

# 一氧化氮熏蒸处理抑制冬枣贮藏过程中的乙醇代谢及异味产生

赵亚婷<sup>1</sup>, 朱璇<sup>2</sup>, 侯媛媛<sup>3</sup>, 石玲<sup>2</sup>, 潘艳芳<sup>1</sup>, 李喜宏<sup>1</sup>, 刘海东<sup>4</sup>

(1. 天津科技大学省部共建食品营养与安全国家重点实验室, 天津 300457) (2. 新疆农业大学食品科学与药学院, 新疆乌鲁木齐 830052) (3. 南京农业大学食品科学技术学院, 江苏南京 210095)  
(4. 天津捷盛东辉保鲜科技有限公司, 天津 300403)

**摘要:** 本研究以冬枣果实为试验材料, 用 20  $\mu\text{L/L}$  一氧化氮 (NO) 气体熏蒸冬枣果实 3 h, 置于 0  $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 90%~95% 的冷库贮藏 75 d, 定期测定冬枣果实挥发性物质、乙醇代谢产物及关键酶活性的变化。结果表明, 贮藏期冬枣果实共鉴定出 47 种挥发性物质, 主要包括醇类、醛类、酯类、酸类、酮类。在采收当天、以及对照组和 NO 熏蒸处理组贮藏 45 d 和 75 d 后, 分别检测出 24、37、38、45 和 46 种挥发性成分。贮藏期间果实醛类物质的变化多以先上升后下降为主, 醇类和酯类物质的种类和含量大致主要呈增加趋势, NO 对于醛类物质的作用因贮藏时间和醛类种类有所不同, 而 NO 能有效抑制醇类和酯类含量增加。同时, NO 处理显著抑制了丙酮酸脱羧酶 (PDC) 和乙醇脱氢酶 (ADH) 的活性, 进而抑制了果实贮藏期间乙醇和乙醛含量的积累。说明 NO 处理能较好地保持冷藏果实挥发性物质的含量, 延缓异味产生。

**关键词:** 一氧化氮; 冬枣; 挥发性物质; 乙醇代谢

文章编号: 1673-9078(2020)05-104-112

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.5.015

## Inhibition of Volatile Compounds and Ethanol Fermentation Metabolism by treating with Nitric Oxide Fumigation on Winter Jujube (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Dongzao) Fruit

ZHAO Ya-ting<sup>1</sup>, ZHU Xuan<sup>2</sup>, HOU Yuan-yuan<sup>3</sup>, SHI Ling<sup>2</sup>, PAN Yan-fang<sup>1</sup>, LI Xi-hong<sup>1</sup>, LIU Hai-dong<sup>4</sup>

(1.State Key Laboratory of Food Nutrition and Safety, Tianjin University of Science and Technology, Ministry of Education, Tianjin 300457, China) (2.College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China) (3.College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)  
(4.Tianjin Jie Sheng Donghui Preservation Technology Co., Ltd., Tianjin 300403, China)

**Abstract:** In this study, winter jujube fruits were used as experimental materials. Winter jujube fruits were subjected to a 3 h fumigation with 20  $\mu\text{L/L}$  of nitric oxide (NO) and stored at 0  $^{\circ}\text{C}$  and 90%~95% of relative humidity for 75 d. Changes in volatile compounds, ethanol metabolites and activities of key enzymes of the winter jujube fruits were measured regularly during the storage. The results showed that a total of 47 volatile compounds were identified in the winter jujube fruits, mainly including alcohols, aldehydes, esters, acids, and ketones. After 45 and 75 days of the storage, 24, 37, 38, 45 and 46 volatile components were detected in the control and NO fumigated groups, respectively. During cold storage, the aldehydes in fruit mostly increased first and then decreased, while the types and contents of alcohols and esters

引文格式:

赵亚婷,朱璇,侯媛媛,等.一氧化氮熏蒸处理抑制冬枣贮藏过程中的乙醇代谢及异味产生[J].现代食品科技,2020,36(5):104-112

ZHAO Ya-ting, ZHU Xuan, HOU Yuan-yuan, et al. Inhibition of volatile compounds and ethanol fermentation metabolism by treating with nitric oxide fumigation on winter jujube (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Dongzao) fruit [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(5): 104-112

收稿日期: 2019-11-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0401305-5); 天津市科技计划项目(17PTWYHZ0030; 18ZYPTJC00020)

作者简介: 赵亚婷(1989-), 女, 博士研究生, 研究方向: 果蔬采后贮藏与保鲜

通讯作者: 李喜宏(1960-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工及贮藏

generally increased. The effects of NO fumigation on aldehydes varied depending on the storage time and the type of aldehyde, whilst NO could effectively inhibit the increases in the contents of alcohols and esters. Meanwhile, NO fumigation significantly inhibited the activities of pyruvate decarboxylase (PDC) and alcohol dehydrogenase (ADH), thereby suppressing the accumulation of ethanol and acetaldehyde in the winter jujube fruit during storage. These results suggested that NO treatment could preserve the contents of volatile substances and delay the generation of off-flavor in the winter jujube fruit during cold storage.

**Key words:** Nitric oxide; winter jujube; volatile compounds; ethanol metabolism

新鲜果实的品质受外观、颜色、质地和风味的影响。挥发性物质是构成果实风味的主要组成部分,包括醇类、醛类、酯类、酮类、呋喃酮类和萜烯类等低分子量化合物<sup>[1]</sup>。在果实成熟阶段以及后续贮藏过程中,挥发性物质的合成和变化与采后果实品质的保持密切相关。由于果实中的挥发性成分是在伴随着生长发育阶段缓慢积累产生的,因此其种类和含量的差异受发育时期和成熟方式(自然成熟和热工催熟)的影响较大<sup>[2]</sup>。此外,用于采后保鲜的商品化处理技术和果实采后贮藏的环境条件也对挥发性物质产生较大影响<sup>[3]</sup>。冷藏是目前果品保鲜采用的最普遍方式,能有效控制采后果实的腐烂变质<sup>[4]</sup>。但相比常温贮藏,果实多种挥发性物质的合成代谢能力随冷藏时间延长下降,且果实的香气成分也较淡,甚至会产生异味。

乙醇和乙醛是天然的芳香族化合物,不仅能够改善果实风味,还能在果实成熟过程中促进脱涩<sup>[5]</sup>。乙醛几乎存在于每一个水果中,在成熟过程中,甚至在有氧条件下也会积累<sup>[6]</sup>。通常情况下,乙醛和乙醇含量的相对较少,但在采后贮藏过程中,果实细胞组织处于低氧或缺氧状态时,会诱发生成大量的乙醇和乙醛<sup>[7]</sup>,这二种物质的积累会传输到组织的其他部分,造成组织细胞伤害或死亡,导致果实生理代谢紊乱,引起异味、褐变,加速腐烂<sup>[8]</sup>。有关乙醇代谢引起的采后果实异味产生的研究已经在柑橘<sup>[9]</sup>、猕猴桃<sup>[10]</sup>、苹果<sup>[11]</sup>等多种果实种得到报道。

冬枣果实贮藏过程中,乙醇的积累造成的果香和感官可接受度迅速恶化(褐变和软化腐烂)是限制果实贮藏寿命的重要问题之一。目前有关于枣果实香气成分的研究,国内方面主要集中在干燥技术对制干枣香气成分的影响,而国外方面聚焦于不同品种之间鲜枣果实香气成分含量和中各类的差异,有关于是否后续会有进一步乙醇参与生成的其他挥发性物质的变化研究较少。一氧化氮(Nitric oxide, NO)作为一种生物体内重要的内源性信号分子,介导植物从种子萌发到细胞程序性死亡的多种生理功能<sup>[12]</sup>。随着人们对NO在植物生理功能方面的作用研究不断深入,NO还被证明可延缓草莓<sup>[13]</sup>、桃<sup>[14]</sup>、香蕉<sup>[15]</sup>、冬枣<sup>[16]</sup>等一系列果实的采后品质和贮藏寿命。NO在果蔬采后生理

方面的研究主要集中在果实的乙烯合成、腐烂软化、冷害、褐变和抗病等方面<sup>[17]</sup>。基于许多研究得到的NO对乙烯的生物合成有显著影响这一结果,而乙烯对于果实香气的生物合成又有一定作用,我们推断NO与果实的香气物质可能也有某种关联。目前有关于NO对果实香气物质的研究较少,只在苹果和桃<sup>[18]</sup>果实中被报道过。因此,本研究以冬枣为实验材料,探究在低温贮藏时冬枣果实的挥发性物质和乙醇的变化,分析NO对果实品质风味的影响,为缓解果实贮藏过程中酒精异味的产生提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料

以冬枣果实(*Ziziphus jujuba* cv. Dongzao)为试验材料,选取半红期果实(硬度:20-24 N;可溶性固形物:24%-27%),于2018年9月16日采自新疆维吾尔自治区库尔勒市阿瓦提乡兰干村果园。

### 1.2 主要仪器设备

主要试剂:氯化钠、三氯乙酸、2,4-二硝基苯胍、丙酮酸钠、氢氧化钠、MES、焦磷酸硫胺素、还原型辅酶I钠、乙醛、氯化镁,以上试剂均为分析纯,购自天津市光复科技发展有限公司;乙醇和乙醛购分析标准品自北京普天同创生物科技有限公司;PDC测定试剂盒购自北京索莱宝科技有限公司。

主要设备:LE2042-02电子天平,DZKW-S恒温水浴锅,3H16R1智能高速冷冻离心机,3H16R1紫外/可见分光光度计,Agilent 7890BGC-5977BMSD气相色谱-质谱联用仪,65  $\mu\text{m}$  PDMS/DVB萃取头,SPME手动进样器,HP-5 (30 m $\times$ 0.32 mm $\times$ 0.25  $\mu\text{m}$ )色谱柱。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 处理方法

对照和处理组每组各540个果实,包括3个重复。将枣果实分别放置在密封容器里(26 L),用氮气冲洗以除去氧气,然后将NO气体注入容器,通过流量计控制释放速度使容器中NO浓度达到20  $\mu\text{L/L}$ (此浓度

的筛选基于课题组已发表文章<sup>[19]</sup>。在 0 °C 下保持密闭 3 小时, 以完成熏蒸处理。(2) 对照: 将果实密闭于相同的条件下, 不添加 NO 气体。所有果实处理完毕后均于 0±1 °C、相对湿度为 90%~95% 的冷库贮藏 75 d。

在贮藏 0 d、45 d 和 75 d 时, 随机选取 10 个果实, 切成小块用液氮冷冻保存在 -80 °C, 用于挥发性物质的测定; 另外, 在贮藏过程中, 每隔 15 d 随机选取 20 个果实, 切成小块用液氮冷冻保存在 -80 °C, 进行乙醇和乙醛含量、乙醇代谢相关酶指标的测定。以上分析均重复 3 次。

### 1.3.2 挥发性物质的测定

称取 4 g 液氮研磨成粉的冬枣果肉组织, 装入 20 mL 顶空瓶中, 加入 1.2 g 氯化钠, 密封。在 50 °C 的水中平衡 15 min 后, 将经 250 °C 老化的 65 μm PDMS/DVB 萃取头插入顶空瓶萃取, 连续加热和搅拌 (500 r/min) 40 min。萃取后, 放入气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS) 的进样口, 在 250 °C 解析 5 min。

色谱柱采用 HP-5 (30 m×0.32 mm×0.25 μm)。

GC-MS 条件: 参照 Chen 等<sup>[20]</sup>方法加以修改。升温程序: 40 °C 保持 3 min, 以 5 °C/min 升至 180 °C 保持 5 min, 然后以 10 °C 升至 240 °C 停留 10 min。离子源: EI, 温度: 250 °C。扫描质量数范围为: 33~550 *m/z*。

挥发性物质成分的定性是通过计算机检索与标准质谱库进行匹配, 选取高匹配度的检索结果, 基于每种成分的出峰保留时间, 再查阅有关文献<sup>[20-23]</sup>后人工解谱, 确定挥发性化合物的各个组分, 用峰面积归一化法对各组分进行相对定量。

### 1.3.3 乙醛和乙醇含量测定

参照 Thewes 等<sup>[24]</sup>方法加以修改, 用气相色谱进行乙醇和乙醛测定。称取 8 g 果实组织, 加入 8 mL 0.1 mol/L 预冷 HCl, 研磨匀浆。取 8 g 匀浆液于 20 mL 顶空中密封, 在 65 °C 保温 50 min, 取上空气体 2 mL, 在气相色谱仪进样口上进样测定。果实样品中乙醛和乙醇的含量, 以 μmol/kg 表示, 重复三次取平均值。

### 1.3.4 丙酮酸含量测定

参照曹建康<sup>[25]</sup>方法。称取 4 g 果蔬组织加入 5 mL 8% 三氯乙酸, 研磨均浆后, 离心 25 min (4 °C、12000 r/min), 收集上清液, 用 8% 三氯乙酸定容至 10 mL。测定时, 取 1 mL 上清液, 加入 1 mL 0.1% 2,4-二硝基苯肼溶液和 2 mL 8% 三氯乙酸, 摇匀, 再加 5 mL 1.5 mol/L NaOH 溶液, 摇匀, 反应 15 min。然后以 8% 三氯乙酸为空白参比, 在波长 520 nm 处比色测定, 用丙酮酸钠标准校准曲线计算丙酮酸浓度, 以每千克果蔬组织中丙酮酸的毫克数表示, 即 mg/kg。

### 1.3.5 丙酮酸脱羧酶 (PDC) 和乙醇脱氢酶 (ADH) 活性测定

称取 5 g 冷冻果肉样品, 加入 5 mL 100 mmol/L、pH 6.5 MES [含 4% (W/V) PVPP 和 2 mmol/L DTT] 的提取缓冲液, 在冰浴下研磨匀浆, 离心 30 min (4 °C、12000 r/min) 后, 收集上清液用于测定 ADH 和 PDC。

采用 PDC 测定试剂盒 (北京索莱宝科技有限公司) 方法进行 PDC 活性的测定。使用试剂盒工作液前, 先在常温下放置 2 h。每分钟每克果肉催化产生 1 nmol 产物的酶量定义为一个酶活性单位 (U), 用 U/g 表示, 每个检测重复 3 次。

ADH 活性参照 Shi 等<sup>[8]</sup>方法略作改动。取 0.5 mL 酶液, 加入 2 mL 0.1 mol/L、pH 6.5 MES 缓冲液和 0.1 mL 1.5 mmol/L NADH 溶液; 最后加入 0.2 mL 0.08 mol/L 乙醛溶液立即摇匀, 反应 15 s 后, 在波长 340 nm 处测定吸光度值连续测定 5 min (每隔 30 s 测一次), 蒸馏水作空白。重复三次。一个活力单位 (U) 定义为每克样品每分钟内 OD 值变化 0.01, 以 U/g 表示, 每个检测重复 3 次。

## 1.4 数据统计与分析

数据使用 Microsoft Excel 软件计算平均值及标准偏差, 利用 SPSS 统计软件处理系统进行方差分析和 Duncan's 多重差异显著性分析。*p*<0.05 表示差异显著, 图中竖线代表标准误, 相同字母表示差异不显著。

## 2 结果与讨论

### 2.1 NO 熏蒸处理对冬枣果实挥发性物质的影响

经过 GC-MS 分析, 如表 1 所示, 共鉴定出的挥发性物质总数量为 47 种, 其挥发性物质包括: 醇类 7 种、醛类 12 种、酯类 12 种、酮类 4 种、酸类 5 种、其他类 7 种 (表 1)。采后冬枣果实在采收当天、以及对对照组和 NO 熏蒸处理组贮藏 45 d 和 75 d 后, 分别检测出 24、37、38、45 和 46 种主要挥发性成分。果实的香气成分种类在采收时较少, 贮藏后整体上呈上升趋势, 进一步对各成分分类分析后得到, 在采后当天, 果实中的醇类物质和酯类物质较少, 而经过贮藏后, 在同一时间点, 就主要风味化合物的总种类而言, NO 熏蒸处理组果实与对照组果实差别不大, 但是相对含量却有明显的差别, 其中检测出的醇类、酯类和醛类化合物的相对含量较高。

从表 1 可以看出, 冬枣果实中的主要醇类物质有: (E)-2-戊烯-1-醇、乙醇、环己二醇、环丁醇、(E)-2-庚烯-1-醇、(E)-2-壬烯-1-醇和 (E)-2-辛烯-1-醇。其中,

除(E)-2-庚烯-1-醇外,其他醇类物质均随贮藏时间呈上升趋势,NO熏蒸处理有效延缓了大部分醇类含量的上升。尤其是乙醇含量,在采收当天未检测到乙醇含量,但从贮藏第45 d到第75 d,对照中的乙醇相对含量从6.00%急剧上升到了29.32%,而NO处理组冬枣果实的乙醇相对含量仅上升至13.53%,为对照的46.15% ( $p<0.05$ )。这有异于张丽丽<sup>[18]</sup>在桃果实的研究结果,可能是因为一方面醇类物质的变化在不同果实之间存在差异性,另一方面NO处理抑制了乙醇代谢合成关键酶ADH的活性。

冬枣果实中的醛类物质主要有:(E)-2-戊烯醛、己醛、(E)-2-己烯醛、庚醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛,(E)-2-辛烯醛,(E)-2-庚烯醛、壬醛、癸醛、十一醛、月桂醛和苯甲醛等(见表1)。果实中的己醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛,(E)-2-辛烯醛在贮藏期前45 d呈先上升后下降趋势,而庚醛的趋势则与之相反。己醛是冬枣果实中最重要的醛类,整个贮藏期,其相对含量从采收当天的15.20%,降低到13.33%,而NO熏蒸后的果实己醛相对含量在贮藏结束时降低至9.78%,比对照低了26.63% ( $p<0.05$ )。同时,(E,E)-2,4-庚二烯醛,(E)-2-辛烯醛、癸醛和月桂醛表现出持续下降的趋势。果实中的苯甲醛在贮藏只有在贮藏75 d时被检测到,其在对照组果实的相对含量为3.16%,仅为NO熏蒸组果实的43.34% ( $p<0.05$ )。说明醛类物质的变化相对复杂,而NO熏蒸处理对于醛类物质的作用各

有不同。

冬枣果实中的酯类物质主要有:苯甲酸甲酯、苯甲酸乙酯、2-甲基戊酸甲酯、癸酸甲酯、丁酸丁酯、癸酸乙酯、邻苯二甲酸二甲酯、苯甲酸-2-乙基己基酯、邻苯二甲酸丁异酯、棕榈酸甲酯、邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸二癸酯(见表1)。果实中的苯甲酸甲酯和苯甲酸乙酯含量在采收当天分别达到0.74%和8.14%,但NO熏蒸处理后,二者的含量在贮藏第45 d低于对照组,贮藏末期时高于对照组,分别为1.39%和2.39%,是同期对照组含量的4.34倍和3.98倍 ( $p<0.05$ )。除苯甲酸甲酯和苯甲酸乙酯外,其他酯类的含量大致呈升高趋势,NO熏蒸处理减缓了果实酯类物质的上升。邻苯二甲酸丁异酯、棕榈酸甲酯和邻苯二甲酸丁异酯、棕榈酸甲酯、邻苯二甲酸二丁酯则在贮藏前期未被检测到。

果实中的酸类物质和酮类物质相对较少,酸类物质主要有2-甲基丁酸、2-氨基-6-苯甲酸、己酸、苯甲酸和正癸酸,酮类物质主要有6-甲基-5-庚烯-2-酮、甲乙双酮、(E)-6,10-二甲基-5,9-十一碳二烯-2-酮、反式- $\beta$ -紫罗兰酮。NO熏蒸处理后,果实中酮类物质的相对含量普遍低于对照,而酸类物质对于NO的响应则各有所异。除了上述这些醇类、醛酮类和酸类,本实验中还检测到苯乙烯、6-甲基-1-辛烯、D-柠檬烯、十二烷、十五烷、癸烷和2,4-二叔丁基苯酚等挥发性成分(见表1)。

表1 NO熏蒸处理对冬枣果实挥发性成分的影响

Table 1 Effect of NO fumigation treatment on volatile compounds of winter jujube

化合物 编号	保留时 间/min	名称	相对含量/%				
			0 d	45 d		75 d	
				CK	NO	CK	NO
1	1.84	环丁醇	ND	2.65±0.01 <sup>a</sup>	1.24±0.03 <sup>a</sup>	7.85±0.07 <sup>a</sup>	6.45±0.11 <sup>a</sup>
2	2.65	(E)-2-戊烯-1-醇	13.23±1.02	18.76±0.32 <sup>a</sup>	9.79±0.21 <sup>b</sup>	26.40±1.35 <sup>a</sup>	11.13±0.27 <sup>b</sup>
3	2.81	乙醇	ND	0.6±0.01 <sup>a</sup>	0.26±0.02 <sup>b</sup>	29.32±1.19 <sup>a</sup>	13.53±0.56 <sup>b</sup>
4	7.82	环己二醇	ND	ND	0.99±0.02	0.73±0.06 <sup>b</sup>	1.21±0.19 <sup>a</sup>
5	7.84	(E)-2-庚烯-1-醇	2.07	2.16±0.46 <sup>a</sup>	1.89±0.17 <sup>b</sup>	5.78±0.64 <sup>a</sup>	3.15±0.32 <sup>b</sup>
6	13.94	(E)-2-壬烯-1-醇	ND	ND	0.78±0.02	1.27±0.04 <sup>a</sup>	0.46±0.01 <sup>b</sup>
7	25.75	(E)-2-辛烯-1-醇	ND	ND	0.16±0.01	0.68±0.02 <sup>a</sup>	0.56±0.01 <sup>b</sup>
8	3.90	(E)-2-戊烯醛	3.95	5.76±0.37 <sup>a</sup>	4.64±0.01 <sup>b</sup>	7.16±0.89 <sup>a</sup>	5.49±0.51 <sup>b</sup>
9	4.62	己醛	15.20	15.99±1.04 <sup>a</sup>	14.9±0.77 <sup>b</sup>	13.33±1.02 <sup>a</sup>	9.78±0.84 <sup>b</sup>
10	6.16	(E)-2-己烯醛	20.47	21.32±1.04 <sup>a</sup>	36.91±1.04 <sup>a</sup>	32.99±1.56 <sup>a</sup>	22.00±2.05 <sup>b</sup>
11	7.76	庚醛	1.46	1.13±0.62 <sup>a</sup>	0.55±0.14 <sup>b</sup>	1.76±0.48 <sup>a</sup>	1.82±0.64 <sup>a</sup>
12	9.78	苯甲醛	ND	ND	ND	3.16±0.34 <sup>b</sup>	7.29±0.78 <sup>a</sup>
13	11.31	(E,E)-2,4-庚二烯醛	1.14	1.48±0.62 <sup>a</sup>	1.67±0.13 <sup>a</sup>	0.94±0.27 <sup>b</sup>	1.34±0.54 <sup>b</sup>
14	13.54	(E)-2-辛烯醛	2.05	3.63±0.96 <sup>a</sup>	3.98±0.57 <sup>a</sup>	1.52±0.37 <sup>b</sup>	4.2±0.91 <sup>a</sup>

转下页

接上页

15	13.94	(E)-2-庚烯醛	8.93	6.81±1.06 <sup>a</sup>	0.17±0.02 <sup>b</sup>	ND	ND
16	15.27	壬醛	2.33	3.2±0.13 <sup>a</sup>	3.72±0.28 <sup>a</sup>	1.99±0.36 <sup>b</sup>	3.48±0.27 <sup>b</sup>
17	18.95	癸醛	ND	1.18±0.76 <sup>a</sup>	0.81±0.29 <sup>b</sup>	1.10±0.38 <sup>a</sup>	0.78±0.19 <sup>b</sup>
18	22.43	十一醛	0.53	ND	0.18±0.05	ND	0.32±0.01
19	25.73	月桂醛	0.51	0.45±0.06 <sup>a</sup>	0.38±0.02 <sup>a</sup>	0.16±0.01 <sup>a</sup>	0.19±0.03 <sup>a</sup>
20	10.93	6-甲基-5-庚烯-2-酮	2.28	6.55±0.59 <sup>a</sup>	3.36±0.28 <sup>b</sup>	1.03±0.19 <sup>b</sup>	7.19±1.02 <sup>b</sup>
21	20.67	甲乙双酮	ND	1.16±0.27 <sup>a</sup>	1.03±0.08 <sup>a</sup>	0.09±0.02 <sup>a</sup>	0.07±0.01 <sup>a</sup>
22	27.18	(E)-6,10-二甲基-5,9-十一碳	ND	0.25±0.07 <sup>a</sup>	0.19±0.03 <sup>a</sup>	0.75±0.10 <sup>a</sup>	0.67±0.06 <sup>a</sup>
23	28.11	反式-β-紫罗兰酮	0.22	ND	ND	0.3±0.06 <sup>a</sup>	0.22±0.01 <sup>a</sup>
24	14.91	苯甲酸甲酯	0.74	1.85±0.46 <sup>a</sup>	0.34±0.11 <sup>b</sup>	0.32±0.04 <sup>b</sup>	1.39±0.78 <sup>b</sup>
25	17.68	苯甲酸乙酯	1.84	1.83±0.54 <sup>a</sup>	0.49±0.13 <sup>b</sup>	0.6±0.01 <sup>b</sup>	2.39±0.11 <sup>a</sup>
26	19.47	2-甲基戊酸甲酯	ND	0.12±0.07 <sup>a</sup>	0.15±0.04 <sup>a</sup>	0.41±0.13 <sup>a</sup>	0.35±0.22 <sup>a</sup>
27	23.04	癸酸甲酯	ND	0.11±0.03 <sup>b</sup>	0.17±0.05 <sup>a</sup>	0.44±0.14 <sup>a</sup>	0.2±0.03 <sup>b</sup>
28	24.55	丁酸丁酯	ND	0.10±0.01	ND	0.3±0.05 <sup>a</sup>	0.17±0.02 <sup>b</sup>
29	25.36	癸酸乙酯	ND	0.21±0.02 <sup>b</sup>	0.33±0.05 <sup>a</sup>	0.3±0.02 <sup>b</sup>	0.45±0.05 <sup>a</sup>
30	27.24	邻苯二甲酸二甲酯	ND	0.11±0.03	ND	0.2±0.05 <sup>a</sup>	0.17±0.07 <sup>a</sup>
31	35.61	苯甲酸-2-乙基己基酯	1.44	ND	0.23±0.08	0.3±0.02 <sup>b</sup>	0.45±0.03 <sup>a</sup>
32	39.19	邻苯二甲酸丁异酯	ND	ND	ND	4.62±0.73 <sup>a</sup>	0.32±0.24 <sup>b</sup>
33	40.33	棕榈酸甲酯	ND	ND	ND	0.2±0.06 <sup>a</sup>	0.16±0.05 <sup>b</sup>
34	40.99	邻苯二甲酸二丁酯	ND	1.26±0.59	ND	6.06±0.16 <sup>a</sup>	5.54±0.92 <sup>b</sup>
35	41.10	邻苯二甲酸二癸酯	0.3	0.41±0.16	ND	0.44±0.16 <sup>a</sup>	0.25±0.08 <sup>b</sup>
36	6.59	2-甲基丁酸	ND	0.13±0.08 <sup>b</sup>	0.19±0.06 <sup>a</sup>	0.57±0.12 <sup>b</sup>	1.48±0.44 <sup>a</sup>
37	8.12	2-氨基-6-苯甲酸	ND	2.1±0.97 <sup>a</sup>	0.77±0.38 <sup>b</sup>	0.63±0.36 <sup>b</sup>	1.21±0.86 <sup>a</sup>
38	11.17	己酸	ND	0.19±0.05 <sup>b</sup>	0.21±0.09 <sup>a</sup>	0.53±0.11 <sup>b</sup>	0.65±0.07 <sup>a</sup>
39	17.66	苯甲酸	0.82	1.34±0.26 <sup>b</sup>	1.76±0.08 <sup>a</sup>	0.94±0.27 <sup>a</sup>	0.77±0.16 <sup>b</sup>
40	24.68	正癸酸	ND	ND	ND	0.23±0.07 <sup>a</sup>	0.16±0.03 <sup>b</sup>
41	7.32	苯乙烯	1.65	1.48±0.62 <sup>b</sup>	1.72±0.59 <sup>a</sup>	1.04±0.33 <sup>b</sup>	2.83±0.87 <sup>a</sup>
42	10.63	6-甲基-1-辛烯	0.37	0.92±0.15 <sup>a</sup>	0.42±0.16 <sup>b</sup>	0.29±0.08 <sup>b</sup>	0.59±0.13 <sup>a</sup>
43	12.31	D-柠檬烯	ND	2.00±0.73 <sup>a</sup>	0.78±0.32 <sup>b</sup>	0.20±0.42 <sup>b</sup>	0.45±0.17 <sup>a</sup>
44	18.72	十二烷	0.42	0.30±0.17 <sup>a</sup>	0.13±0.02 <sup>b</sup>	0.18±0.04 <sup>a</sup>	0.16±0.07 <sup>a</sup>
45	28.54	十五烷	0.34	0.29±0.06 <sup>a</sup>	0.22±0.09 <sup>a</sup>	0.21±0.10 <sup>a</sup>	0.19±0.08 <sup>a</sup>
46	32.31	癸烷	ND	0.46±0.11 <sup>a</sup>	0.19±0.08 <sup>b</sup>	0.35±0.10 <sup>a</sup>	0.22±0.09 <sup>b</sup>
47	28.98	2,4-二叔丁基苯酚	0.59	0.42±0.07 <sup>a</sup>	0.34±0.03 <sup>b</sup>	0.29±0.11 <sup>a</sup>	0.22±0.05 <sup>b</sup>

注: ND 表示未检出; 同一贮藏时期右肩字母不同表示差异显著 ( $p < 0.05$ ), 相同字母表示差异不显著。

果香是决定消费者对水果品质接受程度的重要因素。枣果实的独特风味受到品种、生长期、气候、贮藏和加工方法等诸多因素的影响<sup>[26,27]</sup>。冬枣果实在低温或常温贮藏后, 原本独特的果香会转变为异味, 这与风味物质的整体变化有很大关联。本实验通过检测冬枣果实在低温贮藏 75 d 过程中的香气成分, 共检测到 47 种物质, 其中相对含量较高的成分是(E)-2-己烯醛、己醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、(E)-2-戊烯-1-醇、(E)-2-庚烯醛和苯甲酸乙酯等, 这些物质构成冬枣典型的果香味, 这与 Chen 等<sup>[20]</sup>和 Reche 等<sup>[22]</sup>的研究结果一

致。研究表明, NO 熏蒸处理不仅对于果实保鲜具明显的效果, 同时也对采后果实贮藏期间的风味变化有一定的影响<sup>[28]</sup>。本实验研究结果表明, NO 熏蒸处理对于果实中的醇类、醛类和酯类物质影响显著。贮藏过程中, NO 熏蒸处理延缓了酯类物质的上升, 可能是由于对于抑制了酯类合成前体—醇类物质的上升。田长平等<sup>[28]</sup>研究表明, NO 熏蒸处理能抑制桃果实中酯类总量的增加, 进而影响果实香气。实验结果还表明, 对照果实在贮藏第 45 d 开始, 乙醇含量明显上升, 果实的酒精味加重, 同时贮藏后期酯类物质的增多,

这与乙醇含量的变化趋势相呼应,可能是乙醇促进了酯化反应的进行,但NO熏蒸处理后的冬枣乙醇含量上升较慢,明显低于对照,这可能是由于NO熏蒸处理抑制了乙醇代谢的关键酶,进而抑制了乙醇的积累,阻碍正常的酯化反应,导致酯类物质含量较低。

酯类物质作为果实香气的重要组成物,对于果实的风味有主导作用。酯类物质的合成是以乙醇和乙酰辅酶A为作底物,经醇乙酰基转移酶催化合成的。但果实中的乙醇酯化物和乙醇含量超过一定阈值时,就会产生异味,不但影响果实口感,还会加速病原菌侵染和褐变等。有研究证明,果实中的挥发性成分含量和种类会直接影响果实风味,有些成分如乙醛和乙醇过多会使果实丧失原有果香味甚至产生异味<sup>[29]</sup>。因此,结合本实验结果,可以说明过NO熏蒸处理改变了采后冬枣果实的挥发性成分,从而影响了果实在贮藏期的感官特性。

## 2.2 NO熏蒸处理对冬枣果实乙醇和乙醛含量的影响

的影响

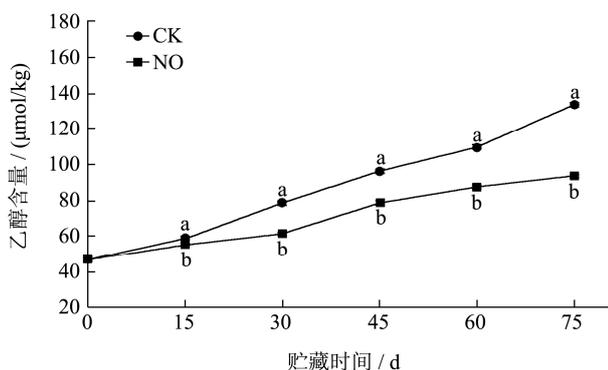


图1 NO熏蒸处理对冬枣果实贮藏期间乙醇含量的影响

Fig.1 The effect of NO fumigation treatment on ethanol content of winter jujube fruit during storage

注:不同小写字母表示同一时期NO处理和对照组比较具有显著性差异( $p < 0.05$ ),相同字母表示差异不显著,图2、3、4、5同。

如图1所示,冬枣果实贮藏期间的乙醇含量呈不断上升的趋势,贮藏前30d缓慢上升,贮藏30d后乙醇含量快速积累,但NO熏蒸处理能有效抑制果实乙醇含量的增加。在贮藏第30~75d时,NO熏蒸处理果实乙醇含量显著低于对照果实( $p < 0.05$ )。贮藏结束时,NO熏蒸处理组和对照果实乙醇含量分别为108.74 μmol/kg和133.43 μmol/kg,NO熏蒸处理组比对照组低了18.50% ( $p < 0.05$ )。说明NO熏蒸处理可以使冬枣果实贮藏过程中的乙醇含量维持在较低水平。

研究表明,冬枣果实采后贮藏中乙醇的大量积累

会严重影响果实的贮藏品质<sup>[30,31]</sup>。鲜枣果实采后容易出现“酒软”现象,乙醇发酵会引起果肉褐变并伴随着软化,产生浓重的“酒味”<sup>[32]</sup>。在本研究中,冬枣在0℃贮藏期间,果实的乙醇含量呈持续上升的趋势,说明虽然冷藏可以延缓果实衰老和品质劣变的速度,但不能遏制酒化的产生。但NO处理后的果实乙醇含量始终显著低于对照果实,这与孙丽娜等<sup>[16]</sup>人在22℃和4℃贮藏期间采用NO处理降低乙醇含量的研究结果相一致,说明NO熏蒸处理无论是在常温还是低温(0℃和4℃)均能够有效的减少乙醇的积累,减轻冬枣果实采后贮藏期间产生的异味。

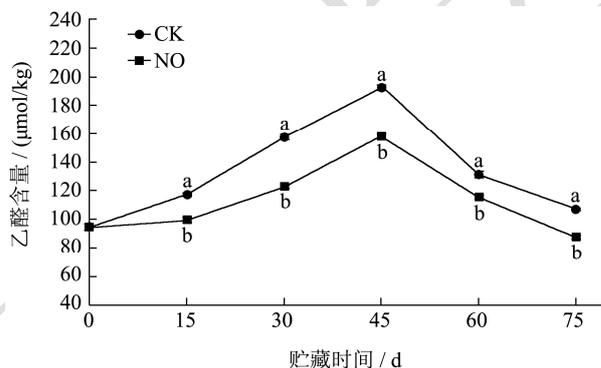


图2 NO熏蒸处理对冬枣果实贮藏期间乙醛含量的影响

Fig.2 The effect of NO fumigation treatment on acetaldehyde content of winter jujube fruit during storage

冬枣果实冷藏期间乙醛含量呈先上升后下降的趋势(见图2),并在贮藏第45d时达到最大值。整个贮藏过程中,NO熏蒸处理果实的乙醛含量始终低于对照果实,且存在显著差异( $p < 0.05$ )。贮藏第45d时,对照果实的乙醛含量为193.00 μmol/kg,而NO熏蒸处理果实的乙醛含量仅为158.21 μmol/kg,比对照果实低了18.03% ( $p < 0.05$ )。说明NO熏蒸处理可以显著抑制冬枣果实贮藏期间乙醛含量的积累。

采后果实乙醛和乙醇的积累会对果实组织的细胞造成伤害,造成一系列生理代谢紊乱,并产生异味,出现褐变现象,加速果实腐烂变质,严重影响果实风味和品质<sup>[6,8]</sup>。本试验结果表明,冬枣果实的乙醛含量随着贮藏时间的延长呈先上升后下降的趋势,这可能是由于乙醛作为乙醇合成的前提物质,贮藏后期会向乙醇转化导致的<sup>[33]</sup>。这与贮藏后期乙醇含量的快速积累(图1)相对应。NO熏蒸处理能有效抑制冬枣果实乙醛含量的增加,维持较低的乙醇含量,这与孙丽娜等<sup>[16]</sup>的研究结果一致。

## 2.3 NO熏蒸处理对冬枣果实丙酮酸含量的影响

如图3所示,冬枣果实冷藏期间丙酮酸含量呈先上升后下降的趋势。对照果实的丙酮酸含量在贮藏的

前 45 d 迅速上升,并在贮藏第 45 d 时达到最大值,随后缓慢下降。NO 熏蒸处理组果实丙酮酸含量的变化趋势与对照果实类似,但整个贮藏过程都显著低于对照果实。贮藏第 45 d 时,NO 熏蒸处理果实丙酮酸含量为 0.19 mg/kg,比对照果实(0.32 mg/kg)低了 41.18% ( $p<0.05$ )。贮藏第 60 d 和第 75 d 时,NO 熏蒸处理组果实丙酮酸含量比对照果实分别低了 45.66% 和 43.15% ( $p<0.05$ )。

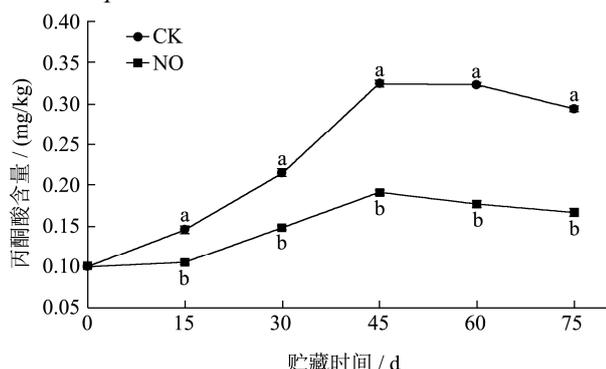


图 3 NO 熏蒸处理对冬枣果实贮藏期间丙酮酸含量的影响

Fig.3 The effect of NO fumigation treatment on pyruvic acid content of winter jujube fruit during storage.

丙酮酸是糖酵解的最终产物,也是乙醇发酵与 TCA 循环的分界点,为乙醇发酵提供了一定的反应底物。贾营<sup>[34]</sup>在对猕猴桃果实乙醇代谢的研究中发现,丙酮酸的大量积累可能是引起贮藏中后期乙醇含量上升的重要原因。李鹏等<sup>[33]</sup>研究表明,采后冬枣果实中丙酮酸和乙醛含量的变化是造成乙醇积累的主要原因。本研究结果表明,冬枣果实冷藏期间的丙酮酸含量先上升后缓慢下降,而 NO 熏蒸处理能显著抑制丙酮酸含量的大量积累,从而降低乙醇含量的积累。

## 2.4 NO 熏蒸处理对冬枣果实 PDC 和 ADH 酶

活性的影响

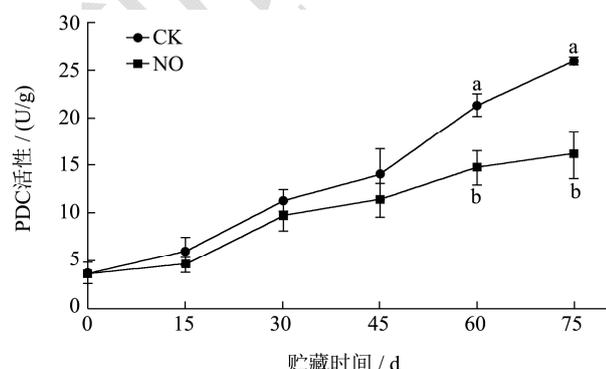


图 4 NO 熏蒸处理对冬枣果实贮藏期间 PDC 活性的影响

Fig.4 The effect of NO fumigation treatment on PDC activity of winter jujube fruit during storage

冬枣果实的 PDC 活性变化如图 4 所示。对照果实的 PDC 活性在贮藏前 45 d 稳定上升,贮藏 45 d 后迅速上升,并在贮藏结束时达到最大值。NO 熏蒸处理组果实的 PDC 活性在贮藏过程中的变化趋势与对照果实相似,但 PDC 活性始终低于对照果实,并在贮藏第 60 d 和第 75 d 时与对照果实差异显著 ( $p<0.05$ )。贮藏结束时,NO 熏蒸处理组果实的 PDC 活性为 16.07 U/g,比对照果实低了 37.73% ( $p<0.05$ )。

据报道,在 PDC 的催化作用下,丙酮酸会转化形成乙醛。随着酶活性上升,乙醛含量不断增加,细胞质中 pH 的下降会激活 PDC 活性,推测胞质 pH 降低和 PDC 活性的激活,是导致丙酮酸形成乙醛,进而形成乙醇的主要原因<sup>[35,36]</sup>。贾营<sup>[34]</sup>研究发现,猕猴桃果实中 PDC 和 ADH 活性与乙醛和乙醇的积累密切相关,1-MCP 处理可以通过抑制 PDC 和 ADH 活性及其基因表达来抑制果实采后的乙醇代谢,从而维持果实较好的贮藏品质。李盼盼等<sup>[37]</sup>也报道了类似的结果,抑制猕猴桃果实中 PDC 和 ADH 活性及其基因表达,可以降低乙醛和乙醇的积累,从而保持果实的风味和品质。本研究中,NO 熏蒸处理显著降低了冬枣果实贮藏期间 PDC 的活性,这与较低乙醛含量(图 2)相对应,说明 NO 熏蒸处理可以通过降低 PDC 的活性来抑制乙醇的积累,从而维持较好的果实风味。

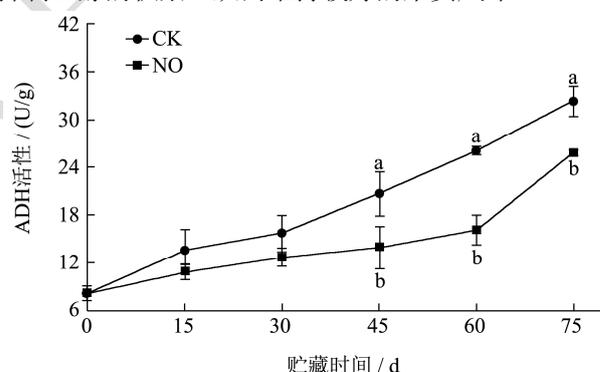


图 5 NO 熏蒸处理对冬枣果实贮藏期间 ADH 活性的影响

Fig.5 The effect of NO fumigation treatment on ADH activity of winter jujube fruit during storage

对照组和 NO 熏蒸处理组冬枣果实的 ADH 活性随着贮藏时间的延长而不断上升,但 NO 熏蒸处理果实的 ADH 活性始终低于对照果实,并在贮藏第 45~75 d 时差异显著(图 5)。贮藏第 60 d 和 75 d 时,NO 熏蒸处理组 ADH 活性比对照果实分别低了 38.13% 和 20.05% ( $p<0.05$ )。说明 NO 熏蒸处理可以显著抑制冬枣果实冷藏期间 ADH 活性的增加。

冬枣果实中乙醇含量(图 1)的变化与 ADH 酶活性变化趋势一致,说明果实中乙醇的生成与 ADH 密切相关。宋倩倩<sup>[38]</sup>研究表明 1-MCP 处理可通过影响

乙烯的产生从而抑制 ADH 活性, 继而抑制猕猴桃果实中乙醇的累积。宋夏钦<sup>[39]</sup>研究表明草酸处理能够显著抑制 ADH 活性, 控制乙醇的转化率, 提升‘布鲁诺’猕猴桃的食用品质。这些结果说明采后处理果实可通过改变 ADH 的活性进而影响乙醇的合成。本研究结果也证实了 NO 熏蒸处理可以显著降低冬枣果实的 ADH 活性, 这与 NO 熏蒸处理果实具有较低乙醇含量相对应(图 5), 说明 NO 熏蒸处理能通过抑制 ADH 活性来减少乙醇含量的积累, 这与孙丽娜等人在 22 °C 和 4 °C 下得到的结果相一致。

### 3 结论

冬枣在低温贮藏期间, 果实的香气物质主要有醛类、醇类、酯类和少量的酸、酮类, 贮藏期间果实醛类物质的变化以先上升后下降为主, 醇类和酯类物质的种类和含量大致多成增加状态, NO 对于醛类物质的作用因贮藏时间和醛类种类有所不同, 而 NO 能够有效抑制醇类和酯类含量增加, 较好地保留了果实的风味。进一步对采后果实的乙醇和乙醛含量检测, 结果表明 NO 熏蒸处理显著抑制了 PDC 和 ADH 酶的活性, 进而抑制了果实贮藏期间乙醇和乙醛含量的积累, 延缓了果实酒精异味产生的进程。

### 参考文献

- [1] Chambers I V E, Koppel K. Associations of volatile compounds with sensory aroma and flavor: The complex nature of flavor [J]. *Molecules*, 2013, 18(5): 4887
- [2] Barrett D M, Beaulieu J C, Shewfelt R. Color, flavor, texture, and nutritional quality of fresh-cut fruits and vegetables: Desirable levels, instrumental and sensory measurement, and the effects of processing [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2010, 50(5): 369-389
- [3] Infante R, Farcuh M, Meneses C. Monitoring the sensorial quality and aroma through an electronic nose in peaches during cold storage [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2008, 88(12): 2073-2078
- [4] Obenland D, Collin S, Sievert J, et al. Commercial packing and storage of navel oranges alters aroma volatiles and reduces flavor quality [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2008, 47(2): 159-167
- [5] Pesis E. The role of the anaerobic metabolites, acetaldehyde and ethanol, in fruit ripening, enhancement of fruit quality and fruit deterioration [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2005, 37(1): 1-19
- [6] Tietel Z, Lewinsohn E, Fallik E, et al. Elucidating the roles of ethanol fermentation metabolism in causing off-flavors in mandarins [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(21): 11779-11785
- [7] Pasentis K, Falara V, Pateraki I, et al. Identification and expression profiling of low oxygen regulated genes from *Citrus flavedo* tissues using RT-PCR differential display [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58(8): 2203-2216
- [8] Shi J X, Goldechmidt E E, Goren R. Molecular, biochemical and anatomical factors governing ethanol fermentation metabolism and accumulation of off-flavors in mandarins and grapefruit [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2007, 46(3): 242-251
- [9] Obenland D, Arpaia M L. Effect of harvest date on off-flavor development in mandarins following postharvest wax application [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 149: 1-8
- [10] Botondi R, Russo V, Mencarelli F. Anaerobic metabolism during short and long term storage of kiwifruit [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2012, 64(1): 83-90
- [11] Boeckx J, Hertog M, Hertog A, et al. Regulation of the fermentative metabolism in apple fruit exposed to low-oxygen stress reveals a high flexibility [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 149: 118-128
- [12] Manjunatha G, Lokesh V, Neelwarne B. Nitric oxide in fruit ripening: Trends and opportunities [J]. *Biotechnology Advances*, 2010, 28(4): 489-499
- [13] Wills R B H, Ku V V V, Leshem Y Y. Fumigation with nitric oxide to extend the postharvest life of strawberries [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2000, 18(1): 75-79
- [14] Zhu S H, Liu M C, Zhou J. Inhibition by nitric oxide of ethylene biosynthesis and lipoxygenase activity in peach fruit during storage [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2006, 42(1): 41-48
- [15] Cheng G P, Yang E, Wang J L, et al. Effect of nitric oxide on ethylene synthesis and softening of banana fruit slice during ripening [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57: 5799-5804
- [16] 孙丽娜, 刘孟臣, 朱树华, 等. 一氧化氮处理对冬枣贮藏期间乙醇代谢及相关品质的影响 [J]. *中国农业科学*, 2007, 40(12): 2827-2834  
SUN Li-na, LIU Meng-chen, ZHU Shu-hua, et al. Effect of nitric oxide on alcoholic fermentation and qualities of Chinese winter jujube during storage [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2007, 40(12): 2827-2834
- [17] Mukherjee. Recent advancements in the mechanism of nitric

- oxide signaling associated with hydrogen sulfide and melatonin crosstalk during ethylene-induced fruit ripening in plants [J]. Nitric Oxide, 2019, 82: 25-34
- [18] 张丽丽. 苹果和桃果实内一氧化氮代谢及其对香气合成的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2011
- ZHANG Li-li. Metabolism of nitric oxide and the effect on aroma biosynthesis in apple and peach fruits [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2011
- [19] Zhao Y T, Zhu X, Hou Y Y, et al. Effects of nitric oxide fumigation treatment on retarding cell wall degradation and delaying softening of winter jujube (*Ziziphus jujuba* Mill. cv. Dongzao) fruit during storage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 156: 110954
- [20] Chen Q Q, Song J X, Bi J F, et al. Characterization of volatile profile from ten different varieties of Chinese jujubes by HS-SPME/GC-MS coupled with E-nose [J]. Food Research International, 2018, 105: 605-615
- [21] Wang R R, Ding S H, Zhao D D, et al. Effect of dehydration methods on antioxidant activities, phenolic contents, cyclic nucleotides, and volatiles of jujube fruits [J]. Food Science and Biotechnology, 2016, 25(1): 137-143
- [22] Reche J, Hernández F, Almansa MS, et al. Physicochemical and nutritional composition, volatile profile and antioxidant activity differences in Spanish jujube fruits [J]. LWT - Food Science and Technology, 2018, 98: 1-8
- [23] Wang L N, Wang Y Q, Wang W Z, et al. Comparison of volatile compositions of 15 different varieties of Chinese jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) [J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(3): 1631-1640
- [24] Thewes F R, Brackmann A, Anese R O, et al. Effect of dynamic controlled atmosphere monitored by respiratory quotient and 1-methylcyclopropene on the metabolism and quality of 'Galaxy' apple harvested at three maturity stages [J]. Food Chemistry, 2017, 222(Complete): 84-93
- [25] 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 Jian-kang, JIANG Wei-bo, ZHAO Yu-mei. Experiment guidance of postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007
- [26] Chen Q Q, Bi J F, Wu X Y, et al. Drying kinetic and quality attributes of jujube (*Ziziphus jujuba* miller) slices dried by hot-air and short- and medium-wave infrared radiation [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 64(2): 759-766
- [27] Wu C S, Gao Q H, Guo X D, et al. Effect of ripening stage on physicochemical properties and antioxidant profiles of a promising table fruit, "pear-jujube" (*Ziziphus jujuba* Mill.) [J]. Scientia Horticulturae, 2012, 148: 177-184
- [28] 田长平, 王延玲, 刘遵春, 等. 1-MCP 和 NO 处理对黄金梨主要贮藏品质指标及脂肪酸代谢酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(14): 2962-2972
- TIAN Chang-ping, WANG Yan-ling, LIU Zun-chun, et al. Effect of 1-methylcyclopropene and nitric oxide on main fruit quality of 'Whangkeumbae' pear and related enzymes of fatty acid metabolism during storage [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(14): 2962-2972
- [29] Mitchell W C, Jelenkovic G. Characterizing NAD- and NADP-dependent alcohol dehydrogenase enzymes of strawberries [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science American Society for Horticultural Science, 1995, 120(5): 798-841
- [30] 申琳, 生吉萍. 乙醇代谢对冬枣果实外观品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2005, 4: 24-26
- SHEN Lin, SHENG Ji-ping. Effect of ethanol metabolism of ethanol on appearance value of Dongzao jujube [J]. Storage and Process, 2005, 4: 24-26
- [31] 李红卫. 冬枣采后衰老调控与乙醇积累机理的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2003
- LI Hong-wei. Studies on the senescence regulation and mechanism of ethanol accumulation of harvested "Brumal jujube" [D]. Beijing: China Agricultural University, 2003
- [32] 张彦生. 鲜枣的贮藏保鲜技术[J]. 新疆农业科技, 2007, 5: 28
- ZHANG Yan-sheng. Storage and preservation technology of fresh jujube [J]. Xinjiang Agricultural Science and Technology, 2007, 5: 28
- [33] 李鹏, 刘孟纯, 耿健强, 等. 冬枣采后乙醇积累的相关分析研究[J]. 食品科学, 2008, 29(4): 415-418
- LI Peng, LIU Meng-chun, GENG Jian-qiang, et al. Analysis of ethanol accumulation in post harvest winter jujube fruits [J]. Food Science, 2008, 29(4): 415-418
- [34] 贾莹. 1-MCP 处理对美味猕猴桃采后果实品质及乙醇代谢的影响[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2018
- JIA Ying. Effects of 1-MCP treatment on quality and ethanol metabolism in kiwifruit during storage at room temperature [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2018