韩朝淇, 王林楠, 赵扬, 等. 硝普钠处理对鲜切紫马铃薯贮藏品质与风味特征的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(4): 25−35. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040187
HAN Chaoqi, WANG Linnan, ZHAO Yang, et al. Effects of Sodium Nitroprusside Treatment on Storage Quality and Flavor Profile in Fresh-cut Purple Potatoes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(4): 25−35. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040187

·特邀主编专栏—果蔬基料制造:基础理论、新型加工、质量控制与智能制造(客座主编:徐贞贞、王永涛、李涛;产业顾问:李仁杰)·

硝普钠处理对鲜切紫马铃薯贮藏品质与风味特征的影响

韩朝淇[1],王林楠[1],赵　扬[1],张主鹏[1],王文秀[1,2],马倩云[1,2],孙剑锋[1,2,3,*]
(1.河北农业大学食品科技学院,河北保定 071000;
2.河北省农产品加工技术创新中心,河北保定 071000;
3.河北省马铃薯加工技术创新中心,河北张家口 076576)

摘　要:为了探究硝普钠(Sodium nitroprusside, SNP)处理对鲜切紫马铃薯贮藏品质和风味变化的影响。本研究以鲜切紫马铃薯为研究对象,采用 0.1 mmol·L^{-1} SNP 进行处理并于 4 ℃ 下冷藏 8 d,定期取样测定鲜切紫马铃薯贮藏期间的颜色、可溶性固形物含量、蒸煮损失率、水分状态与分布、抗氧化酶活性、总酚含量、总黄酮含量、总花色苷含量及挥发性有机化合物的变化情况。结果表明,SNP 处理有效地延缓了鲜切紫马铃薯贮藏期间的颜色变化,并降低了内部水分的流动性。此外,SNP 处理调节了贮藏后期的抗氧化酶活性,同时在贮藏结束时,SNP 处理组中总酚、总黄酮和总花色苷的含量分别为对照组的 1.11、1.44 和 1.22 倍,这提升了鲜切紫马铃薯贮藏期间的抗氧化能力。挥发性有机化合物的分析结果则表明,硝普钠处理主要通过抑制醛类物质尤其是己醛的产生来改善鲜切紫马铃薯在贮藏期间产生的异味。总之,SNP 处理能够保持鲜切紫马铃薯的贮藏品质和抗氧化能力,同时维持良好的风味,研究结果在一定程度上为硝普钠在鲜切果蔬中的应用提供了理论依据。

关键词:紫马铃薯,鲜切,硝普钠,贮藏品质,风味
中图分类号:TS255.36　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1002−0306(2026)04−0025−11
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040187
本文网刊:

Effects of Sodium Nitroprusside Treatment on Storage Quality and Flavor Profile in Fresh-cut Purple Potatoes

HAN Chaoqi[1], WANG Linnan[1], ZHAO Yang[1], ZHANG Zhupeng[1], WANG Wenxiu[1,2], MA Qianyun[1,2], SUN Jianfeng[1,2,3,*]
(1.College of Food Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China;
2.Hebei Technology Innovation Centre of Agricultural Products Processing, Baoding 071000, China;
3.Hebei Potato Processing Technology Innovation Center, Zhangjiakou 076576, China)

Abstract: To investigate the effects of sodium nitroprusside (SNP) treatment on storage quality and flavor changes in fresh-cut purple potatoes, fresh-cut samples were treated with 0.1 mmol·L^{-1} SNP and stored at 4 ℃ for 8 days. Regular sampling was conducted to measure color parameters, soluble solid content, cooking loss rate, water status and distribution, antioxidant enzyme activities, total phenolic content, total flavonoid content, total anthocyanin content, and volatile organic compound profiles during storage. The results indicated that SNP treatment effectively delayed color deterioration and reduced internal water mobility in fresh-cut purple potatoes. Furthermore, the treatment modulated antioxidant enzyme

收稿日期: 2025−04−17
基金项目: 河北省现代农业产业技术体系项目支持(HBCT2024140208);河北省创新能力提升计划项目(22567698H)。
作者简介: 韩朝淇(2000−),男,硕士研究生,研究方向:果蔬贮藏与保鲜,E-mail:han_chaoqi@163.com。
*** 通信作者:** 孙剑锋(1979−),男,博士,教授,研究方向:食品加工技术,E-mail:causunjf@hebau.edu.cn。

activities during later storage periods. By the end of storage, total phenolic, total flavonoid, and total anthocyanin contents in SNP-treated samples were found to be 1.11 fold, 1.44 fold, and 1.22 fold higher than those in the control group, respectively, thereby enhancing antioxidant capacity. Analysis of volatile organic compounds demonstrated that SNP treatment mitigated off-odors primarily by suppressing the formation of aldehydes, particularly hexanal. In conclusion, SNP treatment maintained storage quality and antioxidant capacity while preserving desirable flavor attributes in fresh-cut purple potatoes. These findings provide a theoretical foundation for the application of sodium nitroprusside in fresh-cut fruit and vegetable preservation.

Key words: purple potatoes; fresh-cut; sodium nitroprusside; storage quality; flavor

近年来, 由于消费理念的变化, 方便和即食食品逐渐受到消费者的青睐, 鲜切果蔬产品也因此越来越得到餐饮行业的重视。然而, 果蔬的组织细胞在切割作用下易被破坏, 导致细胞内容物暴露在空气中。这会加快果蔬的呼吸速率并且使果蔬细胞的生理代谢紊乱, 导致营养物质的消耗, 这是引起果蔬的褐变、质地变软和衰老的一个重要原因[1]。紫马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)是马铃薯的一个亚种, 其皮呈黑紫色, 肉质呈深紫色, 与普通马铃薯相比, 不仅含有相应的营养物质, 更重要的是其花青素含量高于黄白肉马铃薯。花青素具有很强的抗氧化活性, 因此紫马铃薯抗氧化能力是普通马铃薯品种的数倍[2−3]。花青素还具有较好的抑癌、抑制衰老、护眼、护肝、降血糖、降血脂等功能[4]。同时与其他富含花青素的果蔬相比, 紫马铃薯营养价值更高而且价格更为亲民, 因此近年来越来越得到人们的关注。鲜切是紫马铃薯常见的加工方式之一, 鲜切紫马铃薯具有广阔的发展前景。然而, 鲜切处理过程中机械损伤引发的酶促褐变反应, 同时伴随营养成分的流失以及不良风味的产生, 这些品质劣变成为制约其产业化发展的主要瓶颈。这些不可逆的生理变化不仅造成产品价值的损失, 更导致了生物活性物质的损耗。目前常见的保鲜方法过度依赖物理化学手段, 未能充分结合植物自身抗病抗逆的生物学特性[5]。因此, 开发新型保鲜技术已成为当前鲜切农产品加工领域亟待突破的关键技术难题。

硝普钠(Sodium nitroprusside, SNP)作为一氧化氮(Nitric oxide, NO)的供体, 能够分解产生 NO, 影响果蔬中的多种生理代谢, 具有较好的保鲜效果, 能够延长新鲜果蔬的货架期, 因此常被用于延缓鲜切水果和蔬菜的品质劣化。研究表明, SNP 处理能够降低活性氧(Reactive oxygen species, ROS)水平而延缓采后胡萝卜的衰老[6], Sahu 等[7] 对于番石榴果实的研究也证实了这一点。此外, Ren 等[8] 发现 SNP 处理提高了芒果果实中超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)和过氧化物酶(Peroxidase, POD)等抗氧化酶的活性, 同时降低了脂氧合酶(Lipoxygenases, LOX)和多酚氧化酶(Polyphenol oxidase, PPO)的活性, 从而通过调节抗氧化系统中关键酶的活性来改善芒果果实的品质。Dai 等[9] 关于鲜切马铃薯贮藏品质的研究中也报道了 SNP 对抗氧化防御关键酶的调节作用。然而, SNP 对鲜切紫马铃薯的贮藏品质的影响尚不明确, 同时, 目前有关 SNP 的研究大多集中于其对果蔬贮藏品质、抗氧化相关酶活性及其基因表达等方面, 鲜有研究报道 SNP 处理对鲜切果蔬风味劣变的影响。

为提升紫马铃薯的附加值, 改善鲜切紫马铃薯贮藏品质并延长其货架期, 本研究以 0.1 mmol·L^{-1} SNP 作为外源保鲜剂, 对处理鲜切紫马铃薯贮藏期间的品质变化(色泽、蒸煮损失率和可溶性固形物含量)进行考察, 并进一步对水分分布、抗氧化能力和挥发性有机化合物进行分析, 研究 SNP 对鲜切紫马铃薯贮藏品质和风味特征的影响。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

紫马铃薯('黑金刚') 河北省保定市果蔬超市, 紫马铃薯根据大小相近、成熟度均匀且无明显病虫害感染及机械损伤的原则进行选择; 硝普钠(SNP) 分析纯, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、氢氧化钠、氯化钠、硫代巴比妥酸、愈创木酚 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 过氧化氢、邻苯二酚、芦丁、硼酸钠 分析纯, 上海源叶试剂有限公司; 福林酚、硝酸铝 分析纯, 上海麦克林生化科技股份有限公司; 乙二胺四乙酸、L-苯丙氨酸、三氯乙酸 分析纯, 天津市光复科技发展有限公司; 乙醇、盐酸、β-巯基乙醇、没食子酸 分析纯, 天津市科密欧化学试剂有限公司; 超氧化物歧化酶(SOD)试剂盒(货号 BC0170)、过氧化氢酶(CAT)试剂盒(货号 BC0205)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)试剂盒(货号 BC0220) 北京索莱宝科技有限公司。

CR-400 色差计 日本柯尼卡美能达公司; A11 低温研磨仪 艾卡(广州)仪器设备有限公司; PAL-1 手持式糖度仪 日本艾拓公司; T6 紫外可见分光光度计 北京普析通用仪器有限公司; TMS-Pro 质构仪 美国 FTC 公司; MesoMR12 低场核磁共振分析仪 苏州纽迈分析仪器股份有限公司; FlavourSpec®气相色谱-离子迁移谱联用仪 德国 G.A.S 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品处理 本研究所用的紫马铃薯样品采购后立即运输至河北农业大学食品科技学院实验室进行实验。前期研究用不同浓度的 SNP 处理鲜切紫马

铃薯，结果发现 0.1 mmol·L^{-1} 处理的样品具有更好的品质，因此本研究选用 0.1 mmol·L^{-1} 的 SNP 浓度。实验过程中，将紫马铃薯切成 5 mm 左右的薄片并随机分为 2 组。通过排水法测定紫马铃薯切片体积，按切片体积∶浸泡溶液体积=4∶1(v/v)的比例，将切片浸没于处理溶液中，溶液体积以量筒精确量取(mL)。一组样品在 0.1 mmol·L^{-1} SNP 溶液中浸泡 10 min 作为处理组，记为 SNP，另一组则浸泡在蒸馏水中同样为 10 min 作为对照，记为 CK。随后，用无菌纱布擦去表面水分。最终，将样品置于自封袋中并分装至食品级聚丙烯保鲜盒(210 mm×150 mm×75 mm)中，并在 4 ℃ 条件下储存 8 d，每个处理组均设置 3 个重复。实验期间，每 2 d 取样测定其表观品质，并将样品在液氮中迅速冷冻，随后储存于−80 ℃ 的冰箱中以备后续分析。

1.2.2　颜色评估　用色度计进行测定。在测定样品之前，用白色校准板对色度计进行校准以确保测量的准确性。样品的颜色评估涉及亮度(L^*，0~100 表示从暗到亮)、红绿变化(a^*，正值表示红色，负值表示绿色)和蓝黄色变化(b^*，正值表示黄色，负值表示蓝色)[10]。

1.2.3　可溶性固形物(Total soluble solid，TSS)含量的测定　用手持式糖度仪进行测定，使用仪器前用蒸馏水进行校正，以保证测定的准确性。使用时将鲜切紫马铃薯均质后离心，收集上清液进行测定。

1.2.4　蒸煮损失率的测定　测定鲜切紫马铃薯片在贮藏前的质量(C_0)，随后将样品煮沸 10 min，干燥后每隔 2 d 测定样品质量(C_1)。煮沸并干燥后样品质量与初始样品质量之比即为蒸煮损失率，计算公式如式(1)所示：

$$蒸煮损失率(\%)=\frac{C_0-C_1}{C_0}\times 100 \qquad 式（1）$$

1.2.5　水分状态和分布的测定　参照苑丽婧等[11]的方法并稍作修改。将鲜切紫马铃薯分切为 5 g 左右，使用低场核磁共振分析仪中的 Carr-Purcell-MeiboomGill(CPMG)脉冲序列进行测定。测定时设置的参数如下：主频为 21 kHz，等待时间(TW)为 3000 ms；回波时间(TE)为 1 ms；模拟增益为 20 dB，数字增益为 3，回波个数(NECH)为 9000，采样频率为 125 kHz，扫描次数(NS)为 8。

使用核磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging，MRI)分析鲜切紫马铃薯样品的横截面氢质子密度图，来评价鲜切紫马铃薯样品的水分分布[12]。首先使用油样进行校准以保证测定准确度，取鲜切紫马铃薯样品进行 MRI 测定。MRI 检测参数如下：循环时间(TR)=500 ms，回波时间(TE)=20 ms，矩阵大小=256×192 mm，视场= 256×256 mm，平均数=2。

1.2.6　抗氧化酶活性的测定　PAL 酶的活性参照 Wang 等[13]的方法并稍作修改。准确称取 1.0 g 冻样，加入 2 mL 酶提取液，匀浆后在 4 ℃，10000×g 条件下离心 20 min，所得上清液即为粗酶提取液。随后在 0.2 mL 酶提取液中加入 1 mL 反应液，于 40 ℃ 水浴 1 h，加入 2 mL 终止液后，在 290 nm 处测定吸光度值，以每小时吸光度变化 0.01 作为 1 个酶活力单位，酶活性表示为 U·g^{-1}。其中酶提取液为 0.2 mmol·L^{-1} 硼酸钠缓冲液(pH8.7，含有 20 mmol·L^{-1} β-巯基乙醇，2 mmol·L^{-1} 乙二胺四乙酸和 4% 聚乙烯吡咯烷酮)，反应液为 0.6 mmol·L^{-1} L-苯丙氨酸，终止液为 6 mol·L^{-1} 盐酸溶液。

POD 酶活性采用 2-甲氧基苯酚法测定[13]。准确称取 0.3 g 冻样，加入 3 mL 预冷的酶提取液，匀浆后在 4 ℃，12000×g 条件下离心 10 min，所得上清液即为粗酶提取液。随后将 3 mL 反应液与 500 μL 酶液进行混合。在 470 nm 处测定吸光度值，以每分钟吸光度变化 0.01 为 1 个酶活力单位，酶活性表示为 U·mg^{-1}。其中酶提取液为 0.1 mol·L^{-1} 磷酸钠(PBS)缓冲液(pH7.0，含 1% Triton X-100 和 4% 聚乙烯吡咯烷酮)，反应液为 0.2 mol·L^{-1} PBS 缓冲液(pH6.0，含 25 mmol·L^{-1} 2-甲氧基苯酚和 30% 过氧化氢溶液)。

PPO 酶活性采用邻苯二酚法测定[14]。准确称取 0.3 g 冻样，加入 3 mL 预冷的酶提取液，匀浆后在 4 ℃，12000×g 条件下离心 10 min，所得上清液即为粗酶提取液。随后将 1 mL 反应液与 500 μL 酶液进行混合，混匀后于 37 ℃ 水浴 10 min。在 420 nm 处测定吸光度值，每分钟吸光度变化 0.01 为 1 个酶活性单位，酶活性表示为 U·mg^{-1}。其中酶提取液为 0.1 mol·L^{-1} PBS 缓冲液(pH7.0，含 1% Triton X-100 和 4% 聚乙烯吡咯烷酮)，反应液为 50 mmol·L^{-1} PBS 缓冲液(pH7.0)和 50 mmol·L^{-1} 邻苯二酚溶液。

利用商业化试剂盒分别测定 SOD、CAT 和 APX 的活性。

1.2.7　总酚含量的测定　参照 Dai 等[9]的方法并稍作修改。准确称取 1.0 g 冻样，与 3 mL 80% 甲醇混合并匀浆，室温下孵育 1 h，随后在 4 ℃，12000×g 条件下离心 20 min，取 0.5 mL 上清液，加入 1 mL 的福林酚试剂，反应 10 min 后，再加入 2 mL 1 mol·L^{-1} 碳酸钠溶液。混合液于 30 ℃ 水浴 1 h，随后测定其在 765 nm 处的吸光度值，以没食子酸标准曲线计算总酚含量，鲜切紫马铃薯中总酚含量表示为 mg·g^{-1}。

1.2.8　总黄酮含量的测定　参照 Gheysarbigi 等[15]的方法并稍作修改。准确称取 1.0 g 冻样，与 3 mL 80% 甲醇混合并匀浆，随后在 4 ℃，12000×g 条件下离心 10 min，取 30 μL 上清液，加入 0.3 mL 5% 亚硝酸钠溶液。5 min 后，加入 600 μL 10% 硝酸铝溶液。6 min 后，加入 400 μL 的 0.5 mol·L^{-1} 氢氧化钠溶液，于室温下反应 25 min。随后测定混合液在 517 nm 处的吸光度值，以芦丁标准曲线计算总黄酮含量，鲜切紫马铃薯中的总黄酮表示为 mg·g^{-1}。

1.2.9　总花色苷含量的测定　参照 Chen 等[16]的方

法，将冷冻样品 1.0 g 磨成粉末，与 10 mL 盐酸甲醇混合，在 4 ℃ 下黑暗提取 24 h。然后，将混合物在 4 ℃ 下约 12000×g 离心 20 min，收集上清。取 0.5 mL 上清液分别与 2 mL 0.4 mmol·L^{-1} 醋酸钠缓冲液（pH4.5）和 2 mL 25 mmol·L^{-1} 氯化钾缓冲液（pH1.0）混合，在 40 ℃ 下孵育 20 min。记录溶液在 510 和 700 nm 处的吸光度。总花色苷含量计算方法如式（2）所示：

$$\text{花青素含量}(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}) = \frac{A\times M_W\times V\times D_F}{\varepsilon\times l\times m} \quad \text{式（2）}$$

式中：A 为花色苷溶液吸光度 [$(A_{520}-A_{700})_{pH1.0}-(A_{520}-A_{700})_{pH4.5}$]；$M_W$ 为矢车菊-3-葡萄糖苷的摩尔质量，449.2 g·mol^{-1}；D_F 为稀释倍数；ε为矢车菊-3-葡萄糖苷的摩尔消光系数，29600 L·(mol·cm)$^{-1}$；1 为光程，1 cm；m 为样品的质量，g。

1.2.10 挥发性有机化合物的测定 使用气相色谱-离子迁移谱联用仪（GC-IMS）进行分析[14]。准确称取 5.0 g 样品于 20 mL 顶空瓶中。90 ℃ 孵育 30 min 后进样，GC-IMS 实验主要参数为：FS-SE-54-CB-1 色谱柱，柱温为 60 ℃，进样体积为 500 μL，载气为氮气（N_2），检测器温度为 45 ℃，注射针温度为 85 ℃，孵育转速为 500 r·min^{-1}，载气流速为初始 2 mL·min^{-1}，保持 2 min；2~10 min 内线性升至 100 mL·min^{-1}；20~30 min 内升至 150 mL·min^{-1}。

1.3 数据处理

所有实验均采用完全随机设计。每个指标设置 3 个生物学重复，每个生物学重复设置 3 个技术性重复。除非另有说明，所有生化参数均以鲜重（FW）为基础表示。数据处理和绘图采用 R 统计分析软件（4.3.2 版）。经单因素方差分析和 LSD 多重比较检验，差异有统计学意义（P<0.05）。数据以 3 个独立生物重复的平均数±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 硝普钠处理对鲜切紫马铃薯品质的影响

从表 1 中可以看出，鲜切紫马铃薯在贮藏期间亮度变暗、红度上升、蓝度下降。鲜切马铃薯极易发生酶促褐变，导致色泽发生变化[17−18]。在贮藏第 6 d 时，SNP 处理组的 L^*值显著高于 CK 组（P<0.05），同时 a^*和 b^*值显著低于 CK 组（P<0.05），这说明 SNP 处理有效延缓了贮藏期间鲜切紫马铃薯的色泽变化，维持了鲜切紫马铃薯较好的品相。同时，b^*值增大表示色泽向黄色方向移动，在贮藏第 4 d 时，b^*已经增大至-13.38，此时鲜切紫马铃薯已经发生较为明显的黄变，可食用性大大降低，而 SNP 处理组则在 6~8 d 内达到此劣变程度，因此，本研究的贮藏周期设定为 8 d。

TSS 包含果蔬中的可溶性糖类、蛋白质和维生素等营养物质的总量，能够反映果蔬营养物质的含量[19]。而在贮藏过程中，糖类和蛋白质等营养物质作为细胞呼吸代谢的底物，在贮藏期间不断被消耗，因此导致了可溶性固形物含量呈下降趋势[20]。表 1 中列出了 TSS 含量与蒸煮损失率的变化情况，与 CK 组相比，SNP 处理减少了 TSS 的消耗，这可能是由于 SNP 处理调控了鲜切紫马铃薯细胞的呼吸代谢过程，减少了对细胞代谢底物的消耗[20]，研究表明 SNP 处理调控鲜切紫马铃薯的贮藏期间的能量代谢过程，在一定程度上增加糖类物质的含量[21]，但在整个贮藏过程中，SNP 处理组和 CK 组的 TSS 并未表现出显著差异（P>0.05），这可能是由于尽管 SNP 处理能够少量增加代谢底物的含量，但是由于鲜切紫马铃薯受到逆境胁迫时自身的防御体系被激活，生理反应加剧，其可溶性固形物的消耗速率仍然远大于合成速率。

蒸煮损失率则能够表示贮藏过程中的水溶性营养成分的流失程度，这与细胞结构的稳定性密切相关[14]。从表 1 中可以看出，SNP 处理能够在一定程度上延缓蒸煮损失率的上升，但 SNP 处理组与对照组在贮藏过程中的蒸煮损失率变化没有明显的差异（P>0.05），刘慧等[20] 的研究表明 SNP 处理能够维持桃果实细胞壁结构的完整性，而吴敏等[22] 则报道了 SNP 能够延缓无核白葡萄果梗相对电导率的增加，从而维持细胞膜的完整性，降低电解质的渗透，因此可以推测 SNP 处理能够维持贮藏期间细胞壁膜的功

表 1 不同处理对鲜切马铃薯贮藏期间 L^*、a^*、b^*、可溶性固形物和蒸煮损失率的影响

Table 1 Effects of different treatments on L^*, a^*, b^*, soluble solids and cooking loss of fresh-cut purple potatoes

指标	处理	0 d	2 d	4 d	6 d	8 d
L^*	CK	38.58±0.94^{Aa}	32.14±0.27^{Ba}	29.66±0.20^{BCb}	28.05±0.12^{CDb}	26.32±2.45^{Da}
	SNP	36.64±0.97^{Aa}	34.11±1.38^{Ba}	31.24±0.64^{Ca}	30.18±0.27^{CDa}	29.01±0.30^{Da}
a^*	CK	29.10±0.83^{Da}	38.57±0.49^{Ca}	41.52±1.19^{BCa}	45.03±0.74^{ABa}	48.10±2.60^{Aa}
	SNP	30.00±0.78^{Da}	34.53±0.08^{Cb}	38.51±2.00^{Ba}	40.90±0.17^{Bb}	44.41±1.17^{Aa}
b^*	CK	−20.39±0.94^{Da}	−15.54±0.59^{Ca}	−13.38±0.30^{Ba}	−11.81±0.33^{Aa}	−10.50±0.25^{Aa}
	SNP	−19.41±0.47^{Da}	−16.81±0.34^{Cb}	−14.60±0.03^{Bb}	−14.22±0.30^{Bb}	−12.52±0.14^{Ab}
TSS(%)	CK	6.24±0.15^{Aa}	6.00±0.52^{Aa}	5.89±0.83^{Aa}	5.77±0.61^{Aa}	5.54±0.67^{Aa}
	SNP	6.27±0.46^{Aa}	6.20±0.35^{ABa}	6.04±0.17^{ABa}	5.87±0.42^{ABa}	5.79±0.72^{Ba}
蒸煮损失率(%)	CK	7.84±0.15^{Ca}	8.80±0.32^{BCa}	9.33±0.24^{ABa}	9.88±0.76^{ABa}	10.25±0.54^{Aa}
	SNP	7.87±0.10^{Ca}	8.31±0.03^{BCa}	8.89±0.58^{ABCa}	9.08±0.67^{ABa}	9.63±0.32^{Aa}

注：不同大写字母表示相同处理的不同时间点的值之间的显著差异（P<0.05），不同小写字母表示不同处理在同一时间点的值有显著差异（P<0.05）。

能，从而在一定程度上降低水溶性成分的流失。

2.2　硝普钠处理对鲜切紫马铃薯水分状态和分布的影响

果蔬的内部水分流动性越强，越容易导致其品质的下降[23]。如图 1A 所示，利用低场核磁共振技术（LF-NMR）得到鲜切紫马铃薯在贮藏期间的水分分布反演曲线。水分横向弛豫时间代表了不同的水分状态，弛豫时间越小，水分与基质之间的结合程度越高，根据横向弛豫时间的不同，鲜切紫马铃薯中的水分可分为：结合水 T_{21}（0.01~10 ms）、固定水 T_{22}（10~100 ms）和自由水 T_{23}（100~10000 ms）[10]，弛豫时间越长，内部水分的结合度越低。由于氢质子弛豫时间的信号振幅峰面积与含水量成正比，可以用来估计样品的含水量。从图可以看出，鲜切紫马铃薯中自由水的含量最高，并且随着贮藏时间的延长，T_{23} 含量逐渐减少。在贮藏期间，SNP 处理组的 T_{23} 含量始终低于对照组。而较低的自由水水平则能够有效防止水分的过度移动和流失，减缓酶促反应速度，延长保质期。SNP 处理能够保持较低的自由水水平，产生更好的保鲜效果[14]。

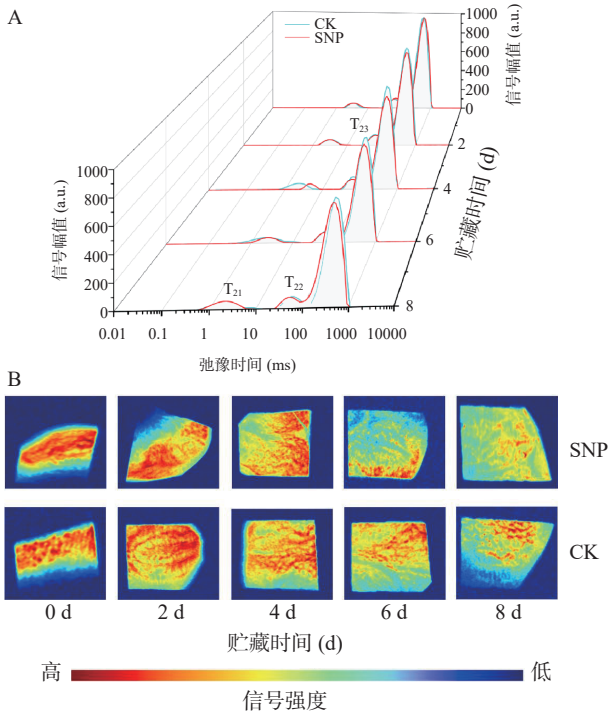


图 1　鲜切紫马铃薯贮藏期间的低场核磁共振波谱（A）和 T_2 加权 MRI 图像（B）

Fig.1　Low-field nuclear magnetic resonance spectra (A) and T_2-weighted MRI images (B) of fresh-cut purple potatoes during storage

图 1B 为贮藏过程中鲜切紫马铃薯的 MRI 成像，其中红色为高强度氢质子信号，蓝色为低强度氢质子信号[10]。如图所示，随着贮藏时间的增加，红色区域逐渐减少，表明信号强度和含水量降低。同时可以观察到对照组在贮藏期间保持了比较高的水分含量，这与低场核磁波谱的结果一致。

2.3　硝普钠处理对鲜切紫马铃薯抗氧化酶活性的影响

图 2 显示了不同处理（CK 和 SNP）对鲜切紫马铃薯贮藏期间抗氧化相关酶活性的影响。PAL 是产生多酚类物质的重要酶类，是果实中苯丙烷代谢途径的起点，能够催化产生酚类物质作为褐变的底物[24]。如图 2A 所示，鲜切紫马铃薯中的 PAL 活性呈现先升高后下降的趋势。对照组样品在 2 d 时达到峰值后活性持续下降，而 SNP 处理组在 4 d 时达到峰值，贮藏结束时其 PAL 活性比对照组高出 31.69%。

POD 进一步将 H_2O_2 分解为 H_2O 等无害物质[25]，但同时也催化酚类物质的氧化，加速酶促褐变[26]。如图 2B 所示，POD 活性在贮藏期间持续上升，贮藏前 4 d，SNP 处理组的 POD 活性高于对照组，然而在贮藏后期，对照组的 POD 活性显著高于 SNP 处理组（P<0.05），贮藏结束时，蒸馏水处理组的 POD 活性是 SNP 处理组的 1.84 倍。

在植物细胞老化的过程中，因为细胞壁膜受损而产生的有氧环境，会促使 PPO 将酚类化合物转变为醌，经过一系列的氧化聚合，最后会产生出黑色素的物质，这是一种普遍存在的酶促褐变的现象[27−28]。如图 2C 所示，PPO 活性在贮藏期表现为持续上升的趋势。与对照组相比，贮藏前 4 d 两组的 PPO 活性无显著差异（P>0.05），但在 4~8 d 之间，SNP 处理组显著延缓了 PPO 活性的上升（P<0.05）。

SOD 可以消除细胞内的氧自由基[25]。如图 2D 所示，在 8 d 的低温贮藏期间，SOD 活性在两组中均呈现先升后降的趋势，且均在 4 d 时达到峰值。尽管在贮藏前期，SNP 处理组的 SOD 活性略低于对照组，但在贮藏后期，对照组 SOD 活性下降，而 SNP 处理显著延缓了 SOD 活性的降低（P<0.05），至 8 d 时，SNP 处理组的 SOD 活性比对照组高出 16.61%。

CAT 是降解活性氧产生 H_2O_2 的重要酶类[19]。如图 2E 所示，CAT 的活性在贮藏前期迅速上升并在 2 d 时达到峰值，随后逐渐下降。然而在贮藏后期，SNP 处理组的 CAT 活性下降速度快于对照组。在 4 d 时，SNP 处理组的 CAT 活性比对照组高出 40.07%，此时表现出显著差异（P<0.05）。

APX 是一种能够清除活性氧的酶系，可催化 H_2O_2 转变为 H_2O，在植物中发挥着重要的作用[19]。如图 2F 所示，APX 的活性在贮藏期间保持上升趋势，SNP 处理组在整个贮藏期间的 APX 活性均高于蒸馏水处理组，特别是在 2 d 时，SNP 处理组的 APX 活性比对照组高出 41.05%，且这两个处理组在此时表现出显著差异（P<0.05）；此后，两组间未表现出显著差异（P>0.05）。

从研究结果来看，在贮藏前期，蒸馏水处理组和 SNP 处理组的样品中抗氧化相关酶的活性变化趋势相似。然而，在贮藏后期，两组样品的抗氧化酶活性表现出不同的趋势。可能原因在于：在贮藏前期，受低温胁迫和机械损伤的影响，鲜切紫马铃薯防御体系

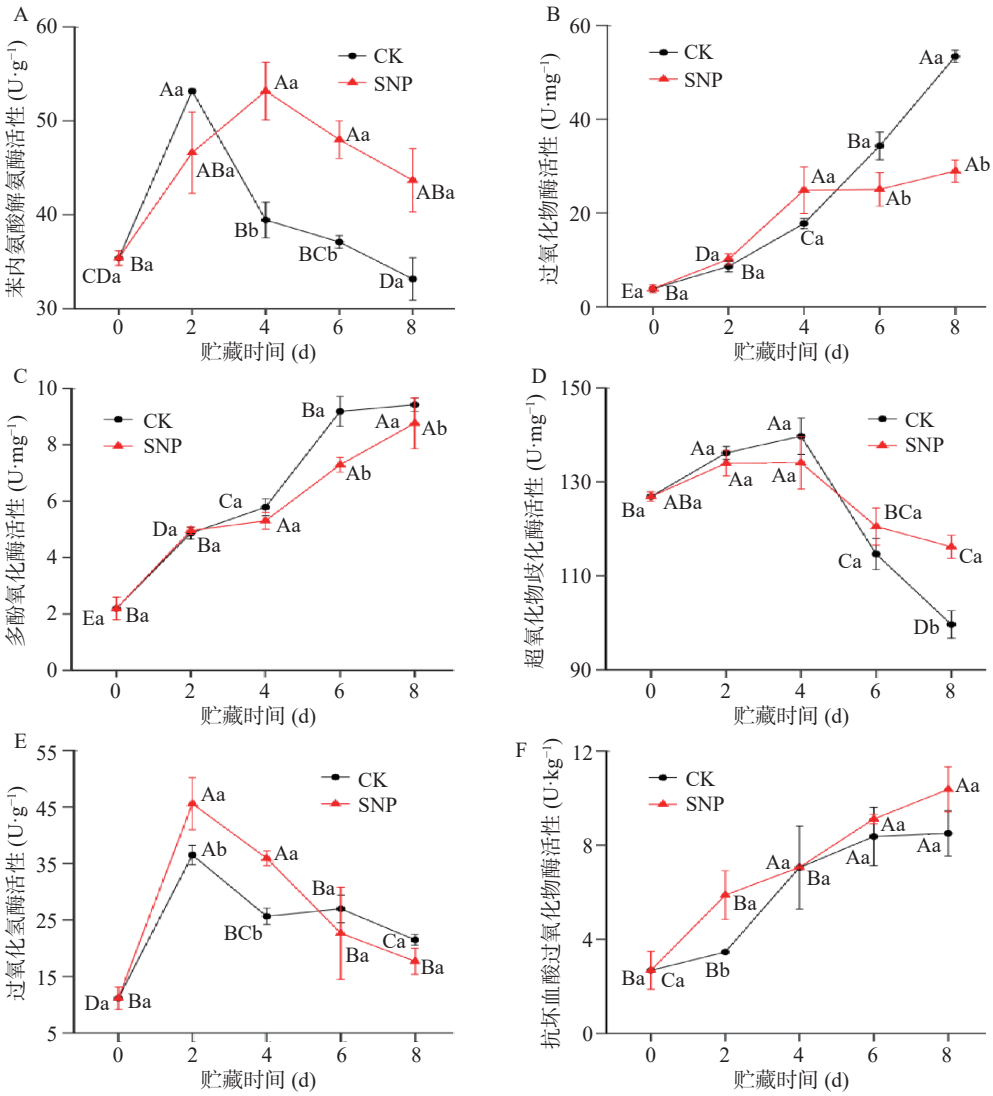


图 2　对照和 SNP 处理对鲜切紫马铃薯贮藏期间 PAL(A)、POD(B)、PPO(C)、SOD(D)、CAT(E)和 APX(F)活性的影响

Fig.2　Effects of control and SNP treatments on the activities of PAL (A), POD (B), PPO (C), SOD (D), CAT (E) and APX (F) of fresh-cut purple potatoes during storage

注: 不同大写字母表示相同处理的不同时间点的值之间的显著差异(P<0.05), 不同小写字母表示不同处理在同一时间点的值有显著差异(P<0.05); 图 3 同。

被激活, 抗氧化相关酶在植物的防御中发挥了重要作用。在此过程中, NO 作为重要的信号分子, 能够协同增强样品的防御能力。而在贮藏后期, 蒸馏水处理的鲜切紫马铃薯逐渐衰败, 其防御体系遭到破坏, 导致氧化应激加剧, 从而降低了抗氧化能力[21]。而 SNP 处理的样品由于维持了较高的 NO 水平, 仍然保持了良好的抗氧化能力, 从而维持了表观品质。这些结果与其他研究中的发现相一致[29−30]。

2.4　硝普钠处理对鲜切紫马铃薯总酚、总黄酮及总花色苷含量的影响

酚类物质一般包含简单酚类和类黄酮化合物, 其中愈创木酚、绿原酸、儿茶酚等简单酚类物质通常是 PPO 的底物, 可促进酶促褐变。而类黄酮化合物则具有抗氧化能力, 能够在逆境胁迫中发挥重要作用[31]。如图 3A 所示, 对照组和 SNP 处理组的总酚含量在贮藏期间总体呈现上升的趋势, 并且 SNP 处理组的总酚含量在整个贮藏期间都显著高于对照组(P<0.05)。6 d 时, SNP 处理组的总酚含量最高, 在贮藏结束时 SNP 处理组的总酚含量是对照组的 1.11 倍, 可见 SNP 处理有助于保持较高水平的总酚含量。

类黄酮化合物及衍生物通过植物体中的苯丙烷代谢途径产生, 包括花色素、黄酮、查尔酮和异黄酮等, 具有一定的抗氧化能力和抑菌能力, 同时也使果蔬呈现不同的颜色, 如花青素在植物液泡中会由于 pH 的不同而呈现出不同的颜色, 黄酮和黄酮醇则大多呈现黄色[19]。如图 3B 所示, SNP 处理组中鲜切紫马铃薯总黄酮的含量呈现先上升后降低的趋势, 而对照组的总黄酮含量则持续降低, 并且在整个贮藏期间, SNP 处理组中总黄酮的含量始终显著高于对照组(P<0.05), 在贮藏结束时, SNP 处理组中的总黄酮含量达到了对照组的 1.44 倍, 这表明 SNP 处理能提高鲜切紫马铃薯贮藏期间总黄酮的含量。

花色苷属于水溶性色素, 为一类广泛存在于植

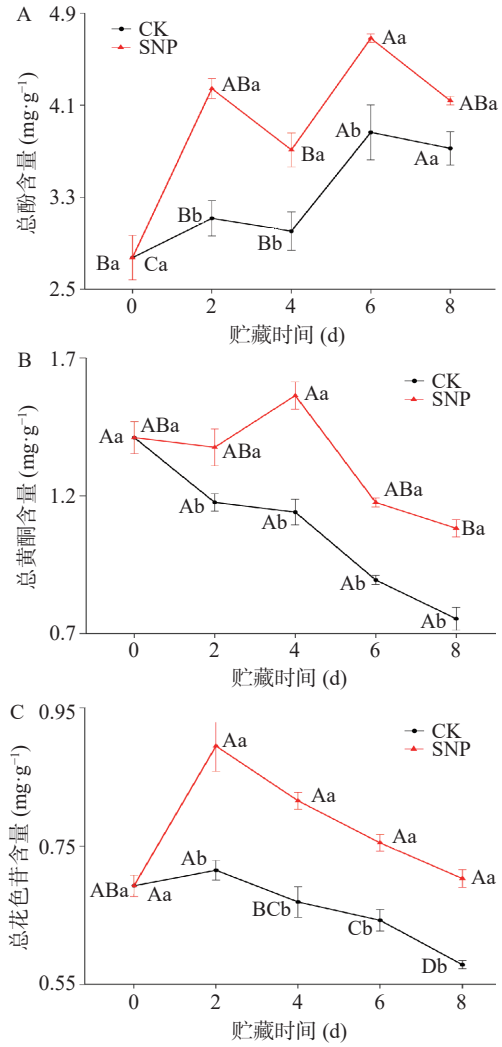


图 3　对照和 SNP 处理对鲜切紫马铃薯贮藏期间总酚含量（A）、总黄酮含量（B）和总花色苷含量（C）的影响

Fig.3　Effects of control and SNP treatments on total phenol content (A), total flavone content (B) and total anthocyanin content (C) of fresh-cut purple potatoes during storage

物里的天然花青素，属于黄酮类化合物，植物能表现出颜色主要因为含有这类物质，其具有多种生理活性[32]，这也是紫马铃薯中主要的抗氧化物质。如图 3C 所示，SNP 处理能够显著提高鲜切紫马铃薯贮藏期间的花青素含量（P<0.05）。对照组和处理组在贮藏期间都呈现先升高后降低的趋势，但 SNP 处理组在整个贮藏期间的花色苷含量都高于对照组，贮藏结束时，SNP 处理组的花色苷含量达到处理组的 1.22 倍。这可能是由于在贮藏过程中 PAL 酶活性提升，从而导致苯丙烷代谢途径被激活，导致产生的酚类物质、类黄酮和花色苷增多。

2.5　硝普钠处理对鲜切紫马铃薯挥发性有机物的影响

风味是评价鲜切果蔬的重要感官指标。本研究测定了不同处理下鲜切紫马铃薯在贮藏 0、4、8 d 时的挥发性成分，利用 NIST 2014 数据库和 IMS 迁移时间数据库，对挥发性成分进行了定性分析，通过分析确定了 71 种挥发性化合物，表 2 展示了测定得到的所有的挥发性化合物，如表所示，在鉴定得到的挥发性成分中，共包括 11 种醇类物质、12 种醛类物质、11 种酮类物质、8 种酯类物质、8 种烃类物质、2 种呋喃类物质、8 种有机酸类物质和 4 种吡嗪类物质。

图 4 展示了不同处理下鲜切紫马铃薯贮藏期间挥发性化合物的指纹图谱，显示了所有样本的总体比较和分析。其中烃类化合物的阈值较高，不易引起嗅觉反应。因此选择非烃类化合物作为风味物质的主要来源[14]，但值得注意的是，有研究表明 α-蒎烯是马铃薯植物毒性的标志物[33]，而在本研究中，SNP 处理对 α-蒎烯具有抑制作用。如图所示，2-甲基丁醛、2-乙基丁酸、2-甲基丙酸等化合物在 8 d 的贮藏期间含量均没有较大变化。且仅在 0 d 时采集的样品中检

表 2　不同处理鲜切紫马铃薯中的挥发性有机物

Table 2　Volatile organic compounds in fresh-cut purple potatoes with different treatments

种类	化合物	CAS号	化学式	保留时间(s)	迁移时间(a.u.)	峰体积(a.u.)					
						CK-0	SNP-0	CK-4	SNP-4	CK-8	SNP-8
醇类(11)											
	α-甲基苯甲醇	C98851	$C_8H_{10}O$	639.398	1.18988	1950.17	935.09	3502.00	3319.14	3178.04	2376.53
	1-辛醇	C111875	$C_8H_{18}O$	547.293	1.47154	309.43	297.23	388.64	368.79	387.80	359.28
	2,3-丁二醇	C513859	$C_4H_{10}O_2$	252.73	1.36628	6329.03	6205.55	9735.13	8234.02	9506.30	8297.24
	5-甲基-2-呋喃甲醇	C3857258	$C_6H_8O_2$	406.427	1.26301	2203.40	2082.36	2163.24	2156.25	1989.75	1881.76
	2-己醇	C626937	$C_6H_{14}O$	466.559	1.56894	242.40	199.35	303.64	246.86	369.40	262.18
	2-甲基-1-戊醇	C105306	$C_6H_{14}O$	241.548	1.58389	2271.34	2248.01	2358.78	2362.61	2636.66	2661.50
	3-辛烯-1-醇	C20125842	$C_8H_{16}O$	612.309	1.74087	400.80	470.75	363.14	298.01	259.25	273.97
	5-辛烯-1-醇	C64275736	$C_8H_{16}O$	673.171	1.68052	2228.67	1993.35	4452.07	3887.12	6198.01	4367.75
	2-苯基乙醇	C60128	$C_8H_{10}O$	717.577	1.64774	598.31	315.22	625.98	836.12	979.46	1201.97
	庚醇	C53535334	$C_7H_{16}O$	422.851	1.39618	461.56	266.31	629.71	759.44	702.42	548.52
	戊-2-醇	C6032297	$C_5H_{12}O$	210.448	1.43204	2797.39	2968.96	1549.99	1578.01	1731.96	1730.90
醛类(12)											
	(E)-庚-2-烯醛	C18829555	$C_7H_{12}O$	447.18	1.25881	1411.57	1336.56	1297.47	1448.32	1217.83	1144.59
	2-甲基丁醛	C96173	$C_5H_{10}O$	189.132	1.40215	11600.76	12729.52	11440.53	11327.21	13112.66	12929.8
	3-甲基丁醛	C590863	$C_5H_{10}O$	142.657	1.20606	298.92	291.87	374.44	395.45	464.87	359.16

续表 2

种类	化合物	CAS号	化学式	保留时间(s)	迁移时间(a.u.)	峰体积(a.u.)					
						CK-0	SNP-0	CK-4	SNP-4	CK-8	SNP-8
	苯甲醛	C100527	C_7H_6O	421.158	1.46215	741.33	509.43	965.83	913.54	965.57	898.72
	丁醛	C123728	C_4H_8O	130.077	1.13313	7349.21	7342.59	1783.43	2507.08	2424.51	1594.75
	庚醛	C111717	$C_7H_{14}O$	417.234	1.6994	4976.77	5067.15	4629.32	3354.01	3384.80	3359.13
	己醛	C66251	$C_6H_{12}O$	273.436	1.25598	2247.18	2237.36	2445.24	2042.49	2332.54	1921.10
	壬醛	C124196	$C_9H_{18}O$	792.478	1.4746	604.09	696.62	1052.67	983.95	1298.53	1249.66
	辛醛	C124130	$C_8H_{16}O$	573.773	1.39734	721.99	771.63	1010.26	1046.14	1183.78	1114.07
	戊醛	C110623	$C_5H_{10}O$	178.3	1.17856	401.31	415.23	478.66	568.33	529.84	548.79
	苯乙醛	C122781	C_8H_8O	587.599	1.25533	15026.65	15099.61	17201.76	14530.92	17680.36	14287.9
	反式-2-己烯醛	C6728263	$C_6H_{10}O$	270.066	1.51193	2513.14	2072.41	1969.86	2232.94	2095.76	2023.29
酮类(11)											
	2,3-戊二酮	C600146	$C_5H_8O_2$	170.961	1.29215	1264.91	1083.526	1078.08	1003.13	504.56	1220.72
	2-壬酮	C821556	$C_9H_{18}O$	630.192	1.40199	1308.58	1417.96	1186.44	938.94	1142.00	1081.15
	2-辛酮	C111137	$C_8H_{16}O$	427.345	1.33097	3426.41	3654.06	2827.18	2811.93	2633.01	2823.27
	3-巯基-2-丁酮	C40789988	C_4H_8OS	267.444	1.43693	1811.31	1778.78	1963.56	1869.79	1730.66	1984.80
	3-戊酮	C96220	$C_5H_{10}O$	166.069	1.34715	3370.84	3018.39	1203.05	1376.16	987.83	1649.11
	3-戊烯-2-酮	C625332	C_5H_8O	200.664	1.07813	195.98	212.69	244.29	248.62	250.21	188.13
	2,6-二甲基-4-庚酮	C108838	$C_9H_{18}O$	387.182	1.32558	124.66	104.93	209.54	227.26	488.34	282.71
	苯乙酮	C98862	C_8H_8O	685.8	1.56955	361.19	152.53	625.79	547.69	754.31	678.52
	二氢-2-呋喃酮	C96480	$C_4H_6O_2$	360.975	1.30169	608.44	478.99	401.71	354.72	402.65	364.76
	庚烷-2-酮	C110430	$C_7H_{14}O$	376.791	1.63909	239.88	269.47	560.56	425.53	757.27	650.87
	甲基-5-庚烯-2-酮	C110930	$C_8H_{14}O$	485.763	1.1761	1136.15	1074.09	1089.96	1627.74	1426.42	1377.26
酯类(8)											
	3-己烯-1-醇甲酸酯	C33467731	$C_7H_{12}O_2$	398.511	1.18099	1663.93	1636.38	1909.01	1231.92	1894.52	1546.92
	乙酸丁酯	C123864	$C_6H_{12}O_2$	240.85	1.23503	336.40	340.85	416.05	538.44	488.07	433.17
	己-3-烯酸乙酯	C2396830	$C_8H_{14}O_2$	528.872	1.25802	5146.07	5137.98	5577.22	5911.48	4748.39	4865.57
	己酸乙酯	C123660	$C_8H_{16}O_2$	501.607	1.3438	5146.07	5137.98	5577.22	5911.483	4748.39	4865.57
	异硫氰酸异丁酯	C591822	C_5H_9NS	423.226	1.53638	2325.79	1273.30	2846.12	2200.38	2339.62	2462.10
	戊酸甲酯	C624248	$C_6H_{12}O_2$	291.411	1.56572	15404.40	15203.43	12491.94	12504.83	11165.99	11238.57
	乙酸戊酯	C628637	$C_7H_{14}O_2$	307.513	1.75972	759.86	666.80	907.05	719.16	883.02	658.14
	丁酸戊酯	C540181	$C_9H_{18}O_2$	686.935	1.41316	594.98	643.14	226.79	310.96	347.94	424.20
烃类(8)											
	异丁烷	C78842	C_4H_8O	112.955	1.26704	418.29	332.17	785.89	848.36	682.38	615.48
	八甲基环四硅氧烷	C556672	$C_8H_{24}O_4Si_4$	520.045	1.66841	8458.93	7911.06	7893.27	9141.62	6130.90	6276.76
	(R)-α-蒎烯	C7785708	$C_{10}H_{16}$	377.537	1.22298	286.36	287.23	491.27	462.59	578.05	466.13
	α-水芹烯	C99832	$C_{10}H_{16}$	618.017	1.67547	502.49	459.76	447.70	625.61	537.62	469.33
	4-异丙烯基-1-甲基环己烯	C138863	$C_{10}H_{16}$	609.08	1.22471	3436.19	4443.78	5995.42	4240.11	6284.12	3911.37
	二丙烯基二硫化物	C2179579	$C_6H_{10}S_2$	692.359	1.19442	1072.12	728.51	1629.34	1295.23	1039.25	1120.25
	异戊二烯	C78795	C_5H_8	111.557	1.20487	457.56	231.87	631.80	614.55	630.20	590.33
呋喃类(2)											
	2,5-二甲基呋喃	C625865	C_6H_8O	197.031	1.35712	550.28	547.99	365.34	358.50	354.03	537.01
	2-乙基呋喃	C3208160	C_6H_8O	185.987	1.31367	4135.91	4218.14	4595.93	4601.84	3843.95	3829.34
酸类(8)											
	1-苯丙氨酸	C4221981	$C_{10}H_{16}$	485.064	1.22673	502.49	459.76	447.70	625.61	537.62	469.33
	2-乙基丁酸	C88095	$C_6H_{12}O_2$	387.823	1.55995	889.44	883.02	719.80	978.16	872.12	809.50
	2-甲基丁酸	C116530	$C_5H_{10}O_2$	285.045	1.46628	722.94	718.75	740.56	638.54	751.98	801.51
	2-甲基丙酸	C79312	$C_4H_8O_2$	210.098	1.38541	2426.59	2385.72	1731.66	1740.71	1851.39	2048.96
	乙酸	C64197	$C_2H_4O_2$	158.731	1.07693	1205.02	1062.27	1512.97	1218.49	1051.92	1091.08
	(E)-3-己烯酸	C1577180	$C_6H_{10}O_2$	486.603	1.61791	535.69	484.41	916.26	971.11	1117.97	915.66
	2-庚烯酸	C18999285	$C_7H_{12}O_2$	905.965	1.41316	1322.66	1025.80	1138.81	1455.09	1054.30	927.71
	3-辛烯酸	C1577191	$C_8H_{14}O_2$	792.478	1.88791	1084.43	1147.41	1082.57	773.40	977.62	787.60
吡嗪类(4)											
	2,5-二甲基吡嗪	C123320	$C_6H_8N_2$	379.412	1.11252	340.05	324.35	589.38	447.77	606.11	487.52

续表 2

种类	化合物	CAS号	化学式	保留时间(s)	迁移时间(a.u.)	峰体积(a.u.)					
						CK-0	SNP-0	CK-4	SNP-4	CK-8	SNP-8
	2-乙酰基吡嗪	C22047252	$C_6H_6N_2O$	550.709	1.15115	1135.74	1166.22	1739.99	1647.79	1860.44	1649.85
	2-乙基-5-甲基吡嗪	C13360640	$C_7H_{10}N_2$	465.522	1.20479	655.75	602.86	835.38	749.89	939.80	707.58
	3-仲丁基-2-甲氧基吡嗪	C24168705	$C_9H_{14}N_2O$	715.307	1.73338	2748.40	2064.04	3596.31	2730.59	2390.11	1785.11
	乙基吡嗪	C13925003	$C_6H_8N_2$	355.82	1.51519	4065.21	3879.26	6167.24	6206.86	5397.24	4831.88
其它(7)											
	乙偶姻	C513860	$C_4H_8O_2$	203.809	1.3065	5625.57	5541.54	8737.60	8887.25	9322.24	9236.67
	二甲基二硫	C624920	$C_2H_6S_2$	199.266	1.00639	635.63	573.80	476.06	506.26	336.06	304.53
	邻甲酚	C95487	C_7H_8O	573.873	1.11273	292.49	418.08	193.47	173.74	205.66	225.61
	苯酚	C108952	C_6H_6O	431.464	1.09132	607.82	280.77	771.86	1056.71	1182.22	802.62
	2,4,5-三甲基噻唑	C13623115	C_6H_9NS	510.607	1.1406	126.25	127.04	370.89	188.07	464.89	262.81
	噻吩	C110021	C_4H_4S	175.504	1.06737	1335.48	1354.15	1070.21	901.53	1000.68	917.70
	2-甲酰基吡咯	C1003298	C_5H_5NO	505.729	1.08954	455.20	361.13	470.60	373.49	464.44	424.27

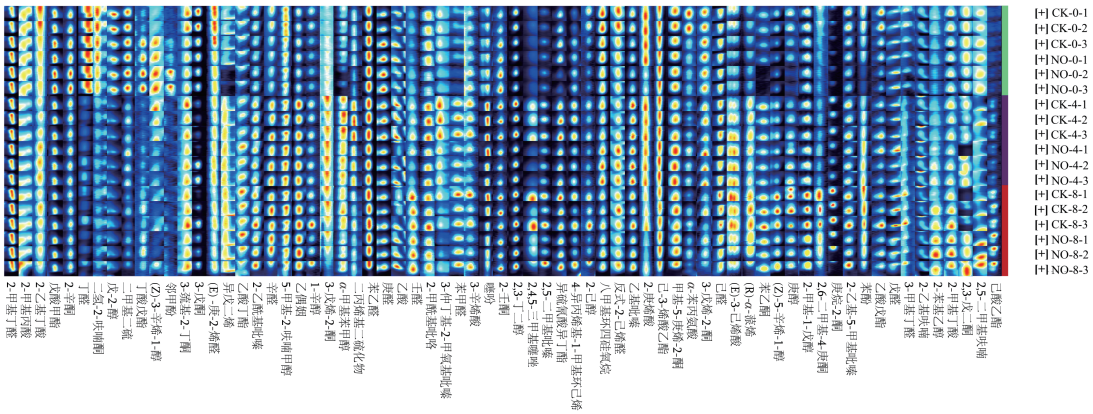


图 4　鲜切紫马铃薯贮藏期间挥发性有机化合物的指纹图谱

Fig.4　Fingerprint of volatile organic compounds in fresh-cut purple potatoes during storage

测到戊醇、2-辛酮、邻甲酚、丁醛、戊酸甲酯和丁酸戊酯，因此可以认为这些物质是新鲜紫马铃薯中的特征性挥发物。鲜切果蔬由于切割、洗涤等加工操作，导致细胞损伤，促进了脂氧合酶与底物的接触，加快脂质的氧化，产生醛、酮和醇等脂质氧化产物，这是鲜切果蔬挥发性成分的主要来源[34−35]。而本研究发现，在贮藏过程中，SNP 处理对戊醛、己醛、3-甲基丁醛、乙酸戊酯、苯酚、(E)-3-己烯酸和苯乙酮含量具有抑制作用。在鲜切紫马铃薯中，异味主要由醛类物质引起[36−37]，Xu 等[38] 的研究发现生马铃薯中己醛是主要的挥发性物质。而从化学指纹图谱中可以看出，SNP 处理抑制了己醛的产生，这能够减少鲜切紫马铃薯的异味。结合抗氧化酶活性及总黄酮与花色苷含量的分析，SNP 处理能够提升鲜切紫马铃薯的抗氧化性，有效缓解细胞内脂质的氧化降解，从而减少醛类物质尤其是己醛的产生，减少贮藏期间异味的产生，这对于保持鲜切紫马铃薯风味具有实际意义。

以特征峰对应的峰体积为参数变量，利用 R 统计分析软件对不同处理下鲜切紫马铃薯贮藏期间的挥发性成分进行主成分分析(PCA)，将高维的数据变量进行维度压缩，从而保留主要的数据信息[39−40]。如图 5 所示，PC1、PC2 和 PC3 分别解释了数据中 49.35%、14.9% 和 11.9% 的变化。不同贮藏时间和处理组的数据点能够明显区分，平行样本则聚类在一起，说明在不同的贮藏时间下，鲜切紫马铃薯的挥发性成分发生了明显的变化，同时 SNP 处理也显著改变了鲜切紫马铃薯的风味。在 0 d 时，不同处理组之间分布较为集中，可见在贮藏初期，SNP 处理对鲜切紫马铃薯的风味的影响还不明显。而在 4 d 和 8 d，

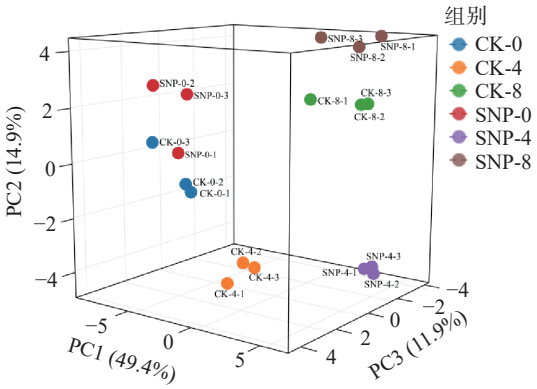


图 5　鲜切紫马铃薯贮藏期间挥发性有机化合物的三维 PCA 分析

Fig.5　Three-dimensional PCA analysis of volatile organic compounds in fresh-cut purple potatoes during storage

不同处理组之间分离度明显增加，说明在贮藏中后期，SNP 处理明显影响了样品的挥发性成分。这与指纹图谱所呈现的结果一致。

3 结论

本研究探究了 SNP 处理对鲜切紫马铃薯贮藏品质的影响。研究结果表明 0.1 mmol·L^{-1} SNP 处理显著延缓了鲜切紫马铃薯贮藏期间的颜色变化，同时保持较低的蒸煮损失率和较高水平的可溶性固形物含量。此外，SNP 处理降低鲜切紫马铃薯内细胞的水分流动性、提高了抗氧化酶的活性同时保持较高水平的总酚和总黄酮含量。对挥发性有机化合物的分析表明，SNP 处理主要抑制脂质降解产物醛类物质的增加，尤其是对生马铃薯中的主要异味物质己醛含量的抑制，减少了贮藏期间鲜切紫马铃薯异味的产生，维持了较好的风味。综上所述，SNP 处理能够有效延长鲜切紫马铃薯的货架期。然而本实验缺乏鲜切紫马铃薯贮藏过程中防御相关基因的变化，未来可进一步利用基因组学和转录组学等技术探究分子水平上的变化。

© 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] LIN Y F, LIN Y X, LIN H T, et al. Application of propyl gallate alleviates pericarp browning in harvested longan fruit by modulating metabolisms of respiration and energy[J]. Food Chemistry, 2018, 240: 863−869.

[2] 于世莹, 王文秀, 马倩云, 等. 紫马铃薯花色苷的提取、纯化及其稳定性研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(21): 156−163. [YU S Y, WANG W X, MA Q Y, et al. Extraction, purification and stability of purple potato anthocyanin[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(21): 156−163.]

[3] ALBISHI T, JOHN J A, ALKHALIFA A S, et al. Phenolic content and antioxidant activities of selected potato varieties and their processing by-products[J]. Journal of Functional Foods, 2013, 5(2): 590−600.

[4] LI D, ZHANG X C, LI L, et al. Elevated CO_2 delayed the chlorophyll degradation and anthocyanin accumulation in postharvest strawberry fruit[J]. Food Chemistry, 2019, 285: 163−170.

[5] 乔沛, 李慧星, 罗建成, 等. 外源褪黑素对采后西梅的贮藏品质及软化相关基因表达的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(9): 1−12. [QIAO P, LI H X, LUO J C, et al. Effect of exogenous melatonin on postharvest storage quality and softening-related gene expression of *Prunus domestica*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(9): 1−12.]

[6] SUN M, YANG T, QIAO X X, et al. Nitric oxide regulates the lignification and carotenoid biosynthesis of postharvest carrot (*Daucus carota* L.)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2024, 207: 112593.

[7] SAHU S K, BARMAN K, SINGH A K. Nitric oxide application for postharvest quality retention of guava fruits[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2020, 42(10): 156.

[8] REN Y F, HE J Y, LIU H Y, et al. Nitric oxide alleviates deterioration and preserves antioxidant properties in 'Tainong' mango fruit during ripening[J]. Journal of the Korean Society for Horticultural Science, 2017, 58(1): 27−37.

[9] DAI Y K X, XIE H, ZHAO X Y, et al. The effect of sodium nitroprusside treatment on storage ability of fresh-cut potato[J]. Foods, 2023, 12(1): 221.

[10] PAN X Y, WANG J R, XU W Y, et al. Uncovering quality changes of shrimp (*Penaeus vannamei*) during solar drying and its relationship with protein-related properties[J]. Food Chemistry, 2024, 23: 101696.

[11] 苑丽婧, 何秀, 林蓉, 等. 超声预处理对猕猴桃水分状态及热风干燥特性的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(13): 263−272. [YUAN L J, HE X, LIN R, et al. Effects of ultrasound pretreatment on water state and hot-air drying characteristics of kiwifruit[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(13): 263−272.]

[12] WANG L, XU B G, WEI B X, et al. Low frequency ultrasound pretreatment of carrot slices: Effect on the moisture migration and quality attributes by intermediate-wave infrared radiation drying[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 40: 619−628.

[13] WANG B, LI Z C, HAN Z H, et al. Effects of nitric oxide treatment on lignin biosynthesis and texture properties at wound sites of muskmelons[J]. Food Chemistry, 2021, 362: 130193.

[14] CHENG D W, MA Q Y, ZHANG J H, et al. Cactus polysaccharides enhance preservative effects of ultrasound treatment on fresh-cut potatoes[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 90: 106205.

[15] GHEYSARBIGI S, MRDEHGHANL S H, GHASEMNEZHAD M, et al. The inhibitory effect of nitric oxide on enzymatic browning reactions of in-package fresh pistachios (*Pistacia vera* L.)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 159(2): 110998.

[16] CHEN X Q, LI Z H, WANG Z J, et al. Ultrasound-assisted extraction of total anthocyanins from *Rubia sylvatica* Nakai fruit and radical scavenging activity of the extract[J]. Industrial Crops and Products, 2020, 150: 112420.

[17] LI G Q, WANG X X, ZHU H M, et al. Use of different food additives to control browning in fresh-cut potatoes[J]. Food Science and Nutrition, 2023, 11(12): 7967−7973.

[18] GAO Y, ZHAO Y C, JIANG C K, et al. Influence of the tea polyphenol treatment on the colour, texture, and antioxidant activity in fresh-cut potatoes[J]. Czech Journal of Food Sciences, 2025, 43(1): 29−36.

[19] 何雪莲, 韩丽春, 郑鄂燕, 等. NO 处理对黄金勾豆角采后贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(7): 220−228. [HE X L, HAN L C, ZHENG R Y, et al. Effects of NO treatment on postharvest storage quality of golden hook bean[J]. Food Science, 2023, 44(7): 220−228.]

[20] 刘慧, 吕真真, 杨文博, 等. 采后硝普钠处理对桃果实贮藏品质及抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(19): 374-381. [LIU H, LÜ Z Z, YANG W B, et al. Effects of postharvest sodium nitroprusside application on qualities and antioxidant activities of peach fruits during cold storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(19): 374-381.]

[21] HAN C Q, WANG W X, SUO B X, et al. Sodium nitroprusside affects energy metabolism, gamma-aminobutyric acid branching, and circRNA regulation of fresh-cut purple potatoes[J]. Postharvest Biology and Technology, 2025, 227: 113599.

[22] 吴敏, 杜鹃, 王曼, 等. 一氧化氮对无核白葡萄果梗贮藏品质和微观结构的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(21): 350−359. [WU M, DU J, WANG M, et al. Effects of nitric oxide on storage

quality and microstructure of seedless white grape stem[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(21): 350−359.]
[23] XU F F, JIN X, ZHANG L, et al. Investigation on water status and distribution in broccoli and the effects of drying on water status using NMR and MRI methods[J]. Food Research International, 2017, 96: 191−197.
[24] 王锋, 杨青珍, 赵旗峰, 等. 外源褪黑素对甜樱桃果实褐变和品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(5): 340−347. [WANG F, YANG Q Z, ZHAO Q F, et al. Effect of exogenous melatonin treatment on browning and quality of sweet cherry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(5): 340−347.]
[25] ZHOU H W, YUAN B, CHEN W, et al. Effect of monooxygenase purified from Mycobacterium JS60 combined with sodium alginate on the preservation of banana[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 161: 111079.
[26] 宋晓雪, 胡文忠, 毕阳, 等. 鲜切果蔬酶促褐变关键酶的研究进展[J]. 食品工业科技, 2013, 34(15): 390−393. [SONG X X, HU W Z, BI Y, et al. Research progress in key enzymes for enzymatic browning of fresh-cut fruits and vegetables[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(15): 390−393.]
[27] CIOU J Y, LIN H H, CHIANG P Y, et al. The role of polyphenol oxidase and peroxidase in the browning of water caltrop pericarp during heat treatment[J]. Food Chemistry, 2011, 127(2): 523−527.
[28] ANDREW T, MARK P M, JULIA A M, et al. Enzymatic browning: The role of substrates in polyphenol oxidase mediated browning[J]. Current Research in Food Science, 2023, 7: 100623.
[29] ZHU L Q, YANG R, SUN Y, et al. Nitric oxide maintains postharvest quality of navel orange fruit by reducing postharvest rotting during cold storage and enhancing antioxidant activity[J]. Physiological and Molecular Plant Pathology, 2021, 113: 101589.
[30] QI X H, JI Z J, LIN C, et al. Nitric oxide alleviates lignification and softening of water bamboo (*Zizania latifolia*) shoots during postharvest storage[J]. Food Chemistry, 2020, 332: 127416.
[31] 杨旭凤, 贾晓东, 许梦洋, 等. 褐变机理及其防治技术研究进展[J]. 中国农学通报, 2023, 39(13): 137−145. [YANG X F, JIA X D, XU M Y, et al. Browning mechanism and its control technology: Research progress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(13): 137−145.]
[32] 李斌, 王琳, 岳健, 等. 花青素类化合物影响淀粉理化性质研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(1): 343−351. [LI B, WANG L, YUE J, et al. Research progress on the effects of anthocyanidin compounds on physicochemical properties of starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(1): 343−351.]
[33] STEGLINSKA A, PIELECH P K, JANAS R, et al. Volatile organic compounds and physiological parameters as markers of potato (*Solanum tuberosum* L.) infection with phytopathogens[J]. Molecules, 2022, 27(12): 3708.
[34] JIANG Q Q, ZHAO W T, ZHAO S, et al. Comparison between vacuum and modified-atmosphere packaging on dynamic analysis of flavor properties and microbial communities in fresh-cut potatoes (*Solanum tuberosum* L.)[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2023, 39: 101149.
[35] SHAHIDI F, HOSSAIN A. Role of lipids in food flavor generation[J]. Molecules, 2022, 27(15): 5014.
[36] PETERSEN M A, POLL L, LARSEN L M. Identification of compounds contributing to boiled potato off-flavour ('POF')[J]. LWT - Food Science and Technology, 1999, 32(1): 32−40.
[37] 张凡, 张宇帆, 苏心悦, 等. 基于顶空气相离子迁移谱的干腐病马铃薯挥发性成分分析[J]. 食品科学, 2022, 43(6): 317−323. [ZHANG F, ZHANG Y F, SU X Y, et al. Analysis of volatile components in potatoes with dry rot by headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Food Science, 2022, 43(6): 317−323.]
[38] XU D Y, CHEN C, ZHOU F H, et al. Vacuum packaging and ascorbic acid synergistically maintain the quality and flavor of fresh-cut potatoes[J]. LWT, 2022, 162: 113356.
[39] 王辉, 田寒友, 李文采, 等. 基于顶空气相色谱-离子迁移谱技术的冷冻猪肉贮藏时间快速判别方法[J]. 食品科学, 2019, 40(2): 269−274. [WANG H, TIAN H Y, LI W C, et al. Fast discrimination of frozen pork stored for different periods using headspace-gas ghromatography-ion mobility spectroscopy (HS-GC-IMS)[J]. Food Science, 2019, 40(2): 269−274.]
[40] GUO S, ZHAO X Y, MA Y, et al. Fingerprints and changes analysis of volatile compounds in fresh-cut yam during yellowing process by using HS-GC-IMS[J]. Food Chemistry, 2022, 369: 130939.