个贮藏期内对照组均显著高于 NO 处理组(P<0.05), 第 16 d 和 20 d 时, NO 处理组分别比对照组低 31.26%、20.28%(P<0.05)。结果表明 NO 处理有效延缓冬枣果实细胞膜渗透率的上升。

如图 2C 所示, NO 处理组和对照组均在第 8 d 时含量达到最大值, 贮藏结束时, NO 处理组可溶性固形物含量比对照组高 6.94%(P<0.05)。结果表明 NO 处理可以有效维持冬枣果实贮藏期间可溶性固形物含量。

可滴定酸对果实品质同样重要, 由图 2D 可知, 冬枣果实可滴定酸含量呈现下降趋势, 但 NO 处理组的数值始终高于对照组。在贮藏期 16 d 时, NO 处理组 TA 含量是对照组的 1.33 倍(P<0.05), 结果表明, NO 处理能够有效延缓采后冬枣可滴定酸含量的下降。

2.2　NO 处理对冬枣果实能量代谢的影响

2.2.1　NO 处理对采后冬枣果实 ATP、ADP、AMP 含量及 EC 的影响　从图 3A 中可以看出, 随着冬枣贮藏时间变长, NO 处理组和对照组果实中 ATP 含量均有降低的趋势。结果表明, 在贮藏第 8、12 和 16 d, NO 处理组果实的 ATP 含量较对照组分别提高了 8.46%、10.33% 和 9.70%(P<0.05)。说明 NO 处理能有效维持较高的 ATP 水平。

从图 3B 中可以看出, 从贮藏第 0 d 至 12 d, 无论是对照组还是 NO 处理组, 冬枣果实中的 ADP 含量均呈下降趋势。贮藏第 8 d 和第 12 d, NO 处理组的果实相较于对照组分别升高了 6.01% 和 7.963%(P<0.05), 由此可以看出, NO 处理能维持较高的 ADP 水平。

图 3C 显示, 冬枣果实 AMP 的含量逐渐上升, 在贮藏的第 8 d 和第 16 d, 对照组的果实相较于 NO 处理组分别上升了 9.59% 和 4.80%(P<0.05), 这就说明 NO 处理能在一定程度上控制 AMP 含量的增加。

图 3D 显示, 两组冬枣果实的 EC 值均随贮藏时间下降, 但 NO 处理组下降幅度较为平缓。整个贮藏期, 对照组的 EC 值下降了 35.97%, 而 NO 处理组的 EC 值下降了 29.51%。4~20 d 两组处理之间的 EC 活性相差较大, 差异显著(P<0.05), 因此, NO 处理能够延缓冬枣果实贮藏期间能荷水平的下降。

2.2.2　NO 处理对采后冬枣果实 H^+-ATPase、Ca^{2+}-APTase、SDH 及 CCO 的影响　如图 4A 所示, 在贮藏期间, 无论是对照组还是处理组, 冬枣果实中的 H^+-ATPase 活性均呈现下降的趋势。然而, 处理组中的 H^+-ATPase 活性在整个贮藏周期中始终保持高于对照组。与对照组相比, 处理组的 H^+-ATPase 活性有显著差异(P<0.05)。在储藏的第 4 d, 处理组的 H^+-ATPase 活性是对照组的 1.14 倍(P<0.05); 第 8 d, 这一数值为对照组的 1.08 倍(P<0.05); 第 16 d, 其活性也是对照组的 1.08 倍(P<0.05)。

图 4B 是冬枣果实 Ca^{2+}-ATPase 活性在贮藏过程中的变化趋势。两组贮藏前期 Ca^{2+}-ATPase 活性有短暂的上升, 随后开始下降。在 16 d 时, NO 处理组 Ca^{2+}-ATPase 活性是对照组的 1.46 倍(P<0.05)。第 20 d 时, NO 处理组比对照组高 73.66%(P<0.05), 说明 NO 处理能够有效增加冬枣果实贮藏期间 Ca^{2+}-ATPase 活性。

如图 4C 所示, 在贮藏期间 SDH 活性呈现先上升后下降的趋势。在贮藏第 8 d, NO 处理组果实的 SDH 活性为 77.91 U/g, 比同一时期的对照组果实 SDH 活性高了 22.11%(P<0.05)。从第 8 d 开始, SDH 活性随贮藏时间逐渐下降, 虽然 NO 处理组活性也有下降, 但下降幅度小于对照组, 在第 12 d, NO 处理

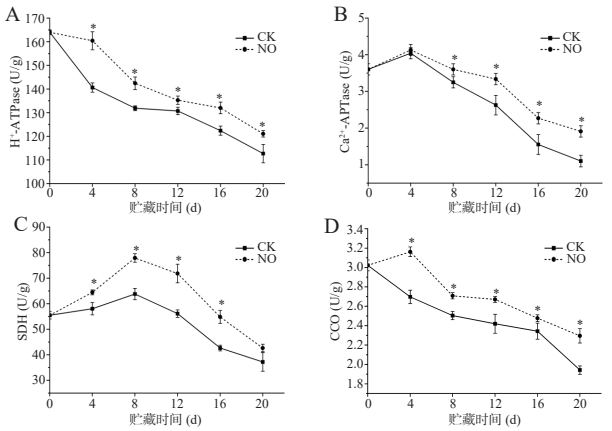


图 4 NO 处理对冬枣果实采后 H^+-ATPase(A)、Ca^{2+}-APTase(B)、SDH(C)及 CCO(D)活性的影响

Fig.4 Effects of NO treatment on the activities of H^+-ATPase (A), Ca^{2+}-ATPase (B), SDH (C), and CCO (D) in postharvest winter jujube fruits

组的果实相较于对照组升高了 27.99%(P<0.05)。表明 NO 处理能够有效地维持 SDH 活性。

如图 4D 所示, CCO 活性总体呈现下降趋势。4~20 d 对照组与 NO 处理组的 CCO 活性存在显著差异: NO 处理组分别是对照组的 1.17 倍、1.08 倍、1.10 倍、1.05 倍、1.18 倍(P<0.05), 表明 NO 能够有效地延缓 CCO 活性的下降。

2.2.3 NO 处理对采后冬枣果实 CS、IDH、ACO 及 α-KGDH 活性的影响 由图 5A 可知, 随着贮藏时间延长, CS 酶活先升后降, 且 NO 处理组的酶活始终高于对照组。第 12 d 时, NO 处理组酶活性为 181.25 U/g, 是对照组的 1.21 倍(P<0.05)。贮藏结束时 NO 处理组是对照组的 1.18 倍(P<0.05)。

图 5B 是冬枣果实在贮藏期间 IDH 酶活性的变化。两组在贮藏初期均出现短暂上升, 随后逐步下降。整个贮藏过程中, NO 处理组的酶活性始终明显高于对照组。在 8 d 时, NO 处理组 IDH 活性是对照组的 1.33 倍(P<0.05)。12 d 时, NO 处理组 IDH 活性比对照组高 43.78%(P<0.05)。

由图 5C 可知, 除第 16 d 外, NO 处理组 ACO 活性均显著高于对照组(P<0.05)。第 8、12、20 d 时, NO 处理组酶活性分别是对照组的 1.18 倍、1.10 倍、1.14 倍(P<0.05)。

图 5D 是冬枣果实 α-KGDH 活性贮藏过程中的变化趋势。贮藏前期 α-KGDH 活性先上升, 16 d 后开始下降。在 8 d 时, NO 处理组 α-KGDH 活性是对照组的 1.29 倍(P<0.05)。第 20 d 时, NO 处理组比对照组高 15.91%(P<0.05), 说明 NO 处理能够有效增强冬枣果实贮藏期间 α-KGDH 活性。

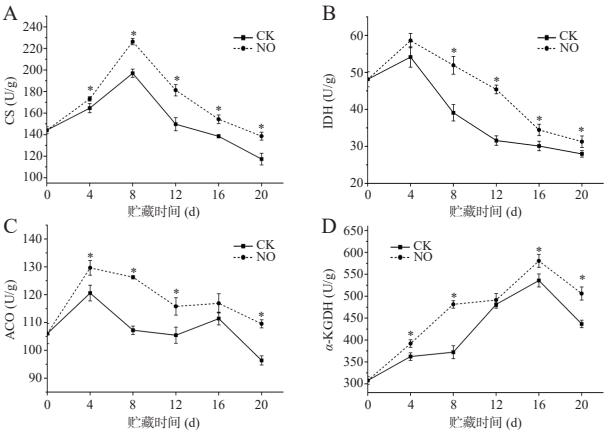


图 5 NO 处理对冬枣果实采后 CS(A)、IDH(B)、ACO(C)及 α-KGDH(D)活性的影响

Fig.5 Effects of NO treatment on the activities of CS (A), IDH (B), ACO (C) and α-KGDH (D) in postharvest winter jujube fruits

3 讨论

采后果蔬作为代谢活跃的生物体, 具有快速衰老的特性, 并且随着衰老的进行, 营养物质发生降解, 从而导致果蔬品质劣变[19]。色泽、硬度、SSC、TA 是影响果实贮藏期间品质的重要指标, 在一定程度上影响消费者的购买欲望[20]。本研究结果表明, 与对照组相比, 50 μmol/L 的 NO 处理显著抑制了冬枣果实转色和细胞膜渗透率的上升, 延缓了冬枣果实硬度、可溶性固形物和可滴定酸的下降; 有效延缓果实品质劣变, 延长了贮藏期。这与外源 NO 对香蕉[21]、库尔勒香梨[22] 等果实的采后品质的研究结果一致。

细胞内的能量状态是控制果实成熟、衰老和生理紊乱的关键因素, 果实细胞膜对维持其正常代谢发挥重要作用[23]。能源枯竭与细胞膜损伤和氧化应激密切相关[24]。研究证实, 能量供应不足或能量生产效率下降会触发膜结构完整性的破坏, 并导致采后果实的快速衰老和品质劣变[25]。ATP 是生物体中最重要的高能磷酸盐化合物[26]。ATP 含量和能量状态的变化与植物膜的完整性密切相关, 较低的 ATP 水平会导致脂质过氧化, 细胞膜透性增加, 加速代谢紊乱[27]。CCO、H^+-ATPase、Ca^{2+}-ATPase、SDH、CS、ACO、IDH、α-KGDH 是能量代谢的关键酶[28], 较高的 SDH 和 CCO 活性能够保证三羧酸循环顺利进行, 在能量代谢中起着至关重要的作用[29]。CS 是细胞内多种代谢途径的关键限速酶, 可以生产大量 ATP[30]。CS 催化草酰乙酸与乙酰辅酶 A 结合生成柠檬酸, 而 ACO 和 IDH 可逆催化柠檬酸转化为异柠檬酸, 并进一步生成 α-KGDH, 将 α-酮戊二酸氧化脱羧生成琥珀酰辅酶 A 和还原态烟酰胺腺嘌呤二核苷酸, 琥珀酰辅酶 A 作为 TCA 反应中磷酸化的底物, 转移高能磷酸基团至 ADP 生成大量 ATP[31]。H^+-ATPase、Ca^{2+}-ATPase 通过将 ATP 分解为 ADP 提供能量[32]。较高的 H^+-ATPase、Ca^{2+}-ATPase 活性有利于维持逆境胁迫下细胞膜结构的完整性[33]。本研究结果可知, 外源 NO 处理显著提升了 CCO、H^+-ATPase、Ca^{2+}-ATPase、SDH、CS、ACO、IDH、α-KGDH 等相关酶活性, 这有助于促进能量物质合成反应的正常进行[34], 保持较高的 ATP 含量和能荷水平的积累, 有利

于保持细胞膜的稳定性，显著延长冬枣果实的贮藏期。卢晓婷[35] 在黄瓜上采用 NO 处理也有效控制 ATP 含量和能荷维持在较高水平，提高能量代谢酶 CCO 活性，保持了黄瓜品质。任圆圆[36] 在桃果实上也发现 NO 处理促进 TCA 循环以增强能量代谢，保持了桃果实品质。外源 NO 处理采后苹果[37] 增强 CCO、SDH 和 ATP 酶的活性，保持较高 ATP 含量，降低细胞膜通透性维持细胞膜的完整性，以上实验结果与本实验结果一致。综上，采后果蔬贮藏中维持较高的能量状态，有利于保持细胞膜的完整性，保证果蔬正常生理代谢，延缓果实衰老和品质劣变。

4　结论

本实验结果表明，50 μmol/L 的外源 NO 处理可以提高 SDH、CCO、H^+-ATPase、Ca^{2+}-ATPase、CS、ACO、IDH 及 α-KGDH 的活性，贮藏结束其酶活性分别是对照组的 1.15 倍、1.18 倍、1.07 倍、1.74 倍、1.18 倍、1.14 倍、1.12 倍、1.16 倍（$P<0.05$），维持了较高的 ATP 含量和能量水平，抑制细胞膜渗透率的上升，有效延缓果实硬度、可溶性固形物和可滴定酸的下降，保持冬枣果实的贮藏品质。本研究可为外源 NO 处理在采后果蔬保鲜的应用上提供思路和参考。但关于外源 NO 处理调控能量代谢以提升其品质的分子机制尚未深入研究；未来研究将采用转录组学、代谢组学等组学技术，进一步揭示外源 NO 处理维持冬枣果实品质的分子机制。

© 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］ 韩乃瑄，曹颖，刘晓敏，等. 冬枣保鲜技术的研究进展[J]. 食品工业科技，2022，43(21)：414−421.［HAN N X, CAO Y, LIU X M, et al. Research progress on preservation technology of winter jujube[J]. Food Industry Science and Technology, 2022, 43(21): 414−421.］

［2］ ZHAO Y T, ZHU X, HOU Y Y, et al. Effects of harvest maturity stage on postharvest quality of winter jujube (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Dongzao) fruit during cold storage[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 277: 109778.

［3］ 常璐璐，张乐乐，于有伟，等. 精氨酸处理对采后冬枣黑斑病的抗病作用[J]. 食品工业科技，2021，42(12)：321−326.［CHANG L L, ZHANG L L, YU Y W, et al. The effect of arginine treatment on the resistance to postharvest black spot disease of winter jujube[J]. Food Industry Science and Technology, 2021, 42(12): 321−326.］

［4］ 牛润滋. 冬枣果实采后代谢物变化特征研究[D]. 咸阳：西北农林科技大学，2023.［NIU R Z. Study on the characteristics of post-harvest metabolite changes in winter jujube fruit[D]. Xianyang: North West Agriculture and Forestry University, 2023.］

［5］ AGHDAMM S, JANNATIZADEH A, LUO Z, et al. Ensuring sufficient intracellular ATP supplying and friendly extracellular ATP signaling attenuates stresses, delays senescence and maintains quality inhorticultural crops during postharvest life[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 76: 67−81.

［6］ SIRIAMOORNPUM S, WEERAPREEYAKUL N, BARUSRUX S. Bioactive compounds and healthimplications are better for green jujube fruit than for ripe fruit[J]. Journal of Functional Foods, 2015, 24(12): 246−255.

［7］ GE Y H, CHEN Y R, LI C Y, et al. Effect of trisodium phosphate dipping treatment on the quality and energy metabolism of apples[J]. Food Chemistry, 2019, 274: 324−329.

［8］ WANG L, HUANG X, LIU C, et al. Hydrogen sulfide alleviates chilling injury by modulating respiration and energy metabolisms in cold-stored peach fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 199: 112291.

［9］ CHEN C, JIANG A, LIU C, et al. Hydrogen sulfide inhibits the browning of fresh-cut apple by regulating the antioxidant, energy and lipid metabolism[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 175: 111487.

［10］ 张新宪，原若楠，常嘉欣，等. 1-甲基环丙烯处理对油桃贮期蔗糖代谢及能量代谢的影响[J]. 食品与发酵工业，2026，52(2)：228−234.［ZHANG X X, YUAN R N, CHANG J X, et al. Effect of 1-methylcyclopropene treatment on sucrose metabolism and energy metabolism during storage of nectarines[J]. Food and Fermentation Industries, 2026, 52(2): 228−234.］

［11］ 朱丽娟，侯佳迪，王军萍，等. NO 延缓新鲜果蔬成熟衰老和提高抗性效果及作用机制研究进展[J]. 食品工业科技，2021，42(22)：398−405.［ZHU L J, HOU J D, WANG J P, et al. Research progress on the effect and mechanism of nitric oxide (NO) in delaying the ripening and senescence of fresh fruits and vegetables and enhancing their resistance[J]. Food Industry Science and Technology, 2021, 42(22): 398−405.］

［12］ 王彩云. NO 对桃果实线粒体功能及氧化损伤的调控作用[D]. 泰安：山东农业大学，2021.［WANG C Y. Regulation of NO on mitochondrial function and oxidative damage in peach fruit[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2021.］

［13］ YANG H, MU J, CHEN L, et al. S-Nitrosylation positively regulates ascorbate peroxidase activity during plant stress responses[J]. Plant Physiology, 2015, 167(4): 1604−1615.

［14］ 段云飞. NO 调控呼吸代谢对采后莲雾果实絮状绵软影响的机理研究[D]. 厦门：集美大学，2020.［DUAN Y F. Mechanism of NO regulation of respiratory metabolism on the floccular softening of post-harvest wax apple fruit[D]. Xiamen: Jimei University, 2020.］

［15］ REN Y Y, ZHU S H. Nitric oxide promotes energy metabolism and protects mitochondrial DNA in peaches during cold storage[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 970303.

［16］ CHOUCHANI E T, HURD T R, NADTOCHIY S M, et al. Identification of S-nitrosated mitochondrial proteins by S-nitrosothiol difference in gel electrophoresis (SNO-DIGE): Implications for the regulation of mitochondrial function by reversible S-nitrosation[J]. Biochemical Journal, 2010, 430: 49−59.

［17］ 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，2007：50−149.［CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Postharvest physiological and biochemical experiments of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 50−149.］

［18］ 桑月英. 外源水杨酸和脱落酸调控冬枣采后抗氧化系统研究[D]. 石河子：石河子大学，2022.［SANG Y Y. Research on the regulation of postharvest antioxidant system of winter jujube by

exogenous salicylic acid and abscisic acid[D]. Shihezi: Shihezi University, 2022.]
[19] 石慧敏, 任新雅, 张昱, 等. 苹果酸对采后杏果实品质和活性氧代谢的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(22): 289−296. [SHI H M, REN X Y, ZHANG Y, et al. Effect of malic acid on postharvest apricot fruit quality and reactive oxygen metabolism[J]. Food Industry Science and Technology, 2024, 45(22): 289−296.]
[20] 陈秋怡, 刘晓媛, 刘畅, 等. 低温等离子体对静压损伤金冠苹果的贮藏品质和愈伤的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(12): 267−277. [CHEN Q Y, LIU X Y, LIU CH, et al. Effect of low-temperature plasma on storage quality and callus of static pressure damaged golden delicious apples[J]. Food Science, 2025, 46(12): 267−277.]
[21] 崔文玉. 外源硫化氢和一氧化氮处理对采后香蕉果实抗冷性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020. [CUI W Y. Effects of exogenous hydrogen sulfide and nitric oxide treatments on cold resistance of postharvest banana fruits[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2020.]
[22] 郑素慧. 一氧化氮熏蒸对库尔勒香梨采后品质及黑斑病抗性的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2023. [ZHENG S H. Effects of nitric oxide fumigation on postharvest quality and black spot disease resistance in Korla fragrant pears[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2023.]
[23] YANG L, WANG X, HE S, et al. Heat shock treatment maintains the quality attributes of postharvest jujube fruits and delays their senescence process during cold storage[J]. Journal of Food Biochemistry, 2021, 45(10): 13937.
[24] 任新雅, 石慧敏, 刘志旭, 等. 褪黑素通过调控能量代谢和抗氧化能力增强杏果实抗冷性[J]. 食品科学, 2024, 45(14): 217−226. [REN X Y, SHI H M, LIU Z X, et al. Melatonin enhances chilling resistance of apricot fruit by regulating energy metabolism and antioxidant capacity[J]. Food Science, 2024, 45(14): 217−226.]
[25] YANG W, SHI C, HU O, et al. Nanocomposite packaging regulate respiration and energy metabolism in *Flammulina velutipes*[J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 151: 1 19-126.
[26] ZHANG Z, ZHANG X, XIN G, et al. Umami taste and its association with energy status in harvested *Pleurotus geesteranus* stored at different temperatures[J]. Food Chemistry, 2019, 279: 179−186.
[27] 李美玲, 林育钊, 王慧, 等. 能量状态在果蔬采后衰老中的作用及其调控研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(9): 290−295. [LI M L, LIN Y ZH, WANG H, et al. The role and regulation of energy status in post-harvest senescence of fruits and vegetables: Research progress[J]. Food Science, 2019, 40(9): 290−295.]
[28] ZHANG J Y, WANG C, CHEN C K, et al. Glycine betaine inhibits postharvest softening and quality decline of winter jujube fruit by regulating energy and antioxidant metabolism[J]. Food Chemistry, 2023, 410: 135445.
[29] LIN Y, LIN Y, CHEN Y, et al. Hydrogen peroxide induced changes in energy status and respiration metabolism of harvested longan fruit in relation to pericarp browning[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(22): 4627−4632.
[30] 汤天瑾, 王晓彤, 齐杰, 等. 包装膜透气性对双孢蘑菇保鲜效果及呼吸代谢的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(21): 249−257. [TANG T J, WANG X T, QI J, et al. Effect of permeability of packaging films on preservation effect and respiratory metabolism of agaricus bisporus[J]. Food Science, 2023, 44(21): 249−257.]
[31] JU J, LEI Y, GUO Y, et al. Eugenol and citral kills *Aspergillus niger* through the tricarboxylic acid cycle and its application in food preservation[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 173: 114226.
[32] HU S Q, HOU Y Y, ZHAO L Y, et al. Exogenous 24-epibrassinolide alleviates chiling injury in peach fruit through modulating PpGATA12-mediated sucrose and energy metabolisms[J]. Food Chemistry, 2023, 400: 133996.
[33] 刘士琦, 韦东伶, 刘家粮, 等. 褪黑素对采后红毛丹果实褐变及膜脂代谢和能量代谢的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(18): 207−215. [LIU SH Q, WEI D L, LIU J L, et al. Effect of melatonin on browning, membrane lipid metabolism, and energy metabolism of post-harvest rambutan fruit[J]. Food Science, 2024, 45(18): 207−215.]
[34] ZHU J, LI C, FAN Y, et al. γ-Aminobutyric acid regulates mitochondrial energy metabolism and organic acids metabolism in apples during postharvest ripening[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 186: 111846.
[35] 卢晓婷. 水杨酸参与一氧化氮诱导冷藏黄瓜抗冷性的作用研究[D]. 柳州: 广西科技大学, 2023. [LU X T. Study on the role of salicylic acid in nitric oxide-induced chilling resistance of refrigerated cucumber[D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2023.]
[36] 任圆圆. 一氧化氮对桃果实软化及线粒体单链结合蛋白的调控作用[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022. [REN Y Y. Regulation of nitric oxide on softening of peach fruit and mitochondrial single-stranded binding protein[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2022.]
[37] 韩杰. 外源一氧化氮处理对苹果采后黑斑病的控制[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2023. [HAN J. Control of postharvest black spot disease in apples by exogenous nitric oxide treatment[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2023.]