

外源 NO 对豇豆采后贮藏品质的影响

张帆^{1,2,3,4}, 王红伟^{2,3,4}, 郑馥燕^{2,3,4}, 左进华^{2,3,4}, 王清^{2,3,4}, 孟德梅^{1*}

- (1. 天津科技大学食品科学与工程学院, 省部共建食品营养与安全国家重点实验室, 天津 300457; 2. 北京市农林科学院农产品加工与食品营养研究所, 北京 100097; 3. 果蔬农产品保鲜与加工北京市重点实验室, 北京 100097; 4. 农业农村部蔬菜采后处理重点实验室, 北京 100097)

摘要: **目的** 探究一氧化氮(NO)对豇豆采后贮藏品质的影响。**方法** 以硝普钠(sodium nitroprusside, SNP)为外源 NO 供体, 采用 0.3 mmol/L 的 SNP 溶液浸泡处理豇豆 10 min(以蒸馏水浸泡为对照), 测定 15°C 贮藏条件下豇豆贮藏品质和生理特性的变化。**结果** SNP 处理能很好地保持豇豆的感官品质, 有效保持其水分, 同时保持了豇豆营养物质(维生素 C、可溶性固形物、叶绿素)的含量。此外, 显著降低了乙烯释放量($P<0.05$), 较好地保持了硬度, 抑制了丙二醛含量的升高, 还降低了纤维素酶和多聚半乳糖醛酸酶的活性, 因此有效维持了细胞壁的完整性; 提高了抗氧化物质(总酚、类黄酮)的含量、抗氧化酶(抗坏血酸过氧化物酶、过氧化氢酶)的活性($P<0.05$), 并显著抑制了褐变相关指标(过氧化物酶、多酚氧化酶)的活性($P<0.05$)。**结论** 外源 NO 处理可以延长豇豆的采后贮藏期并保持其贮藏品质。

关键词: 豇豆; 外源 NO; 品质

Effects of exogenous NO on postharvest storage quality of *Vigna unguiculata* L.

ZHANG Fan^{1,2,3,4}, WANG Hong-Wei^{2,3,4}, ZHENG Yan-Yan^{2,3,4},
ZUO Jin-Hua^{2,3,4}, WANG Qing^{2,3,4}, MENG De-Mei^{1*}

(1. State Key Laboratory of Food Nutrition and Safety, College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 2. Institute of Agri-food Processing and Nutrition, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 3. Beijing Key Laboratory of Fruits and Vegetable Storage and Processing, Beijing 100097, China; 4. Key Laboratory of Vegetable Postharvest Processing, Ministry of Agriculture and Rural Areas, Beijing 100097, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of nitric oxide (NO) on the postharvest storage quality of *Vigna unguiculata* L.. **Methods** Sodium nitroprusside (SNP) was used as an exogenous NO donor, and 0.3 mmol/L SNP solution was used to soak into *Vigna unguiculata* L. for 10 min (distilled water soaking was used as control) to determine the storage quality and physiological characteristic changes during storage at 15°C. **Results** SNP treatment maintained the sensory quality of *Vigna unguiculata* L. well and effectively maintained their moisture, while it maintained the content of *Vigna unguiculata* L. nutrients (vitamin C, soluble solids, chlorophyll). In addition, it

基金项目: 北京市农林科学院协同创新中心建设项目(201915)、北京市农林科学院重大科技成果培育项目、北京市农林科学院创新能力建设专项(20210437)

Fund: Supported by the Collaborative Innovation Center of Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences (201915), the Major Science and Technology Achievement Cultivation Project of Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, and the Special Innovation Ability Construction Fund of Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences (20210437)

*通信作者: 孟德梅, 博士, 副教授, 主要研究方向为果蔬和食用菌采后生理与分子生物学。E-mail: mengdm@tust.edu.cn

*Corresponding author: MENG De-Mei, Ph.D, Associate Professor, College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, No.9, Thirteenth Street, Binhai New Area Economic Development Zone, Tianjin 300457, China. E-mail: mengdm@tust.edu.cn

significantly reduced ethylene release ($P<0.05$), better maintained hardness, inhibited the increase in malondialdehyde content, and also reduced cellulase and polygalacturonase activities, thus effectively maintained cell wall integrity; significantly increased the content of antioxidant substances (total phenols, flavonoids) and the activities of antioxidant enzymes (ascorbate peroxidase, catalase) ($P<0.05$). Besides, the activities of browning-related indicators (peroxidase, polyphenol oxidase) ($P<0.05$) were significantly inhibited. **Conclusion** Exogenous NO treatment prolongs the storage period and maintained the storage quality of *Vigna unguiculata* L..

KEY WORDS: *Vigna unguiculata* L.; exogenous NO; quality

0 引言

豇豆(*Vigna sinensis* L.)是豆科蝶形花亚科的一种可食用草本植物,目前全球豇豆的种植面积超过 12500 万 hm^2 ,已超过豌豆、蚕豆的种植规模^[1]。豇豆含有易于消化的植物蛋白质、碳水化合物、膳食纤维和水溶性维生素等营养物质,但豇豆在室温下不耐贮,一般货架期只有 2~3 d^[2-3],采收后若不及时进行处理或贮藏温度不当,豇豆在短时间内就会出现失水萎蔫、衰老、腐烂、纤维化、锈斑化等现象,造成极大的经济损失^[4]。目前豇豆的采后保鲜常用的技术主要有茉莉酸甲酯、涂膜、水杨酸、精胺等处理^[5]。提高豇豆采后贮藏品质对保障我国居民“菜篮子”供应稳定有重要意义^[5],但目前 NO 处理在豇豆采后贮藏方面鲜有报道。

NO 在果蔬采后保鲜领域具有很重要的作用,NO 处理效果明显、省时省力。有研究表明,NO 熏蒸处理番茄果实能够延长番茄果实的破色期,从而延缓果实的衰老^[6]。但 NO 直接熏蒸果蔬可能会激发无氧呼吸,产生乙醇等有害物质毒害果蔬,且 NO 气体处理时需要无氧环境,硝普钠(sodium nitroprusside, SNP)是一种在水溶液中释放的 NO 供体^[7]。SNP 浸泡处理可以避免无氧环境的限制,且对果蔬产品无残留毒性、使用浓度低、能够有效节约成本,从而达到更好的保鲜效果^[8]。研究发现,5 $\mu\text{mol/L}$ 的 SNP 溶液浸泡处理通过减缓营养物质的流失,从而更好地保持了草莓采后品质^[9];0.25 mmol/L SNP 溶液处理南果梨能有效降低南果梨果实质量损失率以及呼吸强度,抑制果胶物质降解酶活力,从而延缓果实软化并保持果实贮藏品质^[10]。目前,SNP 已广泛应用于蓝莓^[11]、苹果^[12]、梨^[13]、猕猴桃^[14]、荔枝^[15]等果蔬的保鲜贮藏方面,均可以不同程度地延长采后贮藏期。目前,有关豇豆贮藏保鲜方面的研究主要集中在涂膜、保鲜剂熏蒸等方面,保鲜剂浸泡方面相对研究较少。

本研究前期实验采用不同浓度的 SNP (0、0.2、0.3、0.4 mmol/L)处理豇豆,结果发现经 0.3 mmol/L 的 SNP 浸泡处理的豇豆外观品质最好。为此,本研究以豇豆为试材,采用 0.3 mmol/L 的 SNP 溶液作为 NO 供体进行浸泡处理,研究其对豇豆生理指标的影响,以期为豇豆采后贮藏品质的有效保持提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

精益 506 号豇豆:购于海淀区新发地农贸市场,当日立即运回北京市农林科学院农产品加工与食品营养研究所农产品采后生理与调控技术实验室,选取无病虫害、无机械伤、无缺损、成熟度基本一致的豇豆进行实验。

聚乙烯膜(0.03 mm,北京市盾雪花有限公司)。

硝普钠(分析纯,上海麦克林生化科技有限公司);乙二胺四乙酸、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、交联聚乙烯吡咯烷酮、愈创木酚、三氯乙酸(trichloroacetic acid, TCA)、硫代巴比妥酸、无水醋酸钠、30% H_2O_2 溶液(分析纯,西陇化工股份有限公司);邻苯二酚(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);乙酸、丙酮、乙醇、浓盐酸、甲醇(分析纯,天津光复科技发展有限公司);纤维素酶(cellulase, CX)、多聚半乳糖醛酸酶(polygalacturonase, PG)试剂盒(北京索莱宝科技有限公司)。

1.2 主要仪器与设备

UV-1800 紫外-可见分光光度计(上海精密科学仪器有限公司);TA-XT plus 质构仪(北京微讯超技仪器技术有限公司);Chroma-Meter CR-400 色彩色差仪[柯盛行(杭州)仪器有限公司];IKA-M20 研磨机[艾卡(广州)仪器设备有限公司];TGL-16G-A 高速冷冻离心机(广州晟龙实验仪器有限公司);安捷伦 7820A 气相色谱仪(美国安捷伦公司);YP20002 型电子天平(感量 0.01 mg,余姚市金诺天平仪器有限公司)。

1.3 方法

1.3.1 样品保鲜处理

将用于实验的豇豆分为两组,分别做以下处理。(1)空白对照组(CK 组):使用蒸馏水浸泡 10 min。(2)实验组(SNP):将豇豆置于 SNP 浓度为 0.3 mmol/L 的溶液中浸泡 10 min 后自然晾干。晾干后将两组豇豆按每把 500 g 捆扎,装入专用保鲜袋(规格为 42.0 $\text{cm}\times 30.5$ cm ,厚度为 0.03 mm)距袋口 2 cm 处用普通橡皮筋绕扎住袋口,放置于 15 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 80%的冷库中贮藏,每 2 d 取 1 次样,测定主要理化指标。每个处理重复 3 次,整个实验重复 2 次。

1.3.2 测定项目及方法

(1) 感官评价的测定

豇豆感官评分依据豇豆的新鲜度、锈斑、霉菌、腐烂、衰老等情况确定, 具体方法参照 FAN 等^[16]的方法进行测定。

(2) 失重率的测定

失重率的计算如公式(1):

$$\text{失重率}/\% = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_0 , 豇豆的初始质量, g; m_t , 豇豆贮存时间 t 时的质量, g。

(3) 乙烯释放量的测定

将豇豆约 0.5 kg 放入密封盒中平衡 6 h, 彻底排除带针无菌注射器内空气后, 抽取 1 mL 气体。为取得有代表性气体, 应将注射器针杆反复推拿 4 次后再取出气样, 并将注射器针迅速插入橡皮塞, 以防气体泄漏, 两处理组各取 3 针气样, 使用安捷伦 7820A 气相色谱仪进行乙烯释放量的测定, 单位为 $\mu\text{L}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ 。

(4) 质构的测定

质构测定参考 XU 等^[17]的方法。从每组中随机抽取 3 个豇豆样本, 测试条件为: P/2 型号探头, 测前速度 2.0 mm/s, 测试速度 1.0 mm/s, 测后速度 1.0 mm/s, 两次压缩时间间隔为 2 s, 探头测试距离为 3.0 mm, 触发载荷为 10.0 g。通过对典型的 TPA 质构特征曲线的分析, 得到豇豆的硬度参数。

(5) 丙二醛含量的测定

丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定。1 g 豇豆组织用 TCA 溶液提取, 然后测定 450、532 和 600 nm 波长处吸光度。

(6) 可溶性固形物含量的测定

可溶性固形物(soluble solids, TSS)含量使用手持式数显折光仪进行测定。随机选取豇豆的一段果皮, 将其包裹于纱布中, 用研磨棒捶打至有汁液流出, 将豇豆汁液滴到用蒸馏水洗净的检测镜面, 记录读数, 重复 3 次实验, 结果取平均值。

(7) 维生素 C 含量的测定

维生素 C (vitamin C, VC)含量的测定参考徐冬颖等^[18]的方法。

(8) 叶绿素含量的测定

叶绿素含量测定采用曹建康等^[19]的方法提取, 该实验在避光条件下进行, 绿素含量以 mg/g 表示。

(9) 总酚、类黄酮含量的测定

总酚和类黄酮的量测定采用曹建康等^[19]的方法。以 1%盐酸-甲醇溶液为提取液, 测定每 0.5 g 豆荚样品在 325 nm 和 280 nm 波长处的吸光值。

(10) 相关酶活性的测定

过氧化物酶(peroxidase, POD)、多酚氧化酶(polyphenol

oxidase, PPO)、过氧化氢酶(catalase, CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(ascorbate peroxidase, APX)活性测定参考曹建康等^[19]的方法, 测定提取液在 410、470、290 和 240 nm 波长处的吸光值。

CX 和 PG 活性采用试剂盒中方法进行测定, 测定提取液在 550 nm 和 540 nm 波长处的吸光值。每个试剂盒的测定都对样品质量与提取液的比例进行调整, 以满足预期测定。

1.4 数据统计与分析

Excel 2021 软件用于数据整理, Origin 2021 软件用于绘图, SPSS 21 软件用于数据的 Duncan's 差异显著性分析, $P < 0.05$ 被认为是差异显著的, 误差结果以标准偏差表示, 实验至少重复 3 次测定。

2 结果与分析

2.1 SNP 处理对豇豆外观性状的影响

感官评价是判定豇豆新鲜度的一个重要指标^[20]。由图 1a 可知, 两实验组的豇豆在贮藏过程中感官评分逐渐下降, 贮藏 4 d 后, SNP 处理组的感官评分显著高于 CK 组 ($P < 0.05$), 且下降速度较为缓慢。贮藏至 8 d 时, SNP 处理组豇豆感官评分为 5, 这时豇豆在颜色、硬度和外观品质变化方面呈现出最大的可接受度, 并达到了商品极限。CK 组豇豆感官评分仅为 2, 失去食用价值。处理组相对 CK 组大概延长了 2 d 的保质期。表明 SNP 处理可有效减缓豇豆感官评分的下降, 这与郑秋丽等^[21]采用精胺处理豇豆的研究结论相一致。

豆角在采收后由于蒸腾和呼吸过程往往会失水减重^[22], 这可能与豇豆采后的自身呼吸作用、蒸腾失水和病原菌感染导致腐烂失水有关。由图 1b 可知, 豇豆的失重率随着贮藏时间的延长不断上升, 并且 SNP 处理后的豇豆失重率始终低于 CK 组, 并且在贮藏第 8 d 时, SNP 组的豇豆失重率(5.83%)显著低于 CK 组 (7.97%) ($P < 0.05$)。表明 SNP 能延缓失重率的升高从而保持豇豆的采后品质。这与聂娇娇等^[23]发现 SNP 处理可降低猕猴桃失重率, 从而提高其保鲜效果的结论一致。

2.2 SNP 处理对豇豆营养物质含量的影响

VC 和 TSS 为豇豆的重要营养品质^[16,20]。由图 2a 可以看出, 随着贮藏时间的延长, 豇豆的 VC 含量一直下降。在贮藏的 4 d 至 8 d 期间, SNP 处理组豇豆中的维 C 含量下降幅度一直显著低于 CK 组 ($P < 0.05$), 豇豆的初始 VC 含量为 33.37 mg/100 g。经过 8 d 的贮藏后, 含量减少为 19.39 mg/100 g, 然而 SNP 处理组豇豆的 VC 含量为 25.29 mg/100 g, 说明 SNP 对豇豆 VC 含量的下降有明显的抑制作用。TSS 包含糖、酸以及维生素等多种成分, 不仅

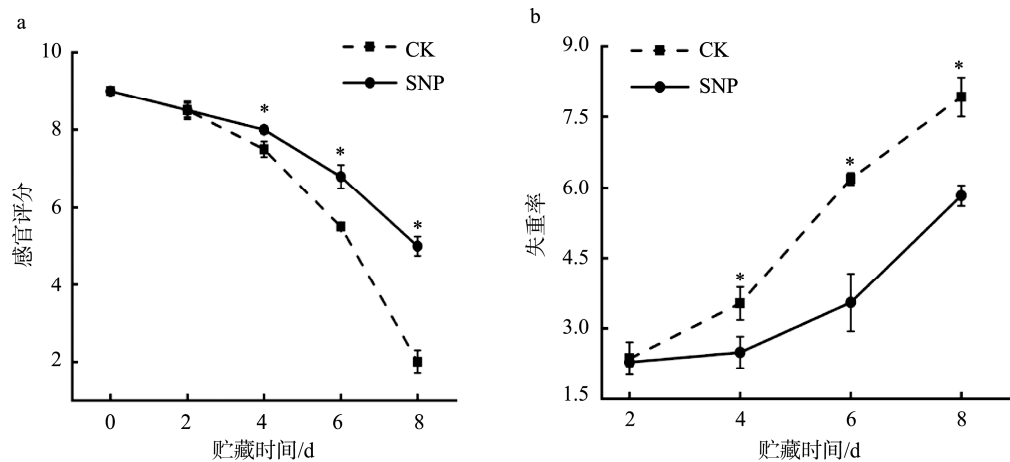
可以评价果蔬风味的好坏,还反映了果蔬中营养成分的变化^[24]。由图 2b 可以看出,豇豆的 TSS 随着贮藏时间的增长而逐渐降低,并且 SNP 处理后的豇豆 TSS 含量始终高于 CK 组。其他相关研究表明,20 $\mu\text{L/L}$ 的 NO 熏蒸处理草莓果实,其 VC 含量明显高于 CK 组^[9]。此外,杨睿等^[25]研究也表明 NO 处理能够延缓果蔬 VC 的流失以及可溶性固形物含量和硬度的下降。张琦等^[26]的研究也表明硝酸钠可保持 VC 和 TSS 含量从而改善香蕉采后品质。表明 SNP 处理可以保持豇豆的营养品质,减缓 VC 和 TSS 含量的下降。

随着果蔬的成熟衰老,叶绿素开始分解,果蔬的颜色逐渐转黄^[27]。由图 2c 可知,随着贮藏时间的延长,两组的叶绿素含量总体呈缓慢下降趋势,且 SNP 处理组的豇豆叶绿素含量始终高于 CK 组,贮藏第 8 d 时,SNP 叶绿素含量下降至 40.63 mg/100 g,CK 组的叶绿素含量为 40.29 mg/100 g,由此表明 SNP 对豇豆有一定的护绿效果,

这与张福平^[28]的研究结果相似。

2.3 SNP 处理对豇豆乙烯释放速率的影响

乙烯是调节水果和蔬菜成熟和老化的一个关键因素,果蔬在其生长发育中都会释放乙烯,而果蔬的软化主要与乙烯产生有关^[29]。由图 3 可以看出,采后豇豆的乙烯释放量随贮藏时间的延长整体呈先下降后上升再下降的趋势。在贮藏初期,CK 组豇豆和 SNP 处理的豇豆乙烯释放量无明显差异,在贮藏第 4 d 时,CK 组豇豆的乙烯释放量迅速上升,在第 6 d 时达到了乙烯高峰[4.76 $\mu\text{L}/(\text{kg}\cdot\text{h})$],而 SNP 处理组明显减少了乙烯的生成。并且在贮藏后期(4-8 d) SNP 组的豇豆乙烯释放率始终低于 CK 组豇豆($P<0.05$)。表明 SNP 处理可有效抑制乙烯的生成,从而延缓豇豆采后的衰老。之前的研究^[30]也发现采用 NO 气体熏蒸处理哈密瓜可以抑制乙烯释放量的上升,从而维持较高的果实贮藏品质。



注:与 CK 组相比,相同贮藏时间,*表示差异显著($P<0.05$),下同。

图 1 SNP 处理对豇豆感官评分(a)和失重率(b)的影响

Fig.1 Effects of SNP treatment on the sensory score (a) and mass loss (b) of *Vigna unguiculata* L.

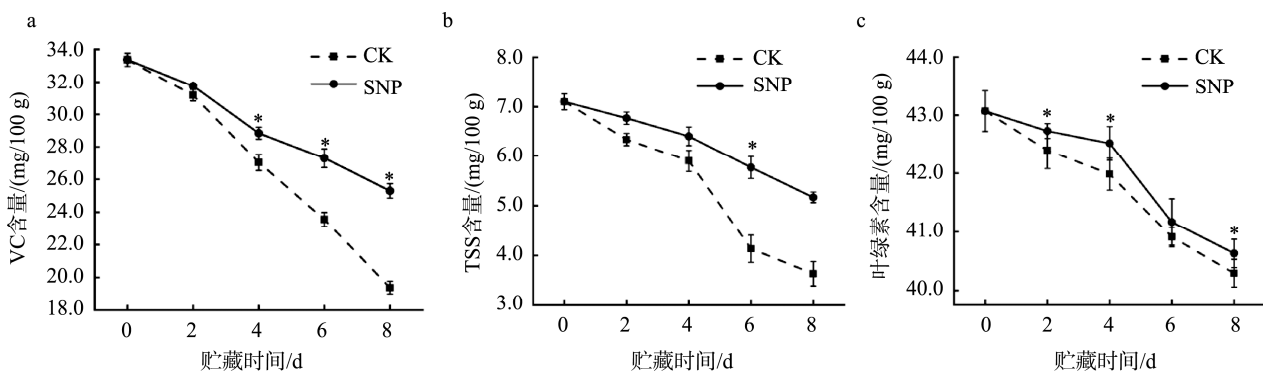


图 2 SNP 处理对豇豆 VC (a)、TSS (b)、叶绿素(c)含量的影响

Fig.2 Effects of SNP treatment on VC (a), TSS (b), chlorophyll (c) content of *Vigna unguiculata* L.

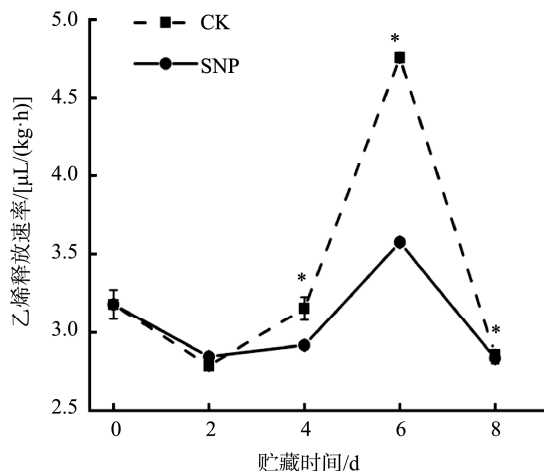


图 3 SNP 处理对豇豆乙烯释放率的影响
Fig.3 Effects of SNP treatment on ethylene release rates of *Vigna unguiculata* L.

2.4 SNP 处理对豇豆质地相关指标的影响

硬度是衡量果实软化的指标。由图 4a 可以看出, 豇豆的硬度随着贮藏时间的增长而逐渐降低, 并且可以看出 SNP 处理后的豇豆其硬度始终高于 CK 组 ($P < 0.05$)。在贮藏末期, CK 组豇豆的硬度下降了 61.49%, 而 SNP 组的豇豆下降了 36.63%。表明 SNP 可以一定程度上保持豇豆的硬度, 从而提高采后贮藏品质。这与 SNP 处理草莓果实^[9]

的研究结果相一致。

MDA 与膜的完整性密切相关, 是衡量细胞膜过氧化程度的一个指标。由图 4b 可以看出, 豇豆在贮藏过程中 MDA 含量显著升高, 其中 CK 组豇豆的 MDA 积累量一直显著高于 SNP 处理组 ($P < 0.05$)。贮藏至 8 d 时, CK 组和 SNP 处理组豇豆的 MDA 含量分别为初始值的 2.86 和 2.15 倍, 这可能是由于豇豆的新陈代谢随着贮藏时间的延长而逐渐减少、自由基产生的速度减慢, 膜脂质氧化的程度也降低。这与谢晶等^[31]对荔枝果实的研究结果一致, 说明 SNP 处理可以有效抑制 MDA 的积累, 延缓膜脂过氧化反应, 维持豇豆细胞壁组织的完整性。

许多研究表明, 与细胞壁代谢有关的酶, 如 β -半乳糖苷酶 (β -galactosidase, β -Gal)、木葡聚糖内转糖基酶 (xyloglucan endotransglycosylase, XET)、 β -葡萄糖苷酶 (β -glucosidase, β -Glu) 和 CX 等, 有助于细胞壁多糖的分解, 从而导致果实贮藏品质下降。由图 4c 可知, PG 的活性整体呈现升高的趋势, 并且在贮藏第 2~6 d 时, SNP 处理组显著 ($P < 0.05$) 低于 CK 组, 贮藏至第 8 d 时, SNP 组的 PG 活性略高于 CK 组, 表明在一定程度上, SNP 处理可在豇豆贮藏的中期对 PG 活性有一定的抑制作用。这与之前采用 SNP 处理抑制草莓果实中 PG、CX 来维持细胞壁结构, 从而减缓果实硬度下降的研究结果相似^[32]。由图 4d 可知, CX 的活性整体呈上升的趋势, 在第 6 d 达到峰值, 此时 CK 组

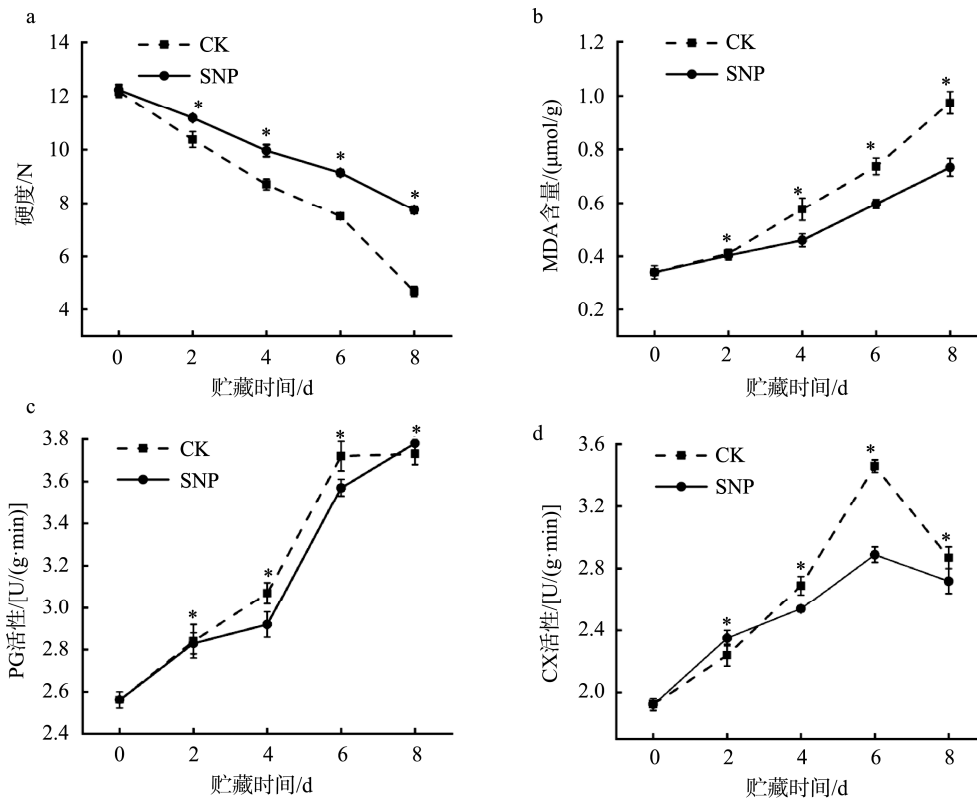


图 4 SNP 处理对豇豆硬度(a)、MDA 含量(b)、PG 活性(c)、CX 活性(d)的影响
Fig.4 Effects of SNP treatment on hardness (a), MDA content (b), PG activity (c) and CX activity (d) of *Vigna unguiculata* L.

的活性是 SNP 处理组的 1.2 倍, 随后两组 CX 活性均有下降的趋势。相较于 CK 组处理, SNP 处理组 CX 活性整体上升趋势波动较为缓慢, 并且在贮藏第 4~8 d 期间, SNP 处理组 CX 活性显著($P<0.05$)低于 CK 组。贮藏至第 8 d 时, CK 组和 SNP 处理组豇豆的 CX 活性分别为初值的 1.49 和 1.42 倍。结果表明, SNP 处理有效抑制了豇豆 CX 活性的升高。PG 是采后果蔬中果胶降解的一种关键酶, PG 通过促进半乳糖醛酸的水解导致细胞壁松动, 最终使得果实软化^[33]。

2.5 SNP 处理对豇豆抗氧化及褐变相关指标的影响

总酚和类黄酮作为果蔬中的非酶抗氧化成分, 与果蔬的成熟衰老、组织褐变、抗逆性等密切相关^[24]。由图 5a、b 可以看出豇豆的总酚和类黄酮含量在贮藏期间总体均呈现先增加后降低的趋势。其中 SNP 组豇豆的总酚含量上升幅度一直高于 CK 组, 并且在贮藏第 4 d 达到峰值, 这可能是采后豇豆自身的一个成熟过程导致酚类化合物的积累。第 8 d 时 SNP 组较初值下降了 4.76%, 而 CK 组豇豆的总酚含量与初值相比下降了 13.64%。说明 SNP 处理可以保持豇豆总酚的含量。此外, CK 组的类黄酮含量在整个贮藏期缓慢上升, 在第 8 d 时类黄酮的含量较初值 0.9 OD₃₂₅/g 增加到 1.8 OD₃₂₅/g, 而 SNP 组豇豆的类黄酮含量在贮藏期间先上升后下降, 由初始值增加到 2.6 OD₂₈₀/g, 且含量一直显著高于 CK 组($P<0.05$)。说明 SNP 可以有效提高采后豇豆的类黄酮含量。这与 NO 处理猕猴桃通过维持总酚和类黄酮的含量来改善果实贮藏期间品质的研究结果一致^[14]。

APX 作为重要抗氧化酶, 可以减少 H₂O₂ 对果实的伤害, 可以将 O₂⁻ 转化为 O₂ 和 H₂O^[34-35]。在贮藏期间, 两组 APX 的活性均呈现先上升后下降的趋势, 并且 SNP 组 APX 活性显著高于 CK 组是在贮藏的第 4 d 开始, 并维持到第 8 d ($P<0.05$) (图 5c)。SNP 组的 APX 活性在第 4 d 达到峰值 0.8 U/(g·min), 是 CK 组的 1.14 倍, 之后两组 APX 活性呈现缓慢下降的趋势, 在贮藏末期, 两组的 APX 活性分别为 0.59 U/(g·min) 和 0.63 U/(g·min)。说明 SNP 处理影响了 APX 的活性, 并且在贮藏中后期显著延缓了 APX 的下降。这与 ZHANG 等^[35]采用 SNP 处理红毛丹果实的研究结果相一致。

豇豆的成熟衰老源于活性氧和自由基的积累, 两者之间的平衡一旦破坏, 导致过多的活性氧无法代谢, 就会使成熟衰老加剧, CAT 是最主要的活性氧清除剂, 能够有效清除豇豆自身产生的过氧化物, 可以减缓过氧化物对豇豆组织细胞的毒害性。豇豆在贮藏期间的 CAT 活性整体呈现升高的趋势, 且 CK 组 CAT 活性一直低于 SNP 处理组($P<0.05$) (图 5d)。在贮藏第 8 d 时, SNP 组的 CAT 活性 673 U/(g·min), 为 CK 组的 1.02 倍。因此, SNP 处理可以增强 CAT 活性, 加速活性氧的清除, 较好的维持了豇豆的品质。这与郑秋丽等^[21]使用精胺处理豇豆的研究结果相一致。

POD 在许多果实上可表现为一种衰老酶, 其活性的升高可作为果蔬成熟和衰老的指标之一。POD 在植物体内具有两种作用, 一方面 POD 可以清除过氧化氢(H₂O₂)、脂过氧化物、活性氧, 维持植物体内活性氧代谢平衡; 另一方面,

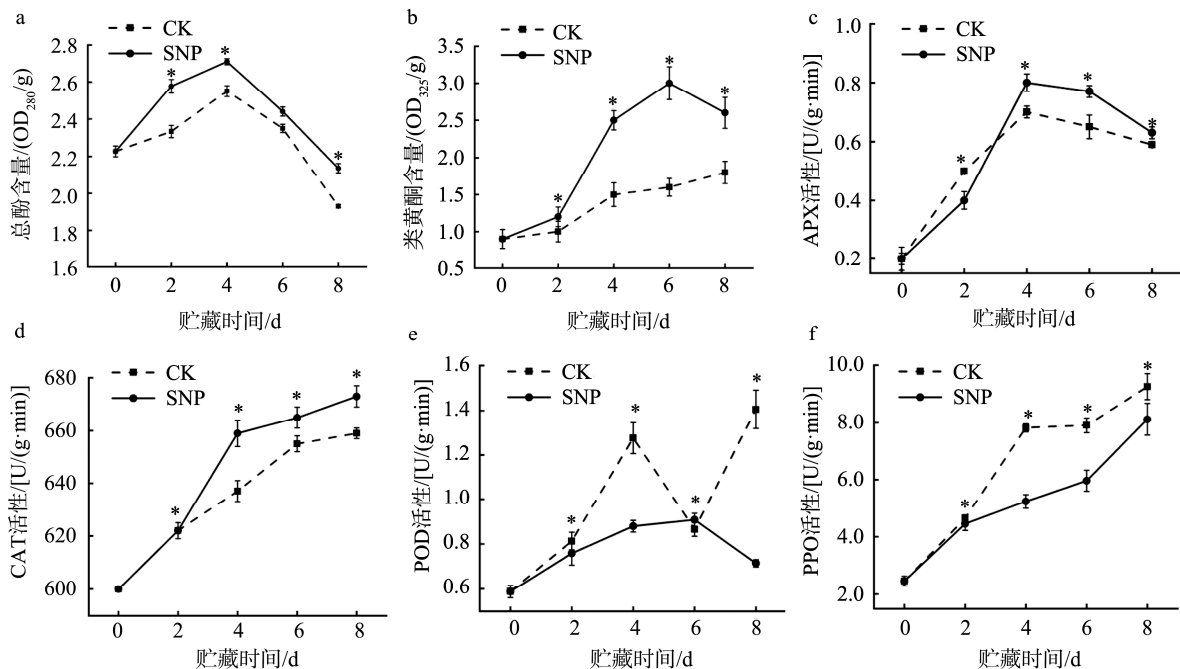


图5 SNP 处理对豇豆总酚(a)、类黄酮(b)含量以及对豇豆 APX (c)、CAT (d)、POD (e)、PPO (f)活性的影响

Fig.5 Effects of SNP treatment on total phenol (a), flavonoid (b) content, APX (c), CAT (d), POD (e) and PPO (f) activity of *Vigna unguiculata* L.

在 H_2O_2 存在情况下, POD 可以氧化酚类以及类黄酮的氧化和聚合, 导致植物组织褐化^[36]。在整个贮藏期间, CK 组的 POD 活力处于不稳定的趋势, 而 SNP 组豇豆的 POD 活力变化趋势较为平缓。CK 组豇豆的 POD 活性贮藏 0~4 d 内快速上升, 而在 4~6 d 活性骤然下降, 之后又快速上升(图 5e)。而 SNP 处理的豇豆 POD 活性前 4 d 缓慢上升, 并且活性均低于 CK 组, 而在贮藏第 6 d 时, SNP 组的 POD 活性略高于 CK 组, 两组的活性分别为 $0.91 U/(g \cdot min)$ 和 $0.87 U/(g \cdot min)$ 。且整个贮藏期间 SNP 处理显著抑制了豇豆 POD 活力 ($P < 0.05$)。这与 SHABANIANA 等^[37]采用外源 NO 提高 gerbera 花采后品质的研究结果相似。

酶促褐变是采后果蔬发生褐变的主要类型, 酚氧化酶将酚类物质氧化为醌, 接着醌类聚合形成褐色色素, 引起植物组织褐变^[38]。PPO 是采后果蔬发生酶促褐变的含铜质体金属酶, 有氧条件下 PPO 催化酚类物质变为红褐色, 再进一步与氨基酸氧化缩合形成黑褐色聚合物^[36,39]。在贮藏期间, 两组 PPO 活性整体呈现持续上升的趋势, 且 CK 组豇豆的 PPO 活性始终高于 SNP 组(图 5f)。在贮藏前期, CK 组和 SNP 组的 PPO 活性变化趋势相近, 贮藏至 4 d 时, CK 组的 PPO 活性骤然上升, 而 SNP 组的 PPO 活性在贮藏 2~4 d 呈现缓慢上升趋势, 在贮藏末期, 两组的 PPO 活性达到峰值, 分别为 $9.26 U/(g \cdot min)$ 和 $8.12 U/(g \cdot min)$ 。且整个贮藏期间 SNP 处理显著抑制了豇豆 PPO 活力 ($P < 0.05$)。这与 ADHIKARY 等^[40]采用 SNP 处理梨果实可降低 PPO 活性的结论相一致。

3 结 论

本研究表明, NO 可以在一定程度上维持豇豆的采后生理品质: 经 NO 处理的豇豆其感官评分显著高于 CK 组 CK 组, 失重率显著低于 CK 组, 并且 VC、TSS、叶绿素等营养物质的相对含量保持相对较高。此外, NO 处理显著减少了豇豆乙烯的生成, 抑制了 MDA 的积累并延缓了硬度的下降, 同时抑制了 PG 和 CX 的活性, 减缓了细胞膜脂过氧化程度, 从而控制了豇豆采后质地的劣变; 另外, NO 处理的豇豆其抗氧化物质(总酚、类黄酮、APX、CAT)的含量或活性也相对保持较高; 此外, NO 对豇豆的褐变相关指标(POD、PPO)也有一定的抑制作用。因此, NO 可以较好地保持豇豆采后生理品质, 以上结果对豇豆的采后贮藏保鲜提供指导意义。未来有待进一步研究豇豆贮藏品质中成熟衰老调控机制的影响: 通过挖掘苯丙烷生物合成、黄酮生物合成途径关键酶的功能, 在基因水平上解析豇豆采后的品质劣变规律。

参考文献

- [1] 张忠武, 蒋万, 邓正春. 我国矮生豇豆育种研究进展[J]. 现代农业科技, 2022, (12): 35-39.
ZHANG ZW, JIANG W, DENG ZC. Research progress on dwarf cowpea breeding in China [J]. Mod Agric Sci Technol, 2022, (12): 35-39.
- [2] OLIVEIRA TRM, ASSIS CF, OLIVEIRA-LIMA P, et al. Blanching

- effect on the quality and shelf-life characteristics of fresh cowpea grains [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] [J]. Foods, 2022, 11(9): 1295.
- [3] 张宇航, 王荣荣, 邢淑婕. 豇豆涂膜保鲜效果的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(3): 775-780.
ZHANG YH, WANG RR, XING SJ. Preservation effect of coating on cowpea [J]. J Food Saf Qual, 2015, 6(3): 775-780.
- [4] 韩丽春, 王正荣, 王清, 等. 豇豆采后保鲜技术的研究进展[J]. 现代食品科技, 2023, 39(6): 321-330.
HAN LC, WANG ZR, WANG Q, et al. Research progress on postharvest fresh-keeping technology of cowpea [J]. Mod Food Sci Technol, 2023, 39(6): 321-330.
- [5] 张伟, 万宣伍, 田卉, 等. 2 种植物生长调节剂对豇豆产量和品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(7): 2624-2628.
ZHANG W, WAN XW, TIAN H, et al. Effect of 2 kinds of plant growth regulators on the yield and quality of cowpea [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(7): 2624-2628.
- [6] YANG Y, ZHENG YY, LIU C, et al. Inhibition of nitric oxide synthesis delayed mature-green tomato fruits ripening induced by inhibition of ethylene [J]. Sci Hortic, 2016, 211: 95-101.
- [7] CHEN YR, GE YH, ZHAO JR, et al. Postharvest sodium nitroprusside treatment maintains storage quality of apple fruit by regulating sucrose metabolism [J]. Postharvest Biol Technol, 2019, 154: 115-120.
- [8] MITTAI I, JHANJI S, DHATT KK. Efficacy of sodium nitroprusside, a nitric oxide donor, on vase life and postharvest attributes of gladiolus spikes [J]. Acta Physiol Plant, 2021, 43(7): 1-12.
- [9] 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): 1959-1966.
HUANG YP, PENG WJ, ZHANG Y, et al. Effects of nitric oxide treatment on quality and phenolic metabolism in strawberry fruit [J]. J Nucl Agric Sci, 2016, 30(10): 1959-1966.
- [10] 程园, 李灿婴, 侯佳宝, 等. 采后硝普钠处理对南果梨果实贮藏品质和细胞壁降解酶的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(1): 252-257.
CHENG Y, LI CY, HOU JB, et al. Effect of postharvest sodium nitroprusside treatment on the storage quality and cell wall degrading enzymes of nanguo pears [J]. Food Sci, 2020, 41(1): 252-257.
- [11] DAI HY, JI SJ, ZHOU X, et al. Postharvest effects of sodium nitroprusside treatment on membrane fatty acids of blueberry (*Vaccinium corymbosum*, cv. Bluecrop) fruit [J]. Sci Hortic, 2021, 288: 110307.
- [12] ZHANG YX, WANG Y, CHEN FH, et al. Exogenous nitric oxide inhibits the respiratory metabolism of postharvest wax apple fruit and its role in the delayed cottony softening [J]. Sci Hortic, 2023, 317: 112043.
- [13] ZHENG SH, XU RQ, WEI J, et al. Nitric oxide effects on postharvest and Alternaria-infected pear fruit [J]. Postharvest Biol Technol, 2023, 195: 112-118.
- [14] YANG R, WANG J, CAI ZP, et al. Transcriptome profiling to elucidate mechanisms of the enhancement of the resistance to *Botryosphaeria dothidea* by nitric oxide in postharvest kiwifruit during storage [J]. LWT, 2022, 159: 113187.
- [15] LIU JL, ZHANG WL, HU MJ, et al. Nitric oxide is involved in melatonin-induced cold tolerance in postharvest litchi fruit [J]. Postharvest Biol Technol, 2023, 196: 112157.
- [16] FAN LL, WANG Q, LV JY, et al. Amelioration of postharvest chilling injury in cowpea (*Vigna sinensis*) by methyl jasmonate (MeJA) treatments [J]. Sci Hortic, 2016, 203: 95-101.
- [17] XU YJ, WANG D, ZHAO WT, et al. Low frequency ultrasound treatment enhances antibrowning effect of ascorbic acid in fresh-cut potato slices [J]. Food Chem, 2022, 380: 132190.
- [18] 徐冬颖, 闫志成, 刘婧, 等. 茉莉酸甲酯处理对模拟运输振动圆锥贮藏

- 品质的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(4): 271–275.
- XU DY, YAN ZC, LIU J, *et al.* Effect of methyl jasmonate treatment on storage quality of green bell pepper after transportation vibration simulation [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(4): 271–275.
- [19] 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 JK, JIANG WB, ZHAO YM. Postharvest physiological and biochemical experimental guidance for fruits and vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.
- [20] 史君彦, 郑秋丽, 王清, 等. LED光照处理对豇豆采后贮藏品质和生理特征的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(4): 250–253, 259.
- SHI JY, ZHENG QL, WANG Q, *et al.* Effect of LED irradiation on storage quality and physiological property of cowpea during postharvest storage [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2018, 39(4): 250–253, 259.
- [21] 郑秋丽, 王清, 高丽朴, 等. 精胺处理对豇豆采后生理特性的影响研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(1): 162–166.
- ZHENG QL, WANG Q, GAO LP, *et al.* Effect of spermine treatment on physiology characteristic of postharvest cowpea [J]. *Food Res Dev*, 2018, 39(1): 162–166.
- [22] 黄漫青, 韦强, 孙瑞, 等. 冰袋预冷对豆角贮藏品质的影响[J]. 北京农学院学报, 2015, 30(2): 104–109.
- HUANG MQ, WEI Q, SUN R, *et al.* Effects of ice bag pre-cooling on storage of snap bean fruit [J]. *J Beijing Univ Agric*, 2015, 30(2): 104–109.
- [23] 聂娇娇, 彭俊森, 万璇, 等. 一氧化氮对‘贵长’猕猴桃果实的保鲜效果[J]. 山地农业生物学报, 2023, 42(2): 23–28.
- NIE JJ, PENG JS, WANG X, *et al.* Effect of nitric oxide on preservation of actinidia deliciosa ‘Guichang’ fruit [J]. *J Mt Agric Biol*, 2023, 42(2): 23–28.
- [24] ZHANG WL, CAO JK, FAN XG, *et al.* Applications of nitric oxide and melatonin in improving postharvest fruit quality and the separate and crosstalk biochemical mechanisms [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2020, 99: 531–541.
- [25] 杨睿, 林小翠, 窦媛, 等. 一氧化氮抑制果蔬病害研究进展[J]. 果树学报, 2019, 36(11): 1591–1599.
- YANG R, LIN XC, DOU Y, *et al.* Research advance on nitric oxide inhibiting diseases in fruits and vegetables [J]. *J Fruit Sci*, 2019, 36(11): 1591–1599.
- [26] 张琦, 刘千, 张智, 等. 硝普钠对香蕉采后品质及生理指标的影响[J]. 南方农业学报, 2016, 47(7): 1198–1202.
- ZHANG Q, LIU Q, ZHANG Z, *et al.* Effects of sodium nitroprusside on postharvest quality and physiological indexes of banana [J]. *J South Agric*, 2016, 47(7): 1198–1202.
- [27] 马永强, 石忠志. 1-MCP处理对油豆角贮藏期间衰老及品质的影响[J]. 现代食品科技, 2006, (4): 8–12.
- MA YQ, SHI ZZ. Effects of 1-MCP treatments on senescence and quality of snap bean during storage [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2006, (4): 8–12.
- [28] 张福平. 菜豆采后贮藏期间的生理变化[J]. 湖北农业科学, 2006, (3): 370–371.
- ZHANG FP. Physiological changes of phaseolus vulgaris during postharvest storage [J]. *Hubei Agric Sci*, 2006, (3): 370–371.
- [29] 徐海山, 丁胜华, 周辉, 等. 采后果蔬软化机制及调控方法研究进展[J]. 激光生物学报, 2019, 28(6): 504–512, 517.
- XU HS, DING SH, ZHOU H, *et al.* Advances in mechanism and regulation methods of postharvest fruits and vegetable softening [J]. *Acta Laser Biol Sin*, 2019, 28(6): 504–512, 517.
- [30] 王鲁阳, 吴斌, 敬媛媛, 等. 一氧化氮(NO)熏蒸提高哈密瓜果实采后贮藏的耐冷性[J]. 现代食品科技, 2018, 34(4): 114–120, 178.
- WANG LY, WU B, JING YY, *et al.* Enhancement of chilling tolerance of Hami melon fruits in postharvest storage period by using nitric oxide fumigation [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2018, 34(4): 114–120, 178.
- [31] 谢晶, 覃子倚, 潘家丽, 等. 基于主成分分析的硝普钠处理对采后荔枝活性氧代谢的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(9): 192–198.
- XIE J, QIN ZY, PAN JL, *et al.* Effect of sodium nitroprusside treatment on reactive oxygen species metabolism of postharvest Litchi as investigated by principal component analysis [J]. *Food Sci*, 2022, 43(9): 192–198.
- [32] CHEN YZ, YU J, LIN HT, *et al.* Phomopsis longanae Chi-induced longan pulp breakdown and softening in relation to cell wall polysaccharides disassembly [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2022, 186: 111837.
- [33] 袁文新. 硝普钠在调控采后草莓果实软化和鞣花酸代谢中的应用[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- YUAN WX. Application of sodium nitroprusside in regulating postharvest strawberry fruit softening and ellagic acid metabolism [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2022.
- [34] AGHDAM MS, PALMA JM, CORPAS FJ. NADPH as a quality footprinting in horticultural crops marketability [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2020, 103: 152–161.
- [35] ZHANG RN, YUAN ZY, JIANG YW, *et al.* Sodium nitroprusside functions in browning control and quality maintaining of postharvest rambutan fruit [J]. *Front in Plant Sci*, 2022, 12: 759671.
- [36] 薛鹏宇, 殷菲彤, 刘云芬, 等. 茉莉酸甲酯(MeJA)处理对采后龙眼果皮褐变的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(5): 169–178.
- XUE PY, YIN FL, LIU YF, *et al.* Effect of methyl jasmonate (MeJA) treatment on postharvest pericarp browning of longan fruit [J]. *Food Sci*, 2023, 44(5): 169–178.
- [37] SHABANIANA S, ESFAHANIA MN, KARAMIAN R, *et al.* Physiological and biochemical modifications by postharvest treatment with sodium nitroprusside extend vase life of cut flowers of two gerbera cultivars [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2018, 137: 1–8.
- [38] BAI XY, YANG ZM, SHEN WJ, *et al.* Polyphenol treatment delays the browning of litchi pericarps and promotes the total antioxidant capacity of litchi fruit [J]. *Sci Hortic*, 2022, 291: 110563.
- [39] QUEIROZ C, LOPES MLM, FIALHO E. Polyphenol oxidase: Characteristics and mechanisms of browning control [J]. *Food Rev Int*, 2008, 24(4): 361–375.
- [40] ADHIKARY T, GILL PPS, JAWANDHA SK, *et al.* Efficacy of postharvest sodium nitroprusside application to extend storability by regulating physico-chemical quality of pear fruit [J]. *Food Chem*, 2021, 346: 128934.

(责任编辑: 韩晓红 张晓寒)

作者简介



张帆, 硕士研究生, 主要研究方向为农产品加工与贮藏。

E-mail: zhangfan20220123@163.com



孟德梅, 博士, 副教授, 主要研究方向为果蔬和食用菌采后生理与分子生物学。

E-mail: mengdm@tust.edu.cn