

一氧化氮熏蒸延缓杏干贮藏期间品质的下降

邓豪¹, 王曼¹, 王霞伟¹, 魏佳², 田全明¹, 翟荣臻¹, 杨海燕¹, 吴斌^{2*}

(1. 新疆农业大学食品科学与药学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

(2. 新疆农业科学院农产品贮藏加工研究所, 新疆乌鲁木齐 830091)

摘要:以新疆赛买提鲜杏为试材, 研究了一氧化氮(nitric oxide, NO)和二氧化硫(sulfur dioxide, SO₂)气体分别对鲜杏熏蒸后制干对杏干常温(25±1.0℃)下贮藏品质和抗氧化性的影响。结果表明, NO和SO₂熏蒸均能减缓杏干色泽和可溶性糖含量的下降, 延缓失重率的上升。贮藏60 d, NO处理组杏干L^{*}、b^{*}、类胡萝卜素、可溶性糖、抗坏血酸(vitamin C, Vc)及总酚、类黄酮含量分别较对照组高9.20%、15.87%、25.20%、39.05%、19.43%和23.08%、11.42%; DPPH·、ABTS⁺清除率及FRAP值较对照组高45.75%、19.50%、18.07%, 较SO₂组高31.77%、9.28%、5.89%。可见NO处理显著减缓杏干营养品质的下降(p<0.05), 维持较高的抗氧化能力。此外, NO₂⁻和NO₃⁻残留量均远低于欧洲委员会和国家标准中规定的最小值, 且降解速率快, 因此NO处理提高了杏干的食用安全性。综上所述, NO熏蒸技术是一种有效的贮藏保鲜方法, 可以应用于鲜杏制干的加工处理中; 本试验能为NO熏蒸技术的应用提供一定的理论支撑。

关键词:一氧化氮; 二氧化硫; 杏干; 营养品质; 抗氧化能力

文章编号: 1673-9078(2022)01-188-196

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.1.0375

Nitric Oxide Fumigation Delays the Decline in the Quality of Dried Apricots during Storage

DENG Hao¹, WANG Man¹, WANG Xiawei¹, WEI Jia², TIAN Quanming¹, ZHAI Rongzhen¹, YANG Haiyan¹, WU Bin^{2*}

(1. College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

(2. Institute of Agro-Products Storage and Processing, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China)

Abstract: Using fresh apricots from Saimai in Xinjiang as the test material, the effect of nitric oxide (NO) or sulfur dioxide (SO₂) gas for fumigation on the storage quality and antioxidant capacity of the fumigated and dried 'Saimai' apricots during storage at room temperature (25±1.0 °C) was investigated. The results showed that both NO and SO₂ fumigation could slow down the decreases in the color and soluble sugar content of dried apricot, and delay the increase of weight loss rate. After 60 days of storage, compared to the control group, the L^{*} value, b^{*} value, carotenoid content, soluble sugar content, ascorbic acid (vitamin C, Vc) content, total phenolic content and flavonoid content in the NO-treated apricots increased by 9.20%, 15.87%, 25.20%, 39.05%, 19.43%, 23.08% and 11.42%, respectively. The DPPH· scavenging rate, ABTS⁺ scavenging rate and FRAP value in the NO-treated apricots were higher by 45.75%, 19.50% and 18.07%, respectively, compared with the control, and higher by 31.77%, 9.28% and 5.89%, respectively, compared with the SO₂-treated group. Thus, the NO treatment significantly retarded the decrease in the nutritional quality of dried apricots (p<0.05) while maintaining relatively high antioxidant capacity. Furthermore, the amounts of the NO₂⁻ and NO₃⁻ residues in dried apricots were far lower than the minimum specified by the European Commission and national standards, while the NO₂⁻ and NO₃⁻ degraded rapidly. Therefore, the NO treatment significantly improved the food safety of dried apricots. In

引文格式:

邓豪,王曼,王霞伟,等.一氧化氮熏蒸延缓杏干贮藏期间品质的下降[J].现代食品科技,2022,38(1):188-196

DENG Hao, WANG Man, WANG Xiawei, et al. Nitric oxide fumigation delays the decline in the quality of dried apricots during storage [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(1): 188-196

收稿日期: 2021-04-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD1002303-2); 新疆杏产业技术体系保鲜加工岗位(XJCYTX-03)

作者简介: 邓豪(1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: 1023379657@qq.com

通讯作者: 吴斌(1973-), 男, 研究员, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: 42042615@qq.com

summary, NO fumigation is an effective storage and preservation method and can be used in the processing of dried apricots. This study provides certain theoretical support for the application of nitric oxide fumigation technology.

Key words: nitric oxide; sulfur dioxide; dried apricot; nutritional quality; antioxidant capacity

杏(*Prunus armeniaca* L.)是新疆重要的经济作物,其营养丰富、口感香甜,深受消费者的青睐^[1]。由于鲜杏采收期集中在高温季节,采后代谢旺盛,极易腐烂变质,不耐贮运,因此约80%鲜杏须加工成杏干,以满足不同季节人们对杏产品的需求。鲜杏制干的传统方法主要采用硫处理鲜杏后进行露天晾晒。二氧化硫(sulfur dioxide, SO₂)作为一种食品添加剂,被广泛应用于干果、鲜果及中药材中^[2-4],以达到护色、杀菌和抗氧化的目的^[5]。然而SO₂使用不当会导致商品中残留量超标,果实出现漂白、异味和品质劣变等问题,严重危害人体健康,引发食品安全问题,造成巨大的经济损失^[6]。因此,寻找一种更安全高效的制干方法减少或替代SO₂的使用,是当前新疆杏产业发展亟待解决的问题。

一氧化氮(nitric oxide, NO)是一种高活性自由基气体,在细胞内或细胞间扮演重要的信使角色^[7],具有延缓果实衰老^[8]、抑制病原菌侵染和微生物生长的优点^[9,10],对猕猴桃^[11]和番木瓜^[12]等果实采后保鲜有较好的效果。此外,NO对多种采后有害生物均有抑制效果^[13],且无有害物残留,大大提高了果品的食用安全性。NO熏蒸技术在鲜果贮藏保鲜领域应用广泛,但在鲜杏制干贮藏方面鲜有报道,因此,本试验以新疆赛买提鲜杏为试材,采用NO和SO₂气体对鲜杏进行熏蒸后制干,分析常温条件下杏干果实的营养品质指标和抗氧化能力的变化规律,比较NO和SO₂气体对杏干贮藏保鲜作用效果的差异性;研究NO处理减缓杏干的营养物质流失、维持抗氧化能力和改善贮运品质的作用,以期为杏干及其它干果的贮藏保鲜提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

赛买提鲜杏:购于新疆英吉沙县。选择成熟度一致(着色面积≥80%,可溶性固形物(total soluble solids, TSS)含量为19.60±0.06%)、大小均匀、无机械伤及病虫害的果实,随机分组进行试验。

NO气体(纯度≥99.5%)、SO₂气体(纯度≥99.5%),乌鲁木齐鑫天意标准气体有限公司;铁氰化钾,天津市天福达实业公司;2,6-二氯靛酚,上海邦景实业有限公司;抗坏血酸、硝酸钠、亚硝酸钠,天津市福晨

化学试剂厂;亚铁氰化钾,天津市致远化学试剂有限公司;盐酸萘乙二胺,天津市化学试剂研究所有限公司;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)、2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(2,2'-azinobis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonate), ABTS),北京酷尔化学科技有限公司;过硫酸钾(K₂S₂O₈),天津市北辰区方正试剂厂。试验所用试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

JT-32ZTX型空气能热泵厢式一体节能烘干机众恒联创新能源科技有限公司;UV2100型紫外可见分光光度计日本岛津公司;HC-3018R型高速冷冻离心机;CR-400型手持色差仪日本柯尼卡美能达;PC-16型水分测定仪上海浦春计量仪器有限公司;6台组合式熏蒸罐课题组自主研发。

1.3 试验方法

1.3.1 样品处理

气体熏蒸浓度是由前期预试验所得。试验分为以下三个处理。①NO组:将挑好的鲜杏放入熏蒸设备中,加入200 μL/L的NO气体对鲜杏进行3 h的熏蒸处理;②SO₂组:利用200 μL/L的SO₂气体对鲜杏进行3 h的熏蒸处理;③CK组:以相同条件下不加入任何气体的处理作为空白对照。熏蒸结束后取出杏果实,将其摆放在烘烤盘内,放入热泵中进行干燥。当杏子水分含量达20%±2%时,制干结束。用带有6个均匀小孔(孔径8.00 mm)的PET保鲜盒盛装杏干,并于常温(温度为25±1.0℃,相对湿度为45%±5%)条件下进行贮藏。每个处理重复3次,每10 d取一次样,共贮藏60 d。样品去核切块,经液氮处理后迅速粉碎,装袋置于-40℃冰箱内,以进行后续各项指标的测定。

1.3.2 对杏干营养品质及抗氧化能力指标的测定

1.3.2.1 色差和失重率的测定

色差的测定:杏干的色差采用CR-400色差仪测定颜色参数L* (亮度值)、b* (黄蓝值);

失重率的测定:按公式(1)进行计算。

$$\text{失重率}/\% = \frac{\text{贮藏前果实质量} - \text{贮藏后果实质量}}{\text{贮藏前果实质量}} \times 100\% \quad (1)$$

1.3.2.2 可溶性糖、抗坏血酸(vitamin C, Vc)、类胡萝卜素含量的测定

采用蒽酮试剂法^[14]测定果实中可溶性糖的含量；采用 2,6-二氯酚酚滴定法^[14]测定果实 Vc 含量；采用 Lichtenthaler^[15]的方法测定果实的类胡萝卜素含量。

1.3.2.3 总酚和类黄酮含量的测定

采用曹建康等人^[14]的方法测定果实中总酚和类黄酮的含量，以每克样品组织在波长 280 nm 处的吸光值表示总酚含量，即 OD_{280}/g ；在波长 325 nm 处的吸光度值表示类黄酮物质含量，即 OD_{325}/g 。

1.3.2.4 DPPH 自由基清除能力的测定^[16]

准确配置浓度为 0.2 mmol/L 的 DPPH 乙醇溶液，于避光条件下放置，现用现配。精确配置不同浓度样液， A_i : 0.5 mL 样品溶液+0.5 mL 0.2 mmol/L DPPH 乙醇溶液； A_c : 0.5 mL 无水乙醇+0.5 mL 0.2 mmol/L DPPH 乙醇溶液； A_j : 0.5 mL 样品溶液+0.5 mL 无水乙醇。于室温条件下避光反应 30 min，测定不同样品液在 517 nm 波长处的吸光度值，按以下公式 (2) 计算：

$$DPPH\text{自由基清除率}/\% = \left[1 - \frac{A_i - A_j}{A_c} \right] \times 100\% \quad (2)$$

1.3.2.5 ABTS⁺自由基清除能力测定^[17]

将 7.40 mmol/L ABTS⁺溶液与 2.60 mmol/L K₂S₂O₈ 溶液按体积比 1:1 混匀，室温避光静置 12 h，使用前用无水乙醇稀释，使吸光度在 734 nm 波长处为 0.70±0.02，得到 ABTS⁺工作液。精确配置不同质量浓度样液分别取 0.8 mL，加入 ABTS⁺工作液 3.20 mL，混匀避光静置 6 min，于 734 nm 波长处测定吸光度。按以下公式计算 ABTS⁺自由基清除率。

$$ABTS^+\text{自由基清除率}/\% = (1 - A_1 / A_0) \times 100\% \quad (3)$$

式中：

A_1 ——样品液和 ABTS⁺工作液混合液的吸光度值；

A_0 ——ABTS⁺工作液与过硫酸钾混合液的吸光度值。

13.2.6 铁离子还原能力 (ferric reducing/antioxidant

power, FRAP) 的测定^[18]

FRAP 工作液配制：300 mmol/L 乙酸钠水溶液 (pH=3.6)，10 mmol/L TPTZ (使用 40 mmol/L HCl 水溶液配制)，20 mmol/L FeCl₃ 水溶液体积比=10:1:1，现用现配，充分混匀后，置于 37 °C 水浴中备用。标准曲线测定：取 0.1 mL 不同浓度的 FeSO₄ 溶液于 10 mL 比色管中，加入 3 mL FRAP 工作液，加入 2 mL 超纯水，混匀，避光反应 50 min，测 596 nm 处吸光度值。样品测定：取 0.1 mL 样品提取液于 10 mL 比色管中，加入 3 mL FRAP 工作液，加入 2 mL 超纯水，混匀，避光反应 50 min，测 596 nm 处吸光度值，每个样品做 3 个平行。

1.3.2.7 NO₃⁻、NO₂⁻和 SO₂ 残留的测定

杏干中 NO 残留物 NO₃⁻和 NO₂⁻离子含量的测定：采用 GB 5009.34-2016 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定^[19]，其中 NO₂⁻的测定参照第二法，NO₃⁻的测定参照第三法。SO₂ 残留量的测定采用 GB 5009.34-2016 中食品中 SO₂ 的测定^[20]。

1.3.2.8 感官评价

采用以下标准对杏干进行感官评价，评价小组由 10 人组成，感官评价标准如下 (表 1)。

1.4 数据统计与分析

使用 Excel 2010 进行数据处理，使用 SPSS 20.0 (SAS Institute Inc. USA) 进行 Duncan's 多重差异显著性分析，使用 Sigma Plot 12.5 (Systat software, Inc.USA) 用于绘图。

2 结果与讨论

2.1 NO 和 SO₂ 熏蒸对杏干贮藏期间失重率、

色泽和可溶性糖含量的影响

表 1 感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation standard

指标	5-很好	4-好	3-一般	2-差	1-很差
表观	果实饱满，无破损，色泽金黄，皱缩均匀	果实较饱满，色泽呈红褐色，表皮较平整	果实皱缩稍有不均匀，表明较平整，色泽较暗沉	果实皱缩不均匀，表明不平整，色泽呈深褐色	果实皱缩严重，形状不规则，色泽发黑，不均匀
风味	具有杏特有的香甜味，略带酸味，无异味	具有杏香味，酸度略高，无异味	杏香味略淡，酸度高，无异味	杏香味寡淡，过甜或过酸，基本无味	有异味，无杏香味
口感	果肉细腻绵密，易与核分离，咀嚼性好	果肉稍软或稍硬，组织紧密，适宜咀嚼	果肉较硬，肉与核粘连，不易咀嚼	果肉硬，肉与核粘连严重，较难咀嚼	果肉质地非常干硬，难咀嚼
总体	很好，非常喜欢	好，比较喜欢	中等，喜爱一般	较差，比较不喜欢	很差，十分不喜欢

在贮藏期间, 果实的代谢消耗及水分散失导致质量不断下降。由图 1a 可知, 杏干的失重率随贮藏时间的延长呈逐渐上升趋势, 对照组杏干的重量损失较严重, 贮藏 60 d, 杏干失重率达 22.69%, NO 和 SO₂ 处理杏干失重率分别较同期对照组低 17.14%和 5.55%, NO 组杏干失重率显著 ($p<0.05$) 低于其它两组, 有效减缓了贮藏期间杏干果实质量的下降。

颜色是杏干重要的品质属性, 也是影响杏干可接受性的主要感官参数之一。贮藏期间, 杏干 L^* 值和 b^* 值呈现逐渐下降的趋势, 随着贮藏时间的延长杏干果皮光泽亮度不断下降, 色泽由亮黄色逐渐转变成暗褐

色, 在贮藏 60 d 时, NO 和 SO₂ 组杏干的 L^* 值分别比对照高 9.20%、9.17%; b^* 值分别比对照高 15.87%和 14.13%, 差异显著 ($p<0.05$), NO 和 SO₂ 处理组杏干色泽没有显著差异。

可溶性糖含量是衡量果实风味口感的关键指标之一。由图 1d 可知, 整个贮藏过程中, 杏干可溶性糖含量整体呈下降趋势。在第 60 d 时, NO 和 SO₂ 处理杏干中可溶性糖含量均显著高于对照组 ($p<0.05$), 以 NO 组杏干的可溶性糖含量最高, 分别比 SO₂、CK 组高 20.96%和 39.05%, 较好的维持了果实的食用品质。

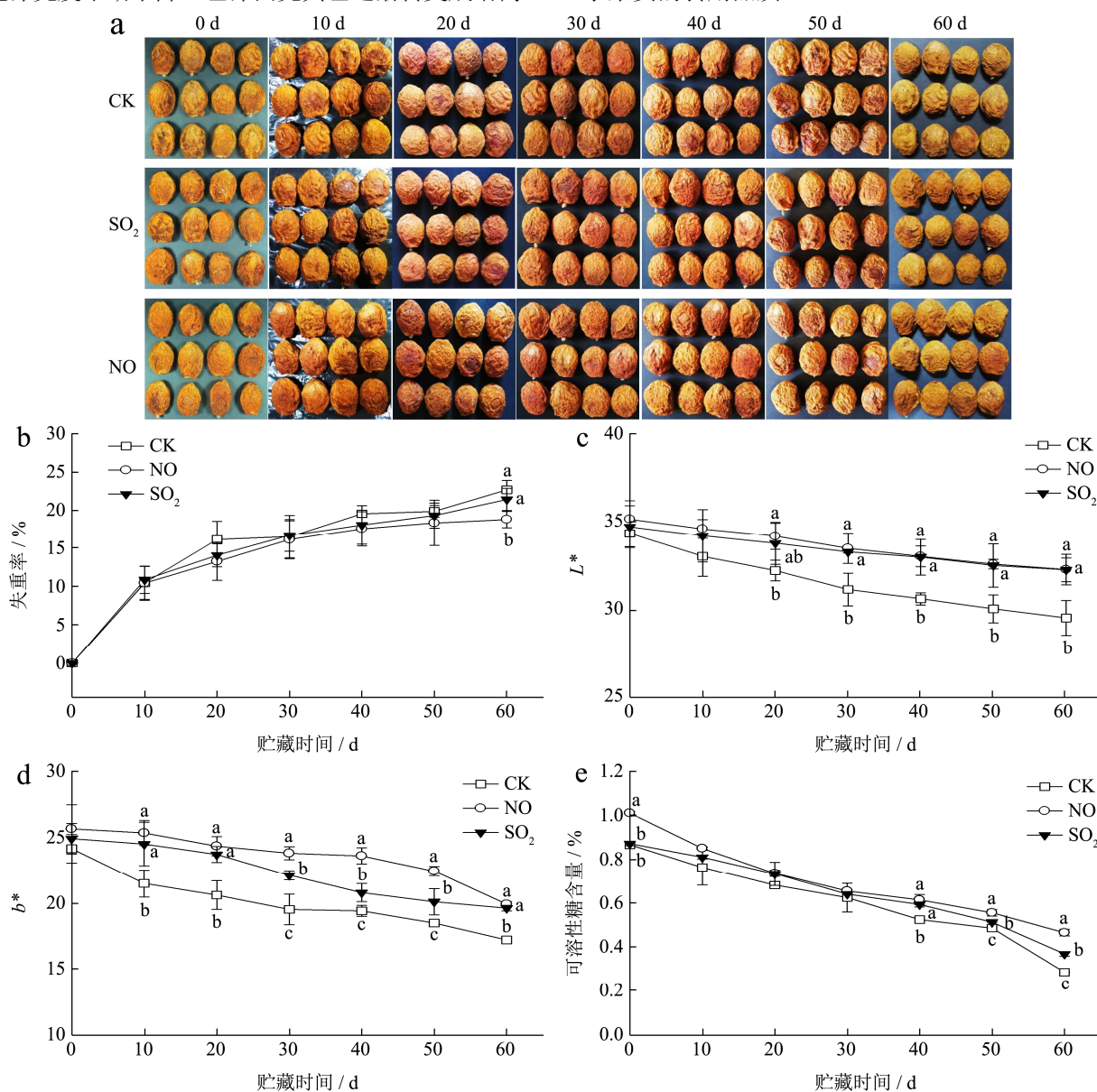


图 1 NO 和 SO₂熏蒸对杏干贮藏期间外观比较 (a)、失重率 (b) 和 L^* (c)、 b^* (d)、可溶性糖含量 (e) 的影响

Fig.1 Effects of NO and SO₂ fumigation on appearance comparison (a), weight loss rate (b) and L^* (c), b^* (d) and soluble sugar content (e) of dried apricot during storage

注: 相同指标在同一天的不同处理, 小写字母不同表示差异显著 ($p<0.05$), 下同。

SO₂ 气体熏蒸破坏了鲜杏表皮, 导致杏果实水分大量散失, 重量损失速率加快, 而 NO 熏蒸能限制果实中水分的转移, 显著减缓失重率的升高^[21]。NO 和 SO₂ 熏蒸能减缓杏干色泽亮度的下降, 这与它们可以抑制果实酶促褐变和降低非酶促褐变的产生有关^[22,23]。通过对杏干贮藏期间可溶性糖含量的测定发现 NO 熏蒸鲜杏能减缓果实中糖类物质的消耗降解, 维持较高糖含量。研究发现利用 0.25 mmol/L 的 NO 处理也能够抑制莲子可溶性糖消耗, 维持较好口感^[24]。

2.2 NO 和 SO₂ 熏蒸对杏干贮藏期间抗坏血酸、类胡萝卜素、总酚和类黄酮的影响

Vc 含量是评价果实营养品质的重要指标之一。随着贮藏时间的延长, 杏干中 Vc 含量不断下降。贮藏期间对照组、NO 和 SO₂ 处理组分别降低 36.97%、31.12%和 31.78%, 熏蒸处理有效延缓了杏干中 Vc 含量的下降, NO 处理效果显著。研究表明, 采用 20 μL/L 的 NO 熏蒸抑制了草莓 Vc 含量的降解, 维持较高的 Vc 含量, 与本试验结果一致^[25]。

类胡萝卜素是杏果实主要的功能性成分, 也是影响果实色泽变化的重要因素。由图 2b 可知, 常温条件下, 杏干中的类胡萝卜素含量与 Vc 变化趋势基本一致, 即随贮藏时间的延长逐渐降低。贮藏 60 d 时, NO 组杏干类胡萝卜素含量为 12.46 mg/kg, 显著高于其它两组 ($p < 0.05$)。表明 NO 熏蒸有效抑制了类胡萝卜素的降解, 较好的维持果实色泽及营养品质。朱树华等^[26]研究发现, 20 μL/L NO 熏蒸处理保持了猕猴桃中较高的类胡萝卜素含量。

酚类物质广泛分布于植物组织中, 是具有防御功能的次生代谢物质, 能有效地清除活性氧自由基^[27], 抑制膜脂过氧化反应, 在植物抗氧化过程中发挥重要作用。如图 2 (c、d) 所示, 杏干的总酚和类黄酮含量呈下降的趋势, 对照组的下降幅度最大。贮藏结束, NO 处理总酚和类黄酮含量分别是 SO₂ 的 1.17 和 1.30 倍; 是对照组的 1.04 和 1.13 倍, 显著减缓了杏干贮藏期间总酚和类黄酮含量的下降 ($p < 0.05$)。

Vc、类胡萝卜素及总酚、类黄酮含量是果实中天然的抗氧化剂, NO 熏蒸能够提高鲜杏果实苯丙氨酸解氨酶和谷胱甘肽还原酶活性, 促进酚类物质和谷胱甘肽以及非酶类抗氧化物质的积累, 增强体系的抗氧化性^[28,29], 从而显著减缓了杏干贮藏期间 Vc、类胡萝卜素及总酚、类黄酮含量的下降 ($p < 0.05$)。SO₂ 处理杏干中 Vc 和总酚、类黄酮含量较低可能是 SO₂ 熏蒸破坏了鲜杏表皮, 从而导致果实营养成分流失, 含量较低。类胡萝卜素在

光照、氧气和酶的作用下容易氧化降解^[27], 导致杏干贮藏期间类胡萝卜素含量呈下降的趋势。SO₂ 处理类胡萝卜素含量较低, 可能是处理后果实中亚硫酸盐含量增加, pH 值下降, 促使了类胡萝卜素的降解^[30]。

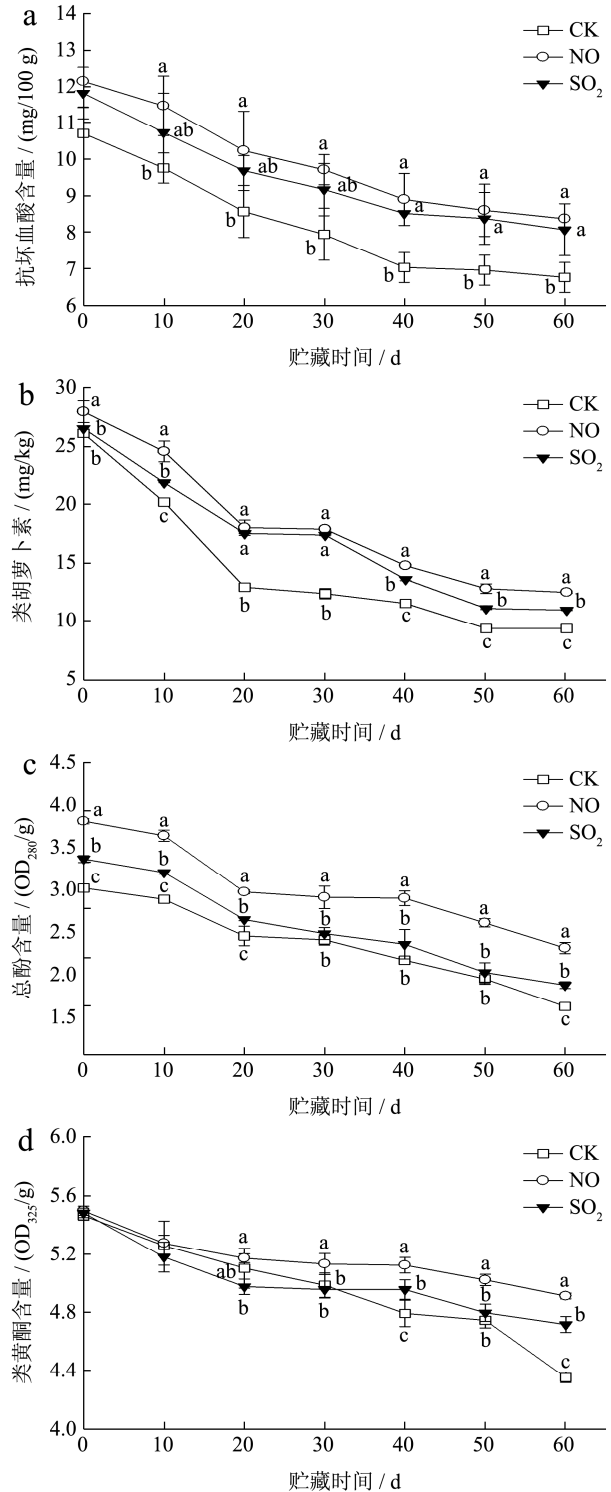


图 2 NO 和 SO₂ 熏蒸对杏干贮藏期间 Vc (a)、类胡萝卜素 (b)、总酚 (c) 和类黄酮含量 (d) 的影响

Fig.2 Effects of NO and SO₂ fumigation on the contents of Vc (a), carotenoids (b), total phenols (c) and flavonoids (d) of dried apricots during storage

2.3 NO 和 SO₂ 熏蒸对杏干贮藏期间抗氧化能力的影响

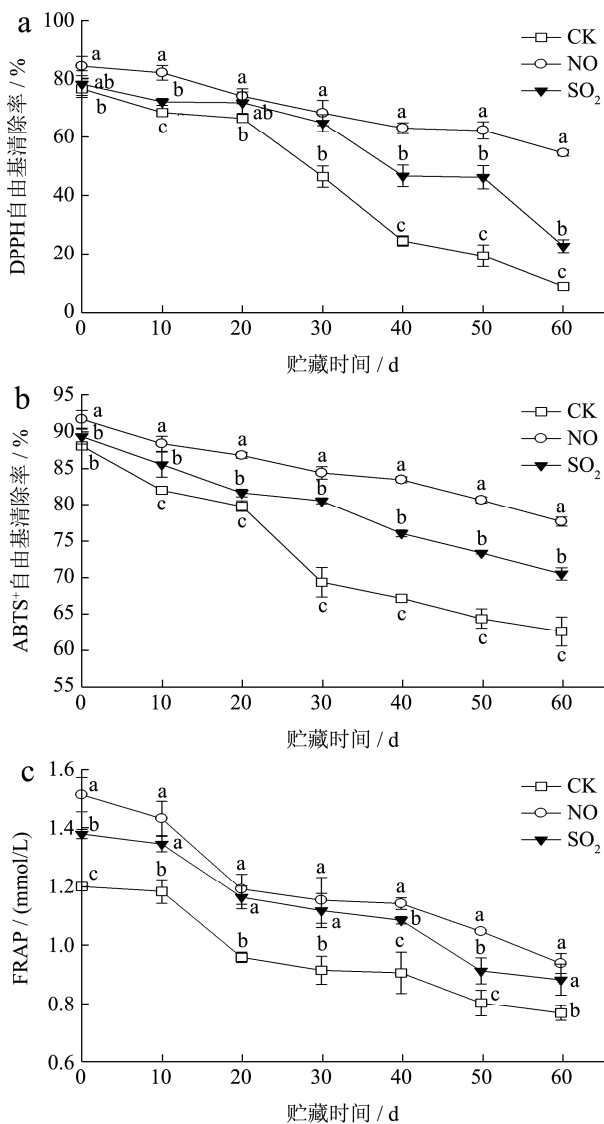


图3 NO 和 SO₂熏蒸对杏干贮藏期间抗氧化能力的影响

Fig.3 Effects of NO and SO₂ fumigation on antioxidant capacity of dried apricot during storage

注: a: DPPH 自由基清除率, b: ABTS⁺自由基清除率, c: FRAP 铁离子还原能力。

DPPH·、ABTS⁺自由基清除能力和 FRAP 直观地展现出果实的抗氧化能力, 自由基清除率越高表示杏干的抗氧化能力越强。如图 3 所示, 随着贮藏时间的延长, 杏干清除 DPPH·、ABTS⁺及 FRAP 的能力明显下降。贮藏 60 d 时, NO 组 DPPH 清除率较 SO₂ 和对照组分别提高 31.77%和 45.75%; ABTS⁺自由基清除

能力较 SO₂、对照组增长了 9.28%和 19.50%; FRAP 较同期 SO₂ 和对照组高 5.53%和 16.95%, 显著提高杏干的抗氧化能力 ($p < 0.05$)。汪荷澄等人^[31]研究发现 SO₂ 浓度与果实抗氧化能力呈线性关系, SO₂ 处理组杏干抗氧化能力较差可能是果实内 SO₂ 浓度较低。

DPPH·、ABTS⁺、FRAP 与 Vc、类胡萝卜素、总酚及类黄酮等自由基清除剂的变化趋势一致。通过相关性分析发现(表 3), DPPH·、ABTS⁺清除率、FRAP 与 Vc、类胡萝卜素、总酚、类黄酮呈极显著正相关, 这表明 Vc、类胡萝卜素、总酚及类黄酮含量对杏果实的抗氧化活性具有重要作用。NO 可通过延缓果实 Vc、总酚、类黄酮及类胡萝卜素等抗氧化剂含量的下降, 维持较高的抗氧化能力。此外, NO 还能调控相关酶活性, 增强果实的抗氧化能力, 减轻氧化胁迫程度, 从而延缓果实品质的下降^[32]。

2.4 NO 和 SO₂ 熏蒸对杏干贮期硝酸盐、亚硝酸盐及 SO₂ 残留的影响

NO 气体进入果实体内以 NO₂⁻和 NO₃⁻这两种离子形式积累在果实内。NO₃⁻是果蔬的主要氮源, 也是人类健康所需要的营养成分。通常条件下, 适量的 NO₃⁻是无毒的, 但是过量的 NO₃⁻被代谢为 NO₂⁻, 继续形成亚硝胺, 可能对人体健康产生负面影响^[33]。欧洲委员会 (European commission, EC) 法规规定一些富含 NO₃⁻产品中的 NO₃⁻最大限量为 2500~4500 mg/kg; 我国食品安全国家标准中蔬菜及其制品腌渍蔬菜中 NO₃⁻含量没有限量要求, 对 NO₂⁻的限量为 20.00 mg/kg^[34]。由表 2 可以看出 NO₂⁻和 NO₃⁻含量随着贮藏时间的延长呈下降趋势。贮藏后期, 杏干中 NO₂⁻含量仅为 0.01 mg/kg, NO₃⁻含量仅有 136.57 mg/kg, 远远低于限量要求。

根据 GB 2760-2014《食品安全国家标准食品添加剂使用标准》的规定, 水果干类的 SO₂ 最大使用量为 100 mg/kg (只限于熏蒸, 最大使用量以 SO₂ 残留量计)。杏干中 SO₂ 残留量均低于国家食品安全限量标准, 贮藏 60 d 杏干中 SO₂ 下降了 58.42%。

杏干中 NO₃⁻、NO₂⁻含量远低于限量标准, NO₂⁻残留量由贮藏初期 0.06 mg/kg 降至 0.01 mg/kg, 下降了 83.33%, 下降速率明显高于 SO₂ 下降速率, 说明 NO 熏蒸处理能够提高杏干的食用安全性。

表 2 NO 和 SO₂熏蒸对杏干贮藏期间 NO₂⁻、NO₃⁻和 SO₂残留量的影响 (mg/kg)

Table 2 Influence of NO and SO₂ fumigation on NO₂⁻, NO₃⁻ and SO₂ residues during storage of dried apricot

时间/d	0	10	20	30	40	50	60
NO ₂ ⁻	0.06±0.03	0.05±0.02	0.041±0.02	0.032±0.02	0.02±0.02	0.011±0.01	0.01±0.01
NO ₃ ⁻	263.31±12.31	246.73±6.25	227.79±5.22	198.39±10.27	169.06±18.57	145.62±13.97	136.57±10.85
SO ₂	49.26±4.27	44.01±4.45	40.47±0.00	29.59±4.14	26.41±4.21	21.79±1.99	20.48±2.20

注: 值为平均值±标准偏差 (n=3)。

表 3 相关性分析

Table 3 Correlation analysis

	ABTS ⁺	DPPH	FRAP	总酚	类黄酮	Vc	L*	b*	类胡萝卜素
ABTS ⁺	1								
DPPH	0.96**	1							
FRAP	0.91**	0.87**	1						
总酚	0.92**	0.89**	0.96**	1					
类黄酮	0.89**	0.89**	0.86**	0.90**	1				
Vc	0.91**	0.87**	0.95**	0.91**	0.88**	1			
L*	0.89**	0.86**	0.88**	0.81**	0.82**	0.73**	1		
b*	0.93**	0.88**	0.93**	0.91**	0.84**	0.73**	0.92**	1	
类胡萝卜素	0.87**	0.82**	0.93**	0.92**	0.88**	0.92**	0.79**	0.85**	1

注: **在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关。

2.5 感官评价

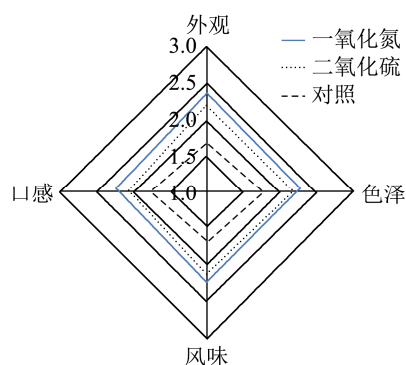


图 4 NO 和 SO₂熏蒸对杏干常温下贮藏感官品质的影响

Fig.4 Effects of NO and SO₂ fumigation on the sensory quality of dried apricots stored at room temperature

杏干的外观、色泽、风味和口感四个方面可直观的反应出果实的贮藏品质和商品价值。每个项目 2.50 分, 分数越高, 评价越好。结果如图 4 所示, 气体熏蒸处理在果实的外观形态、色泽、风味和口感方面均明显高于对照组, 杏干果实较为饱满, 色泽金黄, 具有杏果实特有的香气, 口感细腻香甜, 其中以 NO 熏蒸处理组杏干的感官评价分值较高。

2.6 相关性分析

通过对杏干贮藏期间 Vc、类胡萝卜素、色差 L*、b*、总酚、类黄酮以及抗氧化能力的相关性分析发现

(表 3), 果实中类胡萝卜素、总酚及类黄酮与色差 L*、b*值呈显著正相关; Vc、类胡萝卜素与三个抗氧化指标呈显著正相关, 这与孙宇杰等人^[35]研究发现枸杞类胡萝卜素的质量浓度大小对 DPPH 自由基清除效果影响显著的结果类似。总酚、类黄酮含量与 DPPH、ABTS⁺、FRAP 的变化趋势一致, 呈正相关, 与崔宽波等人^[36]研究结果一致。据此认为, NO 熏蒸处理可通过提高鲜杏果实的抗氧化能力, 减轻果实氧化胁迫, 减缓营养成分的流失, 从而维持较好的色泽品质。

3 结论

NO 和 SO₂熏蒸鲜杏后制干能够较好的维持杏干的色泽, 延缓贮藏期间果实失重率的上升, 维持较高的可溶性糖含量。在减缓 Vc、类胡萝卜素、总酚和类黄酮含量的下降以及维持果实抗氧化能力方面, NO 处理效果显著。此外, 杏干中残留物均低于相关标准限量, 其中 NO₃⁻、NO₂⁻含量远远低于欧盟和国标中的限量标准, 且 NO₂⁻降低速率较 SO₂更快, 说明 NO 熏蒸能显著提高杏干的食用安全性。因此, NO 熏蒸可作为一种提高鲜杏制干品质和食品安全性的潜在技术方法。

参考文献

[1] 新疆维吾尔自治区统计局.新疆统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,1998-2018
Xinjiang Uygur Autonomous Region Bureau of Statistics.

- Xinjiang Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 1998-2018
- [2] Salur Can A, Türkyllmaz M, Özkan M. Effects of sulfur dioxide concentration on organic acids and β -carotene in dried apricots during storage [J]. Food Chemistry, 2017, 221(10): 412-421
- [3] 余以刚,黄伟,刘志坚,等.熏硫处理荔枝贮藏过程中二氧化硫残留研究[J].食品科学,2004,25(11):311-313
YU Yigang, HUANG Wei, LIU Zhijian, et al. Sulfur dioxide residues on litchi fruit treated with sulphur fumigation during storage [J]. Food Science, 2004, 25(11): 311-313
- [4] WANG Xiaozhi, Zhao Weijun, LI Juan, et al. Fast and sensitive determination of sulfur dioxide in herbal medicines by microchip-based field asymmetric-wave ion mobility spectrometry [J]. Analytical Methods, 2015, 7(3): 1036-1045
- [5] 李亚茹.新疆杏干储藏品质控制技术研究[D].北京:中国农业科学院,2014
LI Yaru. Study on the quality control technology of Xinjiang dried apricots [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014
- [6] Türkyllmaz M, Zkan M, Güzel N. Loss of sulfur dioxide and changes in some chemical properties of Malatya apricots (*Prunus armeniaca* L.) during sulfuring and drying [J]. Journal of the Science and Agriculture, 2014, 94(12): 2488-2496
- [7] 朱珍,丁洋,聂莹,等.一氧化氮缓释熏蒸处理对鲜切苹果片品质的影响[J].现代食品科技,2016,32(3):246-251,299
ZHU Zhen, DING Yang, NIE Ying, et al. Effects of nitric oxide slow-release fumigation treatment on the quality of fresh-cut apple slices [J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(3): 246-251, 299
- [8] WU Bin, GUO Qin, LI Qingpeng, et al. Impact of postharvest nitric oxide treatment on antioxidant enzymes and related genes in banana fruit in response to chilling tolerance [J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 92: 157-163
- [9] 陈燕,张健,魏佳,等.一氧化氮熏蒸抑制干制灰枣黑曲霉病及贮藏品质保持[J].农业工程学报,2019,35(12):297-303
CHEN Yan, ZHANG Jian, WEI Jia, et al. Nitric oxide fumigation inhibiting *Aspergillus niger* disease and maintaining storage quality of dried ash jujube [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(12): 297-303
- [10] ZHOU Yahan, LI Shunmin, ZENG Kaifang. Exogenous nitric oxide induced postharvest disease resistance in citrus fruit to *Colletotrichum gloeosporioides* [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2016, 96(2): 505-512
- [11] Zheng X L, Hu B, Song L J, et al. Changes in quality and defense resistance of kiwifruit in response to nitric oxide treatment during storage at room temperature [J]. Scientia Horticulturae, 2017, 222(19): 187-192
- [12] LI Xueping, WU Bin, GUO Qin, et al. Effects of nitric oxide on postharvest quality and soluble sugar content in papaya fruit during ripening [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2014, 38(1): 591-599
- [13] LIU Yongbiao. Nitric oxide fumigation for control of western flower thrips and its safety to postharvest quality of fresh fruit and vegetables [J]. Journal of Asia-Pacific Entomology, 2016, 19(4): 1191-1195
- [14] 曹建康,姜微波,赵玉梅.果蔬采后生理生化实验指导[M].北京:中国轻工业出版社,2007
CAO Jiankang, JIANG Weibo, ZHAO Yumei. Guidance of Postharvest Physiological and Biochemical Experiments of Fruits and Vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007
- [15] Lichtenthaler H K, Wellburn A R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents [J]. Analysis, 1983, 11(5): 591-592
- [16] 裴斐,陶虹伶,蔡丽娟,等.响应面试验优化辣木叶多酚超声辅助提取工艺及其抗氧化活性[J].食品科学,2016,37(20): 24-30
PEI Fei, TAO Hongling, CAI Lijuan, et al. Optimization of polyphenols from *Moringa oleifera* Lam leaves by ultrasound-assisted extraction using response surface methodology and their antioxidant activities [J]. Food Science, 2016, 37(20): 24-30
- [17] 唐艳平,张伟敏,陈文学,等.腰果梨渣多酚提取及抗氧化性研究[J].食品科学,2010,31(20):240-245
TANG Yanping, ZHANG Weimin, CHEN Wenxue, et al. Extraction and antioxidant activity of polyphenols from cashew apple pomace [J]. Food Science, 2010, 31(20): 240-245
- [18] 王苗苗,刘宗浩,张永,等.2种新疆沙棘中黄酮,多酚及其抗氧化活性分析[J].食品工业科技,2020,41(18):51-57
WANG Miaomiao, LIU Zonghao, ZHANG Yong, et al. Analysis of the flavonoid, polyphenol and its antioxidant activity of 2 kinds of sea buckthorn from Xinjiang [J]. Food Industry Technology, 2020, 41(18): 51-57
- [19] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会.GB 5009.33-2016 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定[S]

- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.33-2016 Determination of Nitrite and Nitrate in Food [S]
- [20] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.34-2016 食品中二氧化硫的测定[S]
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.34-2016 Determination of Sulfur Dioxide in Food [S]
- [21] DUAN Xuewu, SU Xinguo, YOU Yanli, et al. Effect of nitric oxide on pericarp browning of harvested longan fruit in relation to phenolic metabolism [J]. Food Chemistry, 2007, 104(2): 571-576
- [22] 高登涛,李秋利,魏志峰,等.植物对二氧化硫胁迫反应与应答机制研究进展[J].广东农业科学,2016,43(11):27-35
GAO Dengtao, LI Qiuli, WEI Zhifeng, et al. Research progress in plant responses and response mechanisms to sulfur dioxide stress [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2016, 43(11): 27-35
- [23] 佟继旭.二氧化硫防腐保鲜处理对红地球葡萄品质影响及风险评估的研究[D].北京:中国农业科学院,2018
TONG Jixu. Study on the effect of sulfur dioxide preservative treatment on red globe grape quality and risk assessment [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018
- [24] 王瑶,罗淑芬,胡花丽,等.外源 NO 处理对采后鲜莲子品质及乙烯代谢的影响[J].现代食品科技,2019,35(11):100-108
WANG Yao, LUO Shufen, HU Huali, et al. Effects of exogenous NO treatment on quality and ethylene metabolism of postharvest fresh lotus seeds [J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(11): 100-108
- [25] 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 Yuping, PENG Wenjuan, ZHANG Yu, et al. Effects of NO treatment on postharvest quality and phenyl propane metabolism of strawberry fruits [J]. Journal of Nuclear Agriculture, 2016, 30(10): 1959-1966
- [26] 朱树华,孙丽娜,周杰.一氧化氮对猕猴桃果实营养品质和活性氧代谢的影响[J].果树学报,2009,3:334-339
ZHU Shuhua, SUN Lina, ZHOU Jie. Effects of nitric oxide on nutritional quality and active oxygen metabolism of kiwi fruit [J]. Journal of Fruit Science, 2009, 3: 334-339
- [27] 蒲云峰,丁甜,钟建军,等.新疆 12 种干果的营养品质及抗氧化分析[J].中国食品学报,2019,19(5):287-294
PU Yunfeng, DING Tian, ZHONG Jianjun, et al. Nutritional quality and antioxidant analysis of 12 kinds of dried fruits in Xinjiang [J]. Chinese Journal of Food Science and Technology, 2019, 19(5): 287-294
- [28] Huang H, Guo S S, Chen L C, et al. Effects of exogenous hydrogen sulfide on the antioxidant characteristics of tea plant (*Camellia sinensis*) under salt stress [J]. Acta Plant Physiology, 2017, 53(3): 497-504
- [29] 韩占红,王斌,杨瑞瑞,等.一氧化氮处理对马铃薯采后块茎愈伤的促进及机制[J].食品科学,2020,41(21):222-229
HAN Zhanhong, WANG Bin, YANG Ruirui, et al. Effects of nitric oxide treatment on callus of postharvest potato tubers and its mechanism [J]. Food Science, 2020, 41(21): 222-229
- [30] A S C, Meltem Türkylmaz B, A M Z. Effects of sulfur dioxide concentration on organic acids and β -carotene in dried apricots during storage [J]. Food Chemistry, 2017, 221: 412-421
- [31] 汪荷澄,蒲云峰.二氧化硫抗氧化能力及其在干果中的含量分析[J].食品研究与开发,2019,40(2):22-26
WANG Hecheng, PU Yunfeng. The antioxidant capacity of sulfur dioxide and its content analysis in dried fruits [J]. Food Research and Development, 2019, 40(2): 22-26
- [32] DONG Jufang, ZHANG Ming, LU Li, et al. Nitric oxide fumigation stimulates flavonoid and phenolic accumulation and enhances antioxidant activity of mushroom [J]. Food Chemistry, 2012, 135(3): 1220-1225
- [33] Douglas Gonçalves Da Silva, Anaildes Lago De Carvalho. Development of an analytical method for determination of nitrate in leafy vegetables using ion chromatography [J]. Open Access Library Journal, 2019, 12(6): 1813-1822
- [34] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局.GB 2762-2017 食品中污染物限量[S]
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, State Food and Drug Administration. GB 2762-2017 Limits of Contaminants in Foods [S]
- [35] 孙宇杰,赵琳,王岁楼.枸杞类胡萝卜素的分离纯化及抗氧化活性研究[J].农产品加工,2020,516(22):10-13
SUN Yujie, ZHAO Lin, WANG Suilou. Isolation, purification and antioxidant activity of *Lycium barbarum* carotenoids [J]. Agricultural Products Processing, 2020, 516(22): 10-13
- [36] 崔宽波,范新光,杨忠强,等.近冰点贮藏对小白杏采后品质和抗氧化能力的影响[J].食品科学,2019,592(3):247-253
CUI Kuanbo, FAN Xinguang, YANG Zhongqiang, et al. Effects of storage near freezing point on the postharvest quality and antioxidant capacity of Xiaobai apricot [J]. Food Science, 2019, 592(3): 247-253