

doi:10.11707/j.1001-7488.20170904

振动胁迫对蓝莓果实品质和抗氧化酶活性的影响^{*}

许时星 邵海燕 陈杭君 韩 强

(浙江省农业科学院食品科学研究所 农业部果品产后处理重点实验室 浙江省果蔬保鲜与加工技术研究重点实验室
中国轻工业果蔬保鲜与加工重点实验室 杭州 310021)

摘 要: 【目的】研究物流运输过程中不同振动时间对蓝莓果实品质和抗氧化酶活性的影响,为其采后物流运输提供参考。【方法】以‘园蓝’蓝莓为试材,将预冷处理后的果实挑拣、分装,按冰果比 1.6:1 的比例装入泡沫包装箱中,密封。采用模拟运输的方法,将泡沫包装箱固定于运输振动试验台上,在 2.5 Hz 振动频率条件下进行不同时长(12、24、36 h)的振动处理,以 0 h 处理为对照组。模拟运输振动试验结束后,立即测定不同振动时间条件下蓝莓果实品质和抗氧化酶活性。同时将其余样品继续贮藏于(0±0.5)℃保鲜冰箱中,进行贮藏期试验,每 2 天取样。【结果】与对照组相比,振动胁迫明显加速了蓝莓果实商品性的丧失,加速果实贮藏期内好果率、硬度及维生素 C 含量的下降,促使花色苷、总酚含量达到峰值时间缩短,加快了相对电导率、丙二醛含量的上升速度,加剧细胞膜结构的破坏,促进 SOD 活性增大及 CAT、APX 等抗氧化酶活性峰值提前出现。贮藏过程中,对照组的好果率、硬度及电导率与振动处理 24 h、36 h 差异显著($P<0.05$),对照组、振动处理 12 h 蓝莓果实的维生素 C、TSS 含量与振动处理 36 h 呈显著性差异($P<0.05$)。而对照组与振动处理 12 h 在果实硬度、TSS 含量、Vc 含量及 SOD 酶活性方面变化差异不显著($P>0.05$)。而对照组与振动处理 12 h 在果实硬度、TSS 含量、Vc 含量及 SOD 酶活性方面变化差异不显著($P>0.05$),花色苷、总酚含量, CAT、APX 酶活性差异较小。【结论】运输振动对蓝莓品质的影响是逐渐累积的,物流运输过程振动时间越久对品质损伤越大,果实衰老进程越快。模拟物流运输时间在 12 h 以内,振动胁迫对蓝莓果实品质损伤较小,有利于保持果实贮藏期间的品质。

关键词: 蓝莓; 振动时间; 品质; 抗氧化酶

中图分类号: TS255.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-7488(2017)09-0026-09

Effect of Vibration on Shelf Quality and Antioxidant Enzyme Activity of Blueberries

Xu Shixing Gao Haiyan Chen Hangjun Han Qiang

(Institute of Food Science, Zhejiang Academy of Agricultural Science Key Laboratory of Post-Harvest Handling of Fruits, Ministry of Agriculture Key Laboratory of Fruits and Vegetables Postharvest and Processing Technology Research of Zhejiang Province Key Laboratory of Postharvest Preservation and Processing of Fruits and Vegetables, China National Light Industry Hangzhou 310021)

Abstract: 【Objective】Our purpose is to study the effect of different vibration durationon blueberries during the process of transportation, and provide scientific guidance for storage and logistics of blueberries. 【Method】In this paper, Gardenblue blueberries (*Vaccinium* spp.) was used as experimental material. The pre cooling-treated fruits wereselected, and packed with cool storage materialsina ratio of 1.6:1 (ice: fruit) and sealed in a foam box. The box was fixed on the transportation vibration test platform to simulate real transportationand treated with vibration for 12, 24 and 36 hours under the condition of 2.5 Hz frequency compared with vibration for 0 hours as the control. After treatment, some berries were selected and the fruit quality and antioxidant enzymes activity were measured, the other fruits were stored at (0±0.5)℃. The fruitswere sampledat 2-day intervals during storage. 【Result】The results showed that vibration significantly accelerated the loss of blueberry fruit commodity during transportation. Compared with the control group, vibration accelerated the decrease in rate of good fruit, fruit firmnessand vitamin C content, and shortened the time for anthocyanins and the total phenol content to reach their peak values. Meanwhile, the level of relative conductivity and malonaldehyde content were enhanced in the treated blueberries. The vibration treatment also promoted the SOD activity, and shortenedthe

收稿日期: 2017-03-14; 修回日期: 2017-07-17。
基金项目: 国家科技支撑计划课题(2015BAD16B06); 国家公益性行业(农业)科研专项(201303073); 国家自然科学基金项目(31501540); 浙江省公益技术研究农业项目(2014C32109)。
^{*} 陈杭君为通讯作者。

time for the antioxidant enzymes such as CAT and APX to reach the peak values. There were significant differences ($P < 0.05$) in fresh rate as well as fruit firmness and relative conductivity of blueberries between control group and treatments with vibration for 24 or 36 hours during storage. The levels of vitamin C and TSS in control and blueberries vibrated for 12 hours also showed significant differences ($P < 0.05$) from those of the fruit vibration-treated for 36 hours. However there was no significant difference in fruit firmness, the levels of vitamin C and TSS, as well as the SOD activity between the control group and the vibration for 12 hours. In addition, slight difference was observed in levels of total anthocyanins and phenolics and activities of CAT and APX. 【Conclusion】 Our results suggested that vibration could accelerate the process of fruit senescence of blueberries. The longer the vibration lasts during transportation, the greater damage could be caused for blueberries. Therefore, it is necessary to control the transport time within 12 hours for maintaining the quality of blueberries.

Key words: blueberry; vibration time; quality; antioxidant enzyme

蓝莓(*Vaccinium* spp.)为杜鹃花科(Ericaceae)越橘属(*Vaccinium*)多年生落叶灌木。我国原主要分布在长白山区、大小兴安岭等地,近年来发展较快,全国 20 余省份已有种植。蓝莓果肉细腻,甜酸适口,风味独特,营养丰富,被誉为“浆果之王”(郇海燕等, 2013)。蓝莓一般成熟于 5—8 月,此时正值高温多雨季节,不利于贮藏和运输,由于受到冷链运输条件的限制,鲜销多在产地附近,而远距离物流运输较难实现。随着互联网、O2O 等快速发展,蓝莓的电商销售模式为该产业的发展提供了一个良好的契机。

目前,对于果蔬振动损伤的研究主要基于模拟运输技术,振动胁迫引起果蔬机械损伤主要取决于振动频率,振动加速度以及振动时间 3 个因素。有研究表明,车辆在运输过程中自身的振动频率范围在 2 ~ 5 Hz 时具有较高的振动能量(周然等, 2007)。振动对果蔬的损伤不是在瞬时形成的,而是逐渐累积的。通常情况下,振动时间越长,果品之间碰撞的次数越多,损伤就越大。国内关于振动胁迫对果蔬损伤的研究较少。卢立新等(2009a)研究发现振动时间对梨(*Pyrus* spp.)果实损伤的影响大,不同包装方式条件下果品损伤随振动时间的变化不同。周然等(2007)研究发现运输振动胁迫加速了哈密瓜(*Cucumis melo* var. *saccharinus*)细胞的微观变化及细胞膜完整性的丧失,增加了果实呼吸作用,促进了果实衰老进程;潘俨等(2015)发现运输振动促进了新疆杏(*Prunus armeniaca*)呼吸峰值的提前出现和品质下降。蓝莓采用低温、气调、辐照、涂膜等方法延长保鲜期(Nunes *et al.*, 2004; Schotsmans *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2009; Duan *et al.*, 2011),但目前研究主要还集中在静态保鲜,而物流运输过程引起的振动胁迫对蓝莓果实品质的影响未见报道。本研究拟采用“蓄冷剂+保温减振包装”的模

式,通过模拟运输和贮藏试验,研究不同振动时间对蓝莓果实品质的影响,为蓝莓采用物流运输技术研发提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料及设备

供试材料采自浙江新昌兆丰生态园栽种的兔眼系列‘园蓝’品种蓝莓;包装箱采用邮政 4 号泡沫箱加厚(尺寸 27 cm × 15.5 cm × 13 cm,壁厚 3.5 cm,密度 20 kg),购自临浦泡塑工厂;蓄冷剂采用注水冰袋(200、400 g)。

试验设备:M/MN-100 型系列模拟运输振动实验台(睦尼实验设备有限公司);TA.XT.Plus 物性测定仪(英国 Stable Micro Systems 公司);Gintra404 紫外可见分光光度计(澳大利亚 GBC 公司);台式高速低温冷冻离心机(美国 Thermo 公司);PAL-1 型数显糖度计(日本 ATAGO 公司);Metrohm 877Titrino plus 自动滴定仪(瑞士万通公司)。

1.2 试验方法

蓝莓从果园采摘后迅速运送至实验室,挑拣大小均匀、成熟度一致、无腐烂、无机械损伤的果实进行分装,每盒(125 ± 5) g。在 5 ~ 7 °C 条件下冷库预冷 16 h。预冷处理后进行装箱,每箱 6 盒蓝莓和 1 200 g 冰袋,装箱后立即密封,固定于模拟运输振动试验台上,在 2.5 Hz 的振动频率下进行不同振动时间(0、12、24、36 h)的模拟运输试验。

模拟运输振动试验结束后,立即测定其品质指标和生理指标。同时将其余样品继续贮藏于(0 ± 0.5) °C 保鲜冰箱,进行贮藏试验,每 2 天取样 1 次,贮藏期为 8 天。

1.3 测定指标及其方法

1.3.1 好果率 果实出现明显的软化、软烂、表皮破损、发霉等均视为腐烂果。

好果率(%) = $\frac{\text{好果数}}{\text{每盒总果实数}} \times 100\%$ 。

1.3.2 硬度 每盒随机取 20 个蓝莓果实,采用 TA-XT plus 型质构仪(SMS. UK)测定果实最大直径处的硬度,探头直径为 2.0 mm,下降速度为 1.0 mm·s⁻¹,下压距离为 8.0 mm,触发力 5.0 g。测定结果取平均值,单位为 kg·cm⁻²。

1.3.3 可溶性固形物(TSS) 采用手持糖度仪测定。

1.3.4 可滴定酸(TA) 采用自动滴定仪测定。

1.3.5 维生素 C 含量 参考曹建康等(2007)测定方法,并稍作修改。取 2 g 左右蓝莓样品于研钵中,用液氮充分研磨成粉末后,准确称取 1.0 g 研磨样品置于离心管中,加入 5.0 mL 三氯乙酸溶液(浓度为 50 g·L⁻¹),8 000 r·min⁻¹,离心 10 min。取 0.5 mL 上清液于试管中,加入 1.5 mL 三氯乙酸,1 mL 无水乙醇,0.5 mL 磷酸-乙醇,1.0 mL 邻菲罗啉,0.5 mL 三氯化铁乙醇溶液,将其置于 30 ℃ 下反应 60 min。以加入酶液,蒸馏水代替邻菲罗啉-乙醇溶液的为参照。根据吸光度值,在标准曲线上查出相应的混合液中 Vc 质量,计算含量,Vc 单位为 mg·100 g⁻¹。

根据吸光度值,在标准曲线上查出相应的混合液中 Vc 质量,按下式计算蓝莓果实中抗坏血酸含量,以 100 g 样品(鲜质量)中含有的 Vc 质量表示,即 mg·100 g⁻¹。

1.3.6 果肉膜透性 用锋利刀片切取 1 mm 厚的薄片,共计 3.0 g,置于 25 mL 试管中,加入 25.0 mL 去离子水,在摇床上震荡 30 min 后,用电导率仪测定溶液电导率 P₁;测定电导率后,将溶液煮沸 10 min,冷却至室温,加水至原刻度,用电导率仪测定溶液电导率 P₂;测定去离子水电导率 P₀。按下式计算相对电导率,表示果肉膜透性。

$$P = \frac{P_1 - P_0}{P_2 - P_0} \times 100\%$$

1.3.7 丙二醛(MDA)含量 取 2 g 蓝莓样品于研钵中,用液氮充分研磨成粉末后,准确称取 1.0 g 研磨样品置于离心管中,加入 5.0 mL 100 g·L⁻¹ 的三氯乙酸溶液,于 4 ℃、10 000 r·min⁻¹ 下离心 20 min,取上清液,置于冰盒中备用。取 2.0 mL 上清液(对照空白管中加入 2.0 mL 100 g·L⁻¹ 的三氯乙酸溶液代替提取液),加入 2.0 mL 0.67% 的硫代巴比妥酸溶液,混合后在沸水中煮沸 20 min,取出后迅速用冷水冷却,在 4 ℃、10 000 r·min⁻¹ 下离心 20 min,分别测定上清液在 430、532、600 nm 波长处的吸光值。

1.3.8 花色苷含量 取 2 g 蓝莓样品于研钵中,用液氮充分研磨成粉末后,准确称取 1.0 g 研磨样品置于离心管中,加入 5.0 mL 预冷的提取液(75% 酸化乙醇),4 ℃ 暗室浸提 2 h,10 000 r·min⁻¹、4 ℃ 离心 20 min。收集上清液转移到干净的试管中,沉淀加入 5.0 mL 提取液,4 ℃ 暗室浸提 2 h,收集上清液,此过程重复 1 次。将所得的上清液合并,作为最后的测量体积。

花色苷总量的测定采用 pH 示差法,1.0 mL 的上清液分别与 4.0 mL 的 0.025 mol·L⁻¹ 氯化钾缓冲液(KCl-HCl,pH1.0)和 0.4 mol·L⁻¹ 醋酸钠缓冲液(pH4.5)混合均匀,蒸馏水作对照,用分光光度计分别测定 510 和 700 nm (校正浑浊度)处的吸光度。

1.3.9 总酚含量 采用福林酚法测定,参照李永强(2011)和李巨秀等(2009)方法,并稍作修改。取 2 g 蓝莓样品于研钵中,用液氮充分研磨成粉末后,准确称取 1.0 g 研磨样品置于离心管中,加入 5.0 mL 60% 乙醇浸提 2 h,于 10 000 r·min⁻¹ 条件下离心 20 min,取上清液 0.2 mL,放入 25 mL 具塞的试管,加入 2 mL 1.0 mol·L⁻¹ 福林酚试剂后摇匀,静置 5 min,分别加入 4 mL 7.5% Na₂CO₃,用蒸馏水定容至 25 mL,室温下在暗处放置 2 h,以不加没食子酸的样品为空白。于 760 nm 处测定其吸光度。

1.3.10 超氧化物歧化酶(SOD) 采用试剂盒测定,SOD 试剂盒购于南京建成生物工程研究所。

1.3.11 过氧化氢酶(CAT)活性 参考胡琼英等(2007)方法,并稍作修改。取 2 g 左右蓝莓样品于研钵中,用液氮充分研磨成粉末后,准确称取 1.0 g 研磨样品置于离心管中,加入 5.0 mL 0.1 mol·L⁻¹ Tris-HCl 缓冲液(pH7.8),冰浴提取 30 min,将上述提取液于 4 ℃、10 000 r·min⁻¹ 下冷冻离心 20 min,取上清液备用。反应液体系包含: 3 mL 0.1 mol·L⁻¹ Tris-HCl 缓冲液(pH7.8)、0.2 mL 上清酶液、0.4 mL H₂O₂ (0.75%)。加入反应液后迅速摇匀,立即测定其在 240 nm 处 3 min 内光吸收度值的变化。空白对照:以水代替上清酶液,其余不变。以 240 nm 处光吸收度值每分钟变化 0.01 表示 1 个酶活单位(U)。

1.3.12 抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性 参考曹建康等(2007)方法,并稍作修改。取 2 g 左右蓝莓样品于研钵中,用液氮充分研磨成粉末后,准确称取 1.0 g 研磨样品置于离心管中,加入 5.0 mL 0.1 mol·L⁻¹ 磷酸钾缓冲液(pH7.5),于 4 ℃、10 000 r·min⁻¹ 下离心 20 min,取上清液,置于冰盒中备用。取 0.1 mL 上清液,加入 2.6 mL 50 mmol·L⁻¹

磷酸钾缓冲液(pH 7.5),混匀。加入 0.3 mL 2 mmol·L⁻¹的 H₂O₂,立即测定反应体系在 290 nm 处 3 min 内光吸收度值的变化。以 290 nm 处光吸收度值每分钟变化 0.01 表示 1 个酶活单位(U)。

1.4 数据统计与分析

以平均值 ± 标准偏差表示测定结果;采用 Excel 2007 对数据进行作图,采用 SPSS17.0 对数据进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 振动时间对蓝莓好果率的影响

好果率是判断果实贮藏品质最直观的指标。由图 1 可知,相比于对照组,振动对蓝莓有累积损伤的效果,振动时间越久,好果率越低,振动 12 h 以上,好果率维持在 92% 左右,振动处理组与对照组好果率变化差异显著 ($P < 0.05$)。在振动后的贮藏期间,不同振动时间处理组的好果率均呈下降趋势,贮藏 8 天后,对照组好果率仍达到 98%,振动处理 12、24、36 h 的果实好果率仅为 81.34%、80.67% 以及 75.33%,表明振动时间越久,好果率下降越快,振动累积损伤越明显。

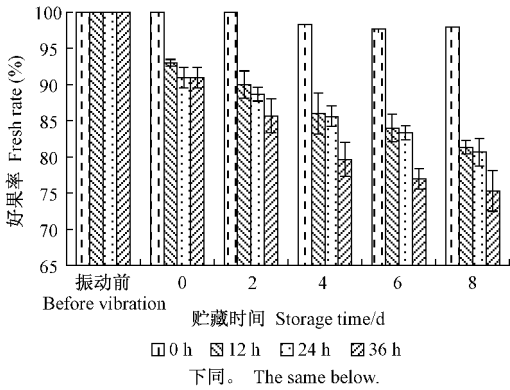


图1 振动时间对蓝莓好果率的影响
Fig.1 Effect of vibration time on fresh rate of blueberry

2.2 振动时间对蓝莓硬度的影响

由图 2 可知,振动处理 12、24、36 h,蓝莓果皮硬度分别下降了 0.15、0.22、0.33 kg·cm⁻²。振动时间越久,果实的硬度下降越大。在贮藏期间,对照组和振动 12 h 的处理组,硬度下降较其他处理组缓慢,对照组与振动处理 24、36 h 硬度下降差异极显著 ($P < 0.01$),振动处理 12 h 与 36 h 硬度下降差异显著 ($P < 0.05$)。在贮藏末期,振动处理 12、24、36 h 果皮硬度分别是对照组的 94.93%、87.76%、84.52%。由此可知,为了保持果实的原有品质,应尽量缩短果实运输及振动的时间。

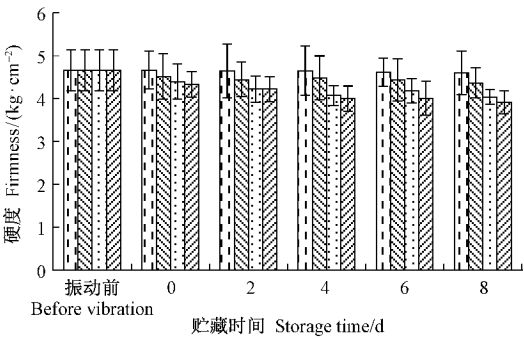


图2 振动时间对蓝莓硬度的影响
Fig.2 Effect of vibration time on firmness of blueberry

2.3 振动时间对蓝莓可溶性固形物、可滴定酸含量的影响

可溶性固形物(TSS)含量的变化,一方面由于大分子物质的降解,另一方面作为呼吸底物被消耗。由图 3A 可知,蓝莓振动前 TSS 含量为 16.5%,振动处理促进了 TSS 含量上升,振动时间越久,上升越大。在贮藏期间 TSS 含量呈持续上升趋势,对照组与振动处理 12 h 上升趋势差异不显著 ($P > 0.05$),而与振动处理 24 h、36 h 上升趋势差异显著 ($P < 0.05$);贮藏 2 天后,振动处理 12 h 和 24 h 上升趋势差异显著 ($P < 0.05$),说明振动时间大于 12 h 对 TSS 含量变化影响较大。在贮藏末期,对照组与振动 12、24、36 h 的处理组的 TSS 含量分别为 16.7%、17.15%、17.35%、17.4%,表明振动处理能有效增大果实的 TSS 含量,这与刘峰娟等(2011)的研究结果一致。

可滴定酸含量关系到果实的口感,蓝莓果实在贮藏过程中,有机酸被果实呼吸作用消耗(吴主莲等,2012),从而转化为单糖。由图 3B 可知,振动处理加速了可滴定酸含量的下降,振动时间越久,可滴定酸含量下降幅度越大,振动结束时,对照组及振动处理 12、24、36 h 组的可滴定酸含量分别从振动前的 0.27% 下降为 0.26%、0.22%、0.22%、0.19%。在贮藏期间,果实可滴定酸含量呈下降趋势,贮藏 8 天后,对照组及振动处理 12、24、36 h 组的可滴定酸含量分别为 0.16%、0.15%、0.14%、0.12%。

2.4 振动时间对蓝莓维生素 C 含量的影响

由图 4 可知,经振动处理 12、24、36 h,蓝莓的 Vc 含量由初始的 111.61 mg·100 g⁻¹ 分别下降了 2.2、6.08 以及 11.26 mg·100 g⁻¹,表明振动处理加快了 Vc 的分解。振动时间越久,贮藏期间 Vc 含量下降也越快,对照组、振动处理 12 h 组与振动处理 36 h 组 Vc 下降变化差异显著 ($P < 0.05$)。振动处

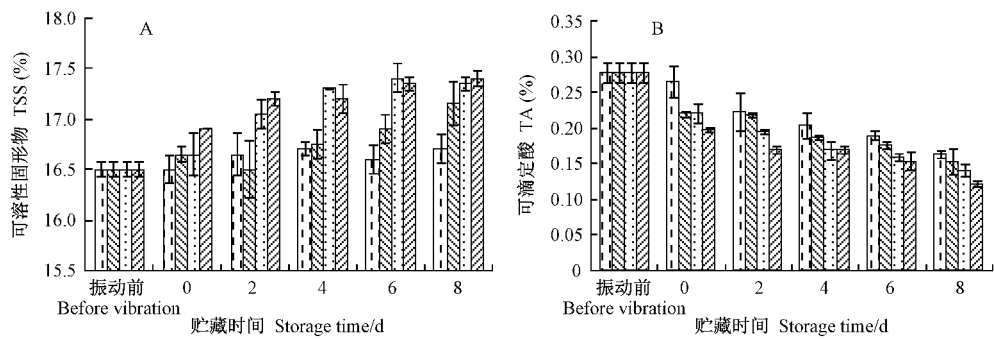


图3 振动时间对蓝莓可溶性固形物、可滴定酸含量的影响

Fig.3 Effect of vibration time on total soluble solids (TSS) and titratable acid (TA) of blueberry

A. 可溶性固形物 TSS; B. 可滴定酸 TA

理 12、24、36 h, 贮藏末期 Vc 含量分别仅为 94.91、89.06 和 82.64 mg·100 g⁻¹, 是对照组的 93.98%、88.19%、81.83%。

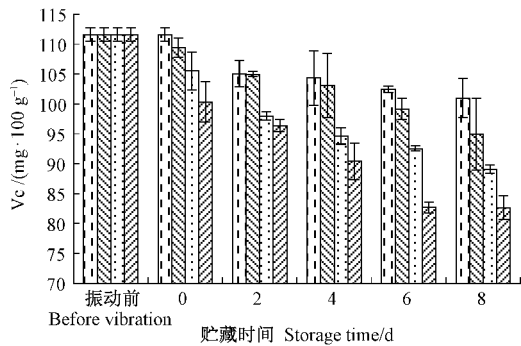


图4 振动时间对蓝莓维生素 C 含量的影响

Fig.4 Effect of vibration time on vitamin C (Vc) content of blueberry

2.5 振动时间对蓝莓电导率、丙二醛含量的影响

电导率反映果肉膜的透性, 果肉膜透性与果实衰老相关 (纪淑娟等, 2014)。由图 5A 可知, 在振动胁迫的作用下, 各处理的电导率呈上升趋势, 振动时间越久, 电导率上升越快, 表明振动加速了细胞内

与振动处理 12、24、36 h 上升趋势差异显著 ($P<0.05$)。到贮藏末期, 对照组的电导率为 50.50%, 而振动处理 36 h 的电导率达到 71.68%, 是对照组的 1.42 倍, 振动处理 12、24 h 的电导率分别为 60.69%、61.68%, 是对照组的 1.22 倍, 表明振动处理促使果肉膜透性增加。

由活性氧自由基引发的膜脂过氧化反应不但对膜的结构和功能造成伤害, 其反应产物也会去攻击膜、核酸、蛋白质等大分子物质, 使膜结构遭到破坏, 透性增加, 丙二醛 (MDA) 含量可反应膜脂过氧化的程度 (周倩等, 2014)。由图 5B 可知, 振动时间越久, MDA 含量越高, 振动处理 12、24、36 h, MDA 含量分别增加了 13.82%、27.97%、52.29%。在贮藏期间, MDA 含量呈逐渐上升趋势, 在贮藏末期, 振动处理 12、24、36 h, MDA 含量分别是对照组的 1.12、1.35、1.53 倍, 表明振动时间越久对蓝莓细胞膜结构的损害越大。

2.6 振动时间对蓝莓花色苷、总酚含量的影响

振动前蓝莓花色苷和总酚含量分别为 180.83 和 5.06 mg·g⁻¹, 在贮藏过程中呈先上升后下降的趋势。由图 6A 可知, 振动处理使得花色苷含量增高, 振动处理 12、24、36 h, 花色苷含量分别上升了

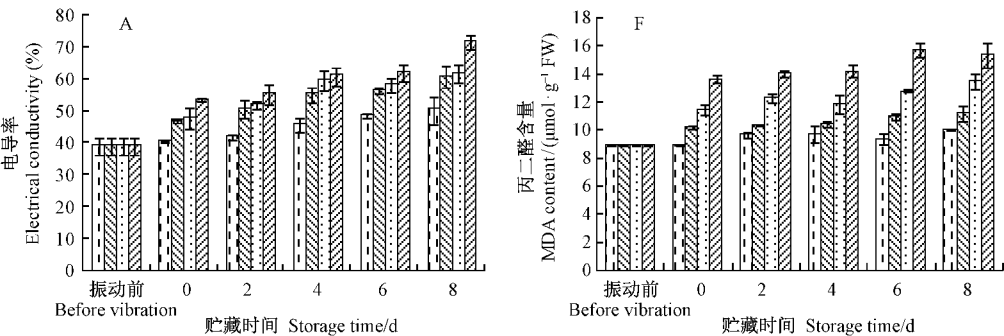
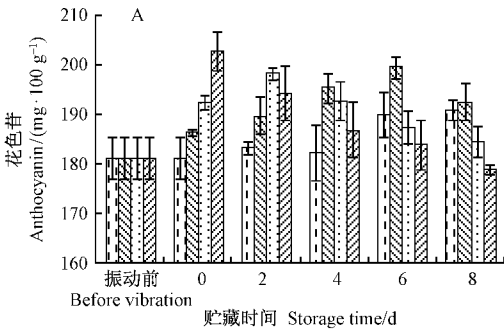


图5 振动时间对蓝莓电导率和丙二醛含量的影响

Fig.5 Effect of vibration time on electrical conductivity and malonaldehyde (MDA) of blueberry

A. 电导率 Electrical conductivity; B. 丙二醛含量 MDA content

5.26、11.23 和 21.63 $\text{mg}\cdot 100\text{ g}^{-1}$ 。振动时间越久，花色苷含量上升越多，振动处理结束后，振动处理 36 h 组花色苷含量显著高于其他处理组 ($P < 0.05$)。在贮藏期间，对照组花色苷含量逐渐上升，而不同时间的处理组，花色苷含量呈先上升后下降的趋势。振动处理 12、24、36 h 分别在贮藏第 6、2、0 天花色苷含量达到峰值。表明振动处理能够促进花色苷含量的增加，提早花色苷含量峰值的出



现，且振动时间越久，花色苷含量达到峰值所需时间越短。由图 6B 可知，总酚含量的变化趋势和花色苷相似，振动时间越久，总酚含量上升越大，振动处理 36 h，总酚含量为 5.68 $\text{mg}\cdot \text{g}^{-1}$ ，是处理前的 1.12 倍，与其他处理组差异极显著 ($P < 0.01$)。在贮藏期间，总酚含量呈先上升后下降的趋势，振动处理能提早总酚含量峰值的到来，促进了果实衰老和营养流失。

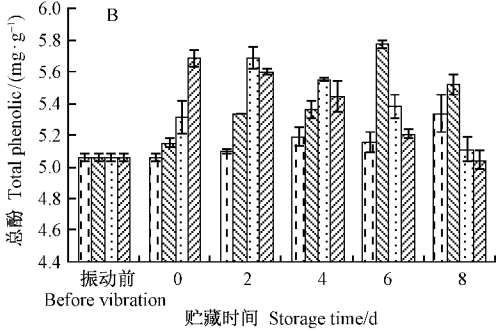


图 6 振动时间对蓝莓花色苷和总酚含量的影响

Fig. 6 Effect of vibration time on anthocyanin and total phenolic contents of blueberry

A. 花色苷含量 Anthocyanin content; B. 总酚含量 Total phenolic content

2.7 振动时间对蓝莓超氧化物歧化酶活性的影响

超氧化物歧化酶(SOD)是果实后熟衰老过程中的保护性酶类,它可以特异地清除超氧阴离子自由基,从而减少自由基对膜的损伤,达到延缓细胞衰老的目的(陈杭君等, 2013)。由图 7 可知,振动处理促进蓝莓 SOD 酶活性增大,振动处理 12、24、36 h,酶活性相比于对照组分别上升了 5.03%、8.89%、12.51%,达到 30.03、31.13、32.17 $\text{U}\cdot \text{min}^{-1}\text{mg}^{-1}\text{FW}$,这可能是由于振动时间越久,超氧阴离子自由基产生越多,诱导了 SOD 酶活性的增大。在贮藏期间,SOD 酶的活性呈上升趋势,可能是果实在衰老过程中,不断产生超氧阴离子自由基,从而诱导 SOD 酶活性的上升。振动时间越久,对果实损伤越大,其衰老过程越快,对照组与振动处理 24 h 组 SOD 上升趋势差异显著 ($P < 0.05$),与振动处理 36 h 组差异极显著 ($P < 0.01$)。

2.8 振动时间对蓝莓过氧化氢酶活性的影响

过氧化氢酶(CAT)是果实后熟衰老过程中的另一种保护性酶类,它可以清除 H_2O_2 ,从而减少对膜的损伤,达到延缓细胞衰老的目的。由图 8 可知,振动处理促进了 CAT 酶活性的上升,振动时间越久,CAT 酶活性越大,振动处理 36 h 后酶活性为 550.5 $\text{U}\cdot \text{min}^{-1}\text{mg}^{-1}\text{FW}$,是处理前的 1.48 倍,与对照组、振动处理 12 h 组酶活性差异极显著 ($P < 0.01$),这可能是振动促进了 H_2O_2 积累,从而诱导

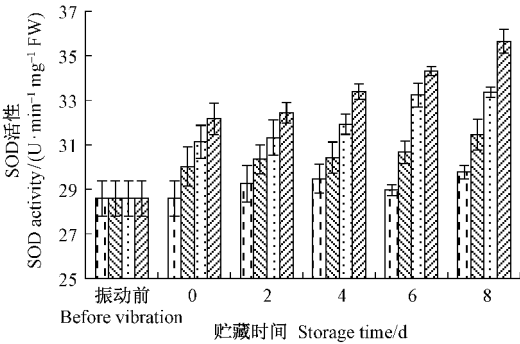


图 7 振动时间对蓝莓超氧化物歧化酶活性的影响

Fig. 7 Effect of vibration time on superoxide dismutase (SOD) activity of blueberry

CAT 酶活性增大。在贮藏期间,CAT 酶活性呈先上升后下降的趋势,振动处理 12、24、36 h,分别在贮藏第 6、2、0 天活性达到峰值,表明振动时间越久 H_2O_2 积累越多,当积累量达到一定程度未及时清除,就有可能抑制 CAT 酶的活性。

2.9 振动时间对抗坏血酸过氧化物酶活性的影响

抗坏血酸过氧化物酶(APX)是存在于果实当中一种专一性很强的过氧化物酶,能催化抗坏血酸与 H_2O_2 发生氧化还原反应,达到清除 H_2O_2 的目的。由图 9 可知,振动处理促进了 APX 酶活性的上升,振动时间越长酶活性越大,振动处理 36 h,酶活性为 490 $\text{U}\cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$,是处理前的 1.4 倍,与对照组差异显著 ($P < 0.05$)。在整个贮藏期间,不同时间处

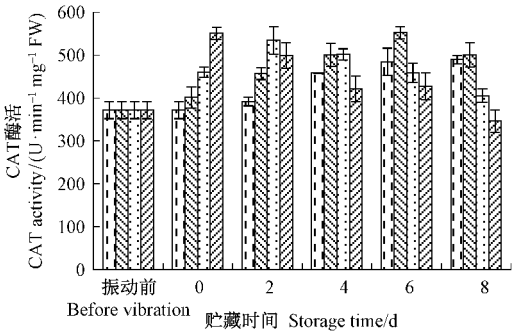


图 8 振动时间与过氧化氢酶活性的影响
Fig. 8 Effect of vibration time on catalase
(CAT) activity of blueberry

理组的 APX 酶活性呈先上升后下降的趋势,对照组酶活性一直处于上升趋势,贮藏第 2 天,振动处理 36 h 组酶活性达到峰值,与对照组、振动处理 12 h 组差异显著 ($P < 0.05$)。振动处理 12 及 24 h, APX 酶活性分别在贮藏第 6 和第 4 天达到峰值,为 490 和 525 $\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$ 。

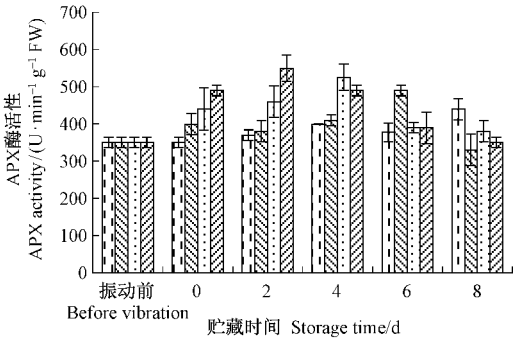


图 9 振动时间对蓝莓抗坏血酸过氧化物酶活性的影响
Fig. 9 Effect of vibration time on ascorbate peroxidase (APX) activity of blueberry

3 讨论

振动处理对蓝莓果实品质有明显的影响,主要表现在果实好果率和硬度下降,可溶性固形物含量增加,电导率上升,果肉膜透性增大,同时出现软化等现象。随着振动处理时间增加,果实好果率逐渐下降,振动处理 36 h,贮藏末期好果率仅为 75.33%,与对照组相差 23.33%。果实硬度受振动的影响,不仅表现出瞬时损伤,还有延时损伤(卢立新等, 2004; 2009b),在整个贮藏期间,硬度呈下降趋势,振动处理 36 h 后,果实硬度为 $4.33 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$,比对照组降低了 $0.33 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$,贮藏末期硬度仅为 $3.89 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。果实电导率反应了果肉膜透性,随振动时间延长总体呈上升趋势,表明果肉膜透性逐渐增大,振动处理 36 h 电导率为 53.58%,是对照组

的 1.32 倍,到贮藏末期,电导率达 71.68%。蓝莓果实可溶性固形物含量增加,这可能是振动处理加速了果实的衰老进程,果实内的果胶、多糖等大分子物质水解为单糖,因此可溶性固形物的含量逐渐增加(刘萌等, 2013)。Vc 含量作为果实营养品质和贮藏效果的评价指标之一,在贮藏过程中呈下降趋势(于继男等, 2014),振动处理加快了蓝莓果实中 Vc 的分解速率,振动时间越久 Vc 含量下降越快,振动处理 36 h,贮藏末期 Vc 含量仅为对照组的 81.83%。

振动处理对蓝莓抗氧化活性的影响,主要表现在果实中活性成分及抗氧化酶活的变化。本试验中花色苷和总酚的含量受振动时间的影响,呈不同程度的上升,振动时间越久,上升幅度越大。在贮藏过程中,振动处理 12、24、36 h,花色苷和总酚含量分别在贮藏第 6、2、0 天达到峰值,振动时间越久峰值出现越早,可见振动处理促进了花色苷等酚类抗氧化物质含量的峰值提前到达,这与 Zheng 等(2003)、王芳等(2011)的研究结果相似,这可能是细胞内的多糖逐渐转化为单糖,而下表皮细胞在相应酶的作用下生成花青素,与单糖在花青素合成酶的作用下合成花色苷,使得花色苷的含量上升(陈敏等, 2013),振动时间越久,多糖转化为单糖的量越大,生成的花色苷量越大,在后期贮藏过程中,随着果实的衰老进程,花色苷合成代谢减弱,分解代谢加快,花色苷含量逐渐降低。抗氧化酶包括 SOD、CAT、APX 等, SOD 具有特异性的将超氧阴离子分解为 H_2O_2 的作用, H_2O_2 在 CAT 酶的作用下,分解为 H_2O 和 O_2 , APX 能催化抗坏血酸与 H_2O_2 发生氧化还原反应,从而清除 H_2O_2 。在贮藏期间,活性氧代谢的失调,超氧阴离子、过氧化氢等自由基的不断产生并积累,诱导 SOD 酶活性呈上升趋势。 H_2O_2 的积累诱导 CAT 和 APX 酶活性上升,同时也促使了花色苷等酚类抗氧化物质含量的升高。到贮藏后期,随着 H_2O_2 积累量的增大,自由基对细胞的损伤达到一定程度时,过多的自由基抑制 CAT 和 APX 酶的活性,从而出现 CAT 和 APX 酶活性逐渐下降的现象(Lee *et al.*, 2000)。

4 结论

不同振动时间处理对蓝莓果实品质和抗氧化活性具有显著的影响,振动对蓝莓采后衰老的影响是逐渐累积的,振动时间越久,伤害越大,果实衰老越快,贮藏期间,振动处理 12 h 与对照组在果实硬度、TSS 含量、Vc 含量及 SOD 酶活性方面变化差异不显

著 ($P > 0.05$)，花色苷、总酚含量，CAT、APX 酶活性差异较小，由此可推断，蓝莓采摘之后可耐受 12 h 左右的模拟运输并且品质损伤较小，物流运输时间过长会缩短果实的贮藏期。为了尽可能的保持蓝莓果实原有品质，应尽量缩短物流时间，并采用必要的减振包装措施，减少振动对果实的损伤。

参 考 文 献

陈杭君, 王翠红, 郇海燕, 等. 2013. 不同包装方法对蓝莓采后贮藏品质和抗氧化活性的影响. 中国农业科学, 46 (6): 1230 – 1236.

(Chen H J, Wang C H, Gao H Y, *et al.* 2013. Effect of packaging on the postharvest quality and the antioxidant activity of blueberry. Scientia Agricultura Sinica, 46 (6): 1230 – 1236. [in Chinese])

曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 2007. 果蔬采后生理生化实验指导. 北京: 中国轻工业出版社.

(Cao J K, Jiang W B, Zhao Y M. 2007. Physiological and biochemical experimental guidance of postharvest fruits and vegetables. Beijing: China Light Industry Press. [in Chinese])

陈 敏, 杨 清. 2013. 马铃薯花色苷生物合成与调控研究进展. 中国马铃薯, 4 (27): 232 – 238.

(Chen M, Yang Q. 2013. Research advance on potato anthocyanins. Chinese Potato Journal, 4 (27): 232 ~ 238. [in Chinese])

郇海燕, 徐 龙, 陈杭君, 等. 2013. 蓝莓采后品质调控和抗氧化研究进展. 中国食品学报, 13 (6): 1 – 8.

(Gao H Y, Xu L, Chen H J, *et al.* 2013. Research progress on postharvest quality control and antioxidant activity of blueberries. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 13 (6): 1 – 8. [in Chinese])

胡琼英, 狄 浏. 2007. 生物化学实验. 北京: 化学工业出版社.

(Hu Q Y, Di L. 2007. Biochemistry Experiment. Beijing: Chemical Industry Press. [in Chinese])

纪淑娟, 周 倩, 马 超, 等. 2014. 1 – MCP 处理对蓝莓常温货架品质变化的影响. 食品科学, 35 (2): 322 – 327.

(Ji S J, Zhou Q, Ma C, *et al.* 2014. Effect of 1-MCP treatment on quality changes of blueberry at room temperature. Food Science, 35 (2): 322 – 327. [in Chinese])

刘峰娟, 秦宗权, 沈艾彬, 等. 2011. 振动胁迫对杏果实品质的影响. 食品科学, 32 (10): 266 – 270.

(Liu F J, Qin Z Q, Shen A B, *et al.* 2011. Effect of mechanical vibration stress on the quality of apricot fruits. Food Science, 32 (10): 266 – 270. [in Chinese])

李巨秀, 王柏玉. 2009. 福林 – 酚比色法测定桑椹中总多酚. 食品科学, 30 (18): 292 – 295.

(Li J X, Wang B Y. 2009. Folin-ciocalteu colorimetric determination of total polyphenols in mulberry fruits. Food Science, 30 (18): 292 – 295. [in Chinese])

刘 萌, 范新光, 王美兰, 等. 2013. 不同包装方法对蓝莓采后生理及贮藏效果的影响. 食品科学, 34 (14): 346 – 350.

(Liu M, Fan X G, Wang M L, *et al.* 2013. Influence of different packaging methods on physiological properties of blueberry during postharvest storage. Food Science, 34 (14): 346 – 350. [in

Chinese])

卢立新, 黄祥飞, 华 岩. 2009a. 基于模拟运输条件的梨果实包装振动损伤研究. 农业工程学报, 25 (6): 110 – 114.

(Lu L X, Huang X F, Hua Y. 2009a. Effect of packaging methods on vibration bruising of pear fruits by simulated transport tests. Transactions of the CSAE, 25 (6): 110 – 114. [in Chinese])

卢立新, 王志伟. 2004. 果品运输中的机械损伤机理及减损包装研究进展. 包装工程, 24 (4): 131 – 134, 141.

(Lu L X, Wang Z W. 2004. Study of mechanisms of mechanical damage and transport packaging in fruits transportation. Packaging Engineering, 24 (4): 131 – 134, 141. [in Chinese])

卢立新, 周德志. 2009b. 基于疲劳损伤理论的果品振动损伤模型表征. 农业工程学报, 25 (11): 341 – 344.

(Lu L X, Zhou D Z. 2009b. Model for vibration-cumulative bruising of fruit based on fatigue damage theory. Transactions of the CSAE, 2009, 25 (11): 341 – 344. [in Chinese])

李永强, 杨士花, 高 斌, 等. 2011. 黄酮对杨梅花色苷的辅色作用. 食品科学, 32 (13): 37 – 39.

(Li Y Q, Yang S H, Gao B, *et al.* 2011. Co-pigmentation effect and color stability of flavonoids on red dayberry (*Myrica rubra* Sieb. et Zucc) Anthocyanins. Food Science, 32 (13): 37 – 39. [in Chinese])

潘 俨, 车凤斌, 董成虎, 等. 2015. 模拟运输振动对新疆杏呼吸途径和品质的影响. 农业工程学报, 31 (3): 325 – 331.

(Pan Y, Che F B, Dong C H, *et al.* 2015. Effects of simulated transport vibration on respiratory pathways and qualities of Xinjiang apricot fruit. Transactions of the CSAE, 31 (3): 325 – 331. [in Chinese])

王 芳, 刘 华, 陈文荣, 等. 2011. 贮藏温度对蓝莓活性成分及抗氧化活性的影响. 宁夏大学学报, 32 (2): 172 – 175.

(Wang F, Liu H, Chen W R, *et al.* 2011. Effects of storage temperature on the blueberry active ingredient and antioxidant activity. Journal of Ningxia University, 32 (2): 172 – 175. [in Chinese])

吴主莲, 周会玲, 任小林, 等. 2012. 不同机械伤对苹果果实贮藏效果的影响. 西北农林科技大学学报, 40 (1): 190 – 196.

(Wu Z L, Zhou H L, Ren X L, *et al.* 2012. Effect of different mechanical damages on storage result of apple. Journal of Northwest A & F University, 40 (1): 190 – 196. [in Chinese])

于继男, 薛 璐, 鲁晓翔, 等. 2014. 温度驯化对蓝莓冰温贮藏期间生理品质变化的影响. 食品科学, 35 (22): 265 – 269.

(Yu J N, Xue L, Lu X X, *et al.* 2014. Effect of cold acclimation on quality of blueberry fruits during ice-temperature storage. Food Science, 2014, 35 (22): 265 – 269. [in Chinese])

周 倩. 2014. 冷藏蓝莓果蒂凹陷的发生机理及控制技术研究. 沈阳: 沈阳农业大学博士学位论文.

(Zhou Q. 2014. Research on the mechanism and control technology of pedicel pitting development of blueberry fruit under cold storage. Shenyang: PhD thesis of Shenyang Agricultural University. [in Chinese])

周 然, 李云飞. 2007. 不同强度的运输振动对黄花梨的机械损伤及贮藏品质的影响. 农业工程学报, 23 (11): 255 – 259.

(Zhou R, Li Y F. 2007. Effects of different strengthes of transport

vibration on mechanical damage and storage quality of Huanghua pears (*Pyrus pyrifolia* Nakai, cv. Huanghua). Transactions of the CSAE, 23 (11) : 255 – 259. [in Chinese])

周 然, 苏树强, 李云飞. 2007. 果蔬运输振动频谱检测分析及对水果损伤的研究. 包装工程, 28 (10) : 76 – 79.

(Zhou R, Su S Q, Li Y F. 2007. Analysis of truck vibration and damage to Huanghua pears during transport. Packaging Engineering, 28 (10) : 76 – 79. [in Chinese])

Duan J Y, Wu R Y, Zhao Y Y, *et al.* 2011. Effect of edible coatings on the quality of fresh blueberries (Duke and Elliott) under commercial storage conditions. Postharvest Biology and Technology, 59 : 71 – 79.

Lee S K, Kader A A. 2000. Preharvest and postharvest factors influencing vitamin C content of horticultural crops. Postharvest Biology and Technology, 20 (3) : 207 – 220.

Nunes M C, Emond J P, Brecht J K. 2004. Quality curves for high bush blueberries as a function of the storage temperature. Small Fruits Review, 3 (3 /4) : 423 – 438.

Schotsmans W, Molan A, Mac K B. 2007. Controlled atmosphere storage of rabbiteye blueberries enhances postharvest quality aspects. Postharvest Biology and Technology, 44 (3) : 277 – 285.

Wang C Y, Chen C T, Wang S Y. 2009. Changes of flavonoid content and antioxidant capacity in blueberries after illumination with UV-C. Food Chemistry, 117 (3) : 426 – 431.

Zheng Y, H, Wang C Y, Wang S Y, *et al.* 2003. Effect of high-oxygen atmospheres on blueberry phenolics, anthocyanins, and antioxidant capacity. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 51 (24) : 7162 – 7169.

(责任编辑 王艳娜)