

低温流通过程中温度波动及 LED 蓝光对蓝莓品质的影响

袁迪, 李洋*, 陈丰, 李国庆, 张欣硕
(东北林业大学 哈尔滨 150040)

摘要 为研究温度波动及 LED 蓝光对蓝莓低温流通过程中品质的影响,以黑暗处理为对照组,在 LED 蓝光条件下,设计波动次数为无波动,1,2 次和 3 次以及不同断链时间(25,55 min 和 3 h)的温度波动处理组,比较分析冷断链时间下,温度波动对蓝莓品质指标和相关氧化酶的影响。结果表明:温度波动处理使蓝莓在贮藏期间的品质不断下降,相比于无波动组,波动 3 次处理的蓝莓在 15 d 时,硬度明显下降,可滴定酸、维生素 C 和花青素含量分别减少了 60.49%,71.82%,42.27%,PPO、POD 活性有所上升。与黑暗对照组相比,LED 蓝光处理可有效延缓蓝莓营养物质的降解。此外,蓝莓对断链时间的忍耐程度各不相同,其品质下降的速率为:断链 3 h > 断链 55 min > 断链 25 min。各指标间的相关性分析表明,硬度、维生素 C 和花青素呈显著相关($P < 0.05$),可用于评价蓝莓在低温流通过程的品质变化。结论:温度波动加剧了蓝莓果实品质劣变和营养成分流失,在尽量避免剧烈温度波动的同时,可考虑使用 LED 蓝光辐照,以改善蓝莓在流通过程中因温度波动而导致的品质下降。

关键词 温度波动; LED 蓝光; 低温流通; 蓝莓; 品质

文章编号 1009-7848(2024)10-0337-09 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.10.031

蓝莓是一种典型的呼吸跃变型水果,原产于北美,因口感酸甜、营养丰富、药用价值高等优点而广受消费者的喜爱。采摘后的蓝莓生理代谢过程较为旺盛,易出现软化、腐烂变质等现象^[1-2]。流通运输过程中 0~4 °C 的低温贮藏可有效抑制蓝莓的呼吸代谢,延缓衰老,保持其原有品质。然而,在蓝莓低温运输与贮藏过程中,温度波动会刺激果实氧化酶活性,导致营养成分流失,加速衰老^[3],对蓝莓品质造成负面影响。

目前,国内外学者对低温流通期间温度波动对采后果蔬品质的影响做了大量研究。Vicent 等^[4]研究发现,温度波动对冷藏期间苹果皮层组织、汁液流失和颜色褐变方面均产生不利影响。张瑞等^[5]探究 3 个温度波动(0±0.1), (0±0.5), (0±1) °C 对采后灵武长枣贮藏品质的影响,结果发现较小的温度波动最能保持原有感官品质,抑制维生素 C 的降解。Xu 等^[6]研究表明,温度波动改变了冷藏芹菜的相/状态,进而破坏了芹菜的组织结构,颜色与质地品质受损。刘慧等^[7]模拟冷断链过程中桃子果实硬度和糖酸品质的变化,结果发现与冷链和常

温流通方式相比,断链引起的温度波动显著降低了桃果实的硬度、细胞壁果胶和蔗糖含量。类似研究还集中在番茄^[8]、芒果^[9]、西兰花^[10]等果蔬方面。

LED 蓝光作为果蔬贮藏过程中一种常见的物理保鲜手段,已被证实能维持果实采后感官品质和营养价值方面有显著作用^[11-13]。目前,关于对蓝莓在流通过程中新鲜度及调控方式的研究较为广泛,而 LED 光照处理结合不同断链时间的温度波动对蓝莓品质的影响研究还较少,这方面研究对蓝莓鲜果后续品质的保持具有重要意义。

本研究设计蓝莓在 LED 蓝光照射下,不同断链时间(25,55 min 和 3 h)及温度波动次数试验,探明低温流通期间,温度波动对蓝莓硬度、可溶性固形物、可滴定酸、维生素 C、花青素和相关氧化酶活性等指标的影响,为减少和调控蓝莓贮藏过程中因温度波动而带来的品质下降提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜蓝莓采购于哈尔滨当地超市,品种为“蓝丰”,选取大小一致、表面无病虫害、无机械损伤的蓝莓果实,用厚度为 0.2 mm 的聚乙烯薄膜覆于表面,对薄膜做打孔处理置于 PET 塑料包装盒中,运

收稿日期: 2023-10-20

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(LH2021C016)

第一作者: 袁迪,男,硕士生

通信作者: 李洋 E-mail: 378918917@qq.com

回实验室保存。

氢氧化钠、碘化钾、聚乙二醇、聚乙烯吡咯烷酮、愈创木酚溶液、邻苯二酚均为分析纯级,苏州旭凡生物科技有限公司;甲醇、乙酸-乙酸钠缓冲溶液(pH 5.5),广州检测科技有限公司;三氯乙酸、硫代巴比妥酸,天津光富精细化工研究所。

1.2 设备与仪器

TGL-20B 离心机,上海安亭科学仪器厂;L5S 紫外可见分光光度计,上海精密科学仪器有限公司;FA2004B 电子分析天平,上海舜宇恒平科学仪

器有限公司;Master RI 手持式折光仪,上海仪电分析仪器有限公司;DPP800W 探针式温度传感器,深圳益欧科技有限公司;CT3-10K 质构仪,美国 Brook filed 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 低温流通过程试验设计 根据蓝莓升温曲线,设定温度波动时长,即不同断链时间(25,55 min,3 h),将 LED 蓝光冷藏处理分为 4 组,每隔 3 d 测定品质指标,直至第 15 天贮藏结束,黑暗冷藏处理为对照组。试验设计方案如表 1 所示。

表 1 蓝莓低温流通过程试验方案设计

Table 1 Experimental design of low-temperature circulation process of blueberry

组别	编号	处理方法
黑暗组	CK1	全程冷链贮藏,不做断链处理
	A1	第 6 天开始,断链时间为 25 min,每隔 3 d 断链 1 次,测定其指标
	A2	断链时间为 55 min,其它处理方式同 A1
	A3	断链时间为 3 h,其它处理方式同 A1
LED 蓝光组	CK2	同 CK1
	B1	同 A1
	B2	同 A2
	B3	同 A3

1.3.2 硬度的测定 参考张哲等^[14]的方法并稍作修改,采用 CT3-10K 质构仪测定。参数设定为:2 mm 圆柱形探针,测试前、中、后速度分别为 3,2,2 mm/s,形变量 15%,循环 3 次,结果取平均值。

1.3.3 可溶性固形物的测定 参考李洋等^[15]的方法,取 5 g 蓝莓果肉研磨均匀,经高速离心(12 000 r/min,10 min)处理后,取汁液置于折光仪测定,重复 3 次,取平均值。

1.3.4 可滴定酸的测定 采用酸碱滴定法测定^[16-17]。

1.3.5 维生素 C 的测定 参考《食品中抗坏血酸的测定》(GB/T 5009.38-2016)中 2,6-二氯靛酚滴定法测定。

1.3.6 花青素的测定 采用 pH 示差法^[18]测定花青素含量,取 2.0 g 果肉组织与酸化甲醇(0.1% HCl)混合研磨,离心(10 000 r/min,20 min)后取上清液,分别加入氯化钾缓冲液(pH 1.0)和醋酸钠缓冲液(pH 4.5)混合摇匀,使用分光光度计测定其在波长 510 nm 和 700 nm 处的吸光度,花青素含量用下式表示:

$$\text{花青素含量(mg/100g)} = \frac{A \times M_w \times DF \times V \times 100}{\varepsilon \times d \times m} \quad (1)$$

$$A = (A_{510} - A_{700})_{\text{pH}1.0} - (A_{510} - A_{700})_{\text{pH}4.5} \quad (2)$$

式中: M_w 为矢车菊素-3-葡萄糖苷当量,449.2 g/mol;DF 为稀释倍数; V 为提取液体积,mL; ε 为矢车菊素-3-葡萄糖苷的摩尔消光度,26 900; m 为样品质量,g。

1.3.7 氧化酶活性的测定 多酚氧化酶(PPO)的测定参考章宁瑛等^[19]的方法,将 5 g 果实组织样品与提取缓冲液研磨,12 000 r/min 离心 30 min,取上清液与 1 mL 邻苯二酚溶液混合,测定 6 min 内反应液在波长 420 nm 处的吸光度,以每分钟 $\Delta OD_{420\text{nm}}$ 变化值表示 1 个酶活力单位。

过氧化物酶(POD)的测定参考曹建康等^[17]的方法,将 3 mL 25 mmol/L 愈创木酚与酶提取液混合,测定 6 min 内反应液在波长 470 nm 处的吸光度,以每分钟 $\Delta OD_{470\text{nm}}$ 变化值表示 1 个酶活力单位。

1.4 数据处理与分析

试验均重复 3 次,结果以“平均值±标准差”表

示。采用 SPSS 19 软件进行数据处理和显著性分析,并进行 Pearson 相关性分析,采用 Origin 2021 绘制图像。

2 结果与分析

2.1 流通过程中蓝莓升温变化曲线

冷断链过程中,蓝莓内部温度变化曲线如图 1 所示。蓝莓中心温度在断链前期升温较快,在断链后期升温较慢直至终点 24 °C。由图可知,从冷藏温度 4 °C 升温至室温 24 °C 大约需要 3 h。在断链 25 min 时,蓝莓果实中心温度上升至 12.3 °C,大约为室温的一半;升温拐点在 55 min,此后升温速率由快至慢,其温度接近室温,大约为 23 °C,至 3 h 温度上升大约 1 °C,最终趋于室温。因此选取温度变动拐点 25,55 min 和 3 h 为断链时间,此结果为后续指标测定提供了基础理论依据。

2.2 流通过程中温度波动对蓝莓果实硬度的影响

采后蓝莓的呼吸和蒸腾作用会显著受到温度波动的影响,这导致果胶含量降低,细胞壁纤维松弛,蓝莓果肉硬度下降,出现软化^[20]。由图 2 可知,随着流通时间的延长,各处理组的蓝莓果实硬度均呈下降趋势,且随断链次数的增加,果实硬度下降愈加明显。在断链发生 1 次,断链时间为 25 min(第 9 天)的处理组蓝莓硬度大幅下降,黑暗组和 LED 蓝光组的硬度分别下降了 8.69% 和 30.61%;而断链时间为 55 min 和 3 h 的黑暗组、蓝光组的硬度分别下降了 34.11%,41.09% 和 26.01%,33.36%。由此可见,与外源照射条件相比,蓝莓果实硬度变化受温度波动影响更大。贮藏后期,不同断链次数下的蓝莓硬度差异显著($P < 0.05$),更高频率的温度波动加速了蓝莓细胞壁物质的降解,细胞膨胀度降低,软化速度加快。这与熊金梁等^[21]研究温度波动对货架期猕猴桃果实硬度的变化结果一致。

2.3 流通过程中温度波动对蓝莓果实可溶性固形物含量的影响

蓝莓果实在试验期间可溶性固形物(SSC)含量的变化如图 3 所示。蓝莓贮藏期间可溶性固形物含量呈缓慢下降趋势,与无波动组相比,温度波动处理组可溶性固形物含量较低,且随着断链次

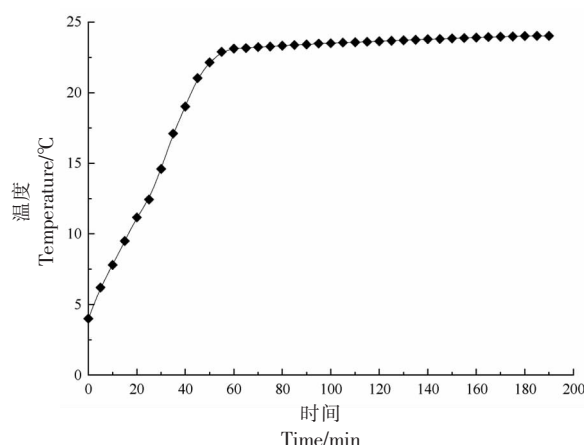
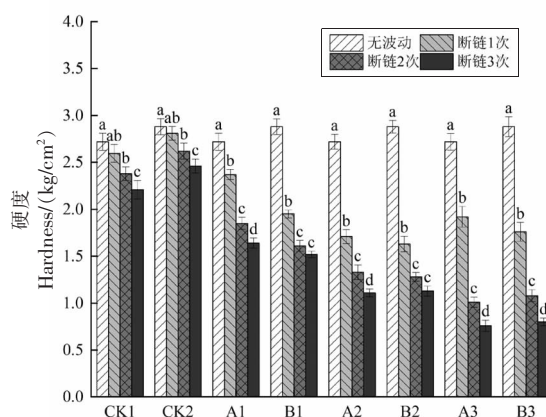


图 1 低温流通过程中蓝莓升温曲线

Fig.1 Temperature rise curve of blueberry during low-temperature circulation



注:无波动(第6天),断链1次(第9天),断链2次(第12天),断链3次(第15天),下同;不同小写字母表示组间样品有显著差异($P < 0.05$),下同。

图 2 低温流通过程中蓝莓果实硬度的变化
Fig.2 Changes in hardness of blueberry fruits during low-temperature circulation

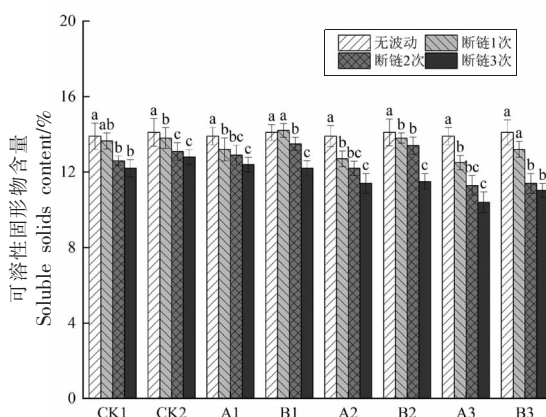


图 3 低温流通过程中蓝莓果实可溶性固形物含量的变化
Fig.3 Changes in soluble solids content of blueberry fruits during low-temperature circulation

数的增加下降更加明显。各处理组中,断链时间为25,55 min 和 3 h 的 SSC 含量差异不显著 ($P>0.05$)。贮藏至 9,12,15 d 时, 黑暗组 SSC 含量分别为 12.52%,11.33%,10.46%,LED 蓝光处理组 SSC 含量分别为 13.21%,12.42%,11.03%,这说明温度波动加剧了蓝莓可溶性固形物含量的减少, 同时蓝光组 SSC 含量均高于黑暗组,由此推断 LED 蓝光可有效抑制可溶性固形物的降解。这与 Zhang 等^[12]的研究结果相似,其研究表明持续蓝光照射可显著提高蓝莓幼果中可溶性固形物的含量。

2.4 流通过程中温度波动对蓝莓果实可滴定酸含量的影响

可滴定酸(TA)影响果实的口感和风味,是评价其品质的重要指标^[22]。温度波动处理对蓝莓贮藏期间可滴定酸含量的影响,如图4所示。贮藏初期有机酸逐渐降解成糖类,酸含量逐渐下降。贮藏第9天,A2组可滴定酸有最小值,不同断链次数的TA含量分别为0.76%,0.74%,0.59%,断链1次和2次的TA含量差异不显著($P>0.05$)。整个流通过程中,LED蓝光组可滴定酸含量随断链次数的增加而不断降低,贮藏第15天,断链1,2,3次的可滴定酸含量分别为对照组的81.15%,65.57%,60.49%,这说明较小的温度波动更能延缓蓝莓果实可滴定酸含量的降低。此外,蓝光组TA含量显著高于黑暗处理组($P<0.05$),根据Huang等^[23]的研究结果,LED光照可抑制果实酸转化酶和降解酶的活性,有利于可滴定酸物质和风味的保持。

2.5 流通过程中温度波动对蓝莓果实维生素C含量的影响

维生素C(VC)是参与植物生长发育的重要物质,其化学性质不稳定,易受温度影响,氧化分解。如图5所示,未经历温度波动的蓝莓果实VC含量保持最优,各处理组中,断链时间3 h下的VC含量显著低于断链25 min和55 min,B1组VC含量保留率最高,A3组VC保留率最差。贮藏终点时,黑暗组断链1,2,3次的VC含量相比初始值分别下降了40.77%,43.02%,73.53%,而LED蓝光组断链1,2,3次的VC含量相比初始值分别下降了18.76%,26.40%,71.82%。以上结果表明,随温度波动次数的增加,VC成分的降解速率明显加快。同时,黑暗处理组的VC含量显著低于蓝光处

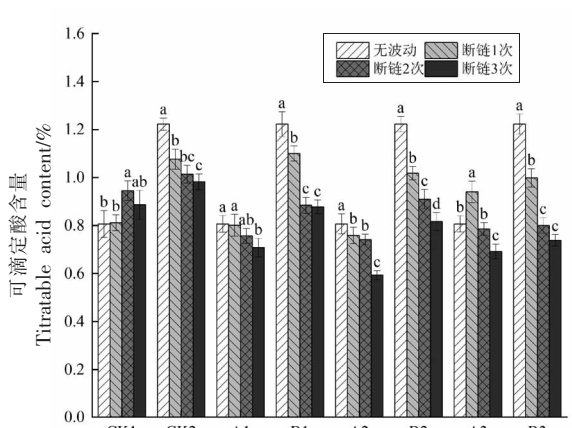


图4 低温流通过程中蓝莓果实可滴定酸含量的变化
Fig.4 Changes in titratable acid content of blueberry fruits during low-temperature circulation

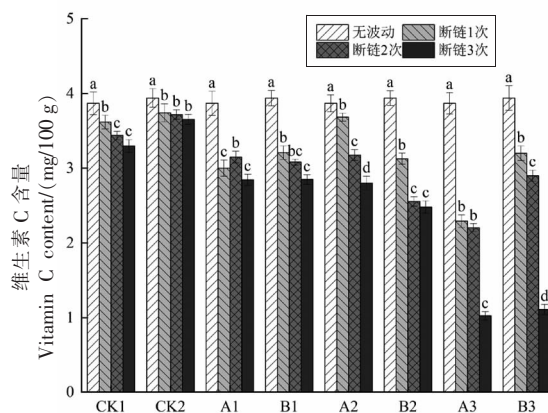


图5 低温流通过程中蓝莓果实维生素C含量的变化
Fig.5 Changes in vitamin C content of blueberry fruits during low-temperature circulation

理组($P<0.05$),可能由于光照辐射可参与调控果实内部VC的积累及相关代谢基因表达^[24]。Truffault等^[25]也认为,黑暗条件下会促进维生素C的分解代谢。

2.6 流通过程中温度波动对蓝莓果实花青素含量的影响

花青素是蓝莓生物活性成分的重要组成部分,其含量积累影响蓝莓果皮色素沉着程度^[26]。蓝莓果实在试验期间花青素含量的变化如图6所示。整个流通过程中,花青素含量随断链时间的延长呈下降趋势,贮藏15 d时,A1、A2、A3组的花青素含量分别为0.97,0.81,0.71 mg/g,B1、B2、B3组的花青素含量分别为2.82,2.19,1.89 mg/g。结果显示LED蓝光组的花青素含量始终显著高于黑暗

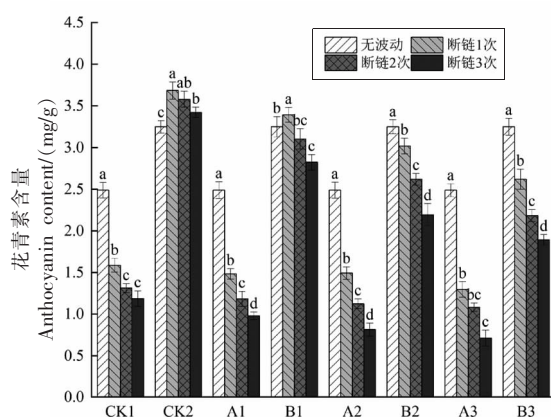


图 6 低温流通过程中蓝莓果实花青素含量的变化
Fig.6 Changes in anthocyanin content of blueberry fruits during low-temperature circulation

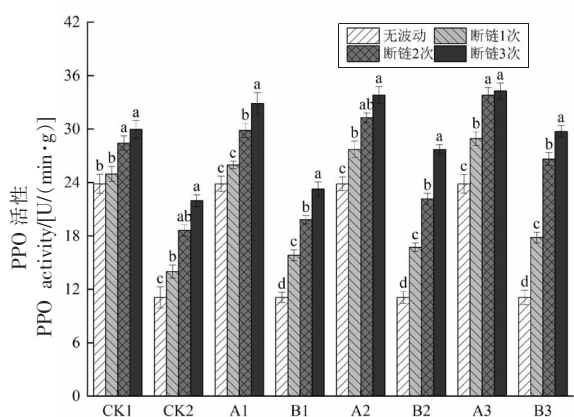
组 ($P < 0.05$), 由此推断蓝光辐照可有效抑制花青素贮藏期间的降解。Fang 等^[27]研究也发现 LED 红蓝光照射可通过激活参与花青素生物合成和运输的基因(如 *PsMYB10.1*)来诱导花青素在“秋姬”李子皮中的积累, 这与本文的研究结果相似。同一断链时间下, 花青素含量随着断链次数增加不断降低, 这说明花青素含量受温度波动明显, 温度波动越大, 花青素含量下降愈加迅速, 保存率越低。

2.7 流通过程中温度波动对蓝莓果实氧化酶活性的影响

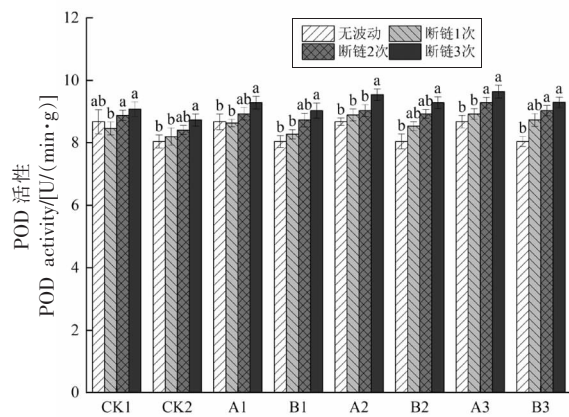
多酚氧化酶(PPO)是引起蓝莓鲜果褐变, 影响衰老过程的关键酶^[28]。如图 7a 所示, 未经历温

度波动的蓝莓果实 PPO 含量均保持最低水平, 流通过程中蓝莓的 PPO 活性随着贮藏时间的延长呈上升趋势, 贮藏第 6 天, 黑暗组和 LED 蓝光组分别有最小值, 为 23.85, 11.11 U/(min·g)。至贮藏终点时, A1、A2 和 A3 组比初始值分别提高了 10.73%, 13.21%, 15.64%, B1、B2 和 B3 组比初始值分别提高了 7.24%, 26.58%, 29.72%。由此说明温度波动时间的延长加剧了 PPO 的不稳定性, 导致活性升高。不同于黑暗组, LED 蓝光处理组的 PPO 含量增速更加缓慢, 这说明蓝光照射能显著延缓 PPO 活性的升高, 从而有效降低酚类化合物的氧化速率^[29], 减小蓝莓鲜果颜色的变化。

过氧化物酶(POD)是果蔬体内活性氧清除系统中重要的氧化还原酶, 与果实色味变化及生理代谢过程紧密相关^[30]。如图 7b 所示, 整个贮藏过程中, 黑暗组和蓝光组的 POD 含量随着断链次数的增加缓慢升高, 而差异并不显著 ($P > 0.05$)。与 PPO 类似, POD 活性随断链时间的延长呈上升趋势, 而增幅较小。贮藏 15 d 时, 断链时间为 25, 55 min 和 3 h 的黑暗组 POD 含量分别为 9.28, 9.53, 9.64 U/(min·g), 蓝光组 POD 含量分别为 9.02, 9.27, 9.29 U/(min·g)。Zhan 等^[31]的研究表明, 酶活性取决于蛋白质的天然结构, 可能由于蓝光处理限制了 POD 的结构变化, 延缓其酶活性的增加, 因此 POD 活性维持在较低水平。



(a) PPO



(b) POD

图 7 低温流通过程中蓝莓果实氧化酶活性的变化

Fig.7 Changes in oxidase activity of blueberry fruits during low-temperature circulation

2.8 蓝莓果实品质指标间的相关性分析

黑暗组和 LED 蓝光组的蓝莓各品质指标

Pearson 相关性分析如表 2 所示。黑暗组中, 除可滴定酸与其它指标相关性不显著外, 其余指标均

有一定相关性。其中硬度、VC 和花青素含量与 PPO、POD 活性均呈显著负相关($P<0.05$),而 LED 蓝光组则削弱了因温度波动带来的负面影响,硬度和花青素含量与可溶性固形物等指标呈显著正相关($P<0.05, P<0.01$),与 PPO、POD 酶活呈显著负相关($P<0.01, P<0.05$)。主要因为流通过程中冷

断链提高了相关氧化酶活性,加速了蓝莓的劣变、衰老及维生素 C、花青素等活性物质的氧化分解,品质下降。综合上述结果,硬度、维生素 C 和花青素含量可作为蓝莓在低温流通过程中的主要品质评价指标。

表 2 低温流通过程中蓝莓品质指标相关性分析

Table 2 Correlation analysis of blueberry quality indicators during low-temperature circulation

组别	指标	硬度	可溶性固形物含量	可滴定酸含量	维生素 C 含量	花青素含量	PPO	POD
黑暗组	硬度	1						
	可溶性固形物含量	0.885*	1					
	可滴定酸含量	0.807	0.586	1				
	维生素 C 含量	0.925*	0.864*	0.543	1			
	花青素含量	0.953*	0.924*	0.839	0.947*	1		
	PPO	-0.959**	-0.796	-0.917*	-0.889*	-0.947*	1	
	POD	-0.979**	-0.879*	-0.837	-0.930*	-0.915*	0.952*	1
LED 蓝光组	硬度	1						
	可溶性固形物含量	0.928*	1					
	可滴定酸含量	0.975**	0.929*	1				
	维生素 C 含量	0.891*	0.935*	0.894*	1			
	花青素含量	0.979**	0.976**	0.990**	0.978**	1		
	PPO	-0.968**	-0.914*	-0.987**	-0.878*	-0.963**	1	
	POD	-0.987**	-0.959**	-0.971**	-0.922*	-0.992**	0.947*	1

注:*. 显著性相关($P<0.05$),**. 极显著性相关($P<0.01$)。

3 结论

本研究分析了低温流通过程中温度波动及 LED 蓝光处理对蓝莓理化品质的影响,主要结论如下:

1) 随着流通时间的延长,冷断链次数的增加,蓝莓在贮藏期间的品质不断下降。相比于无温度波动组,断链 3 次处理组的蓝莓在 15 d 时,可滴定酸、维生素 C 和花青素含量分别减少了 60.49%, 71.82%, 42.27%, PPO、POD 稳定性降低,酶活性有所提高。

2) 蓝莓对断链时间的忍耐程度各不相同,其品质下降的速率为:断链 3 h > 断链 55 min > 断链 25 min,即温度波动时间越长,蓝莓品质下降越严重。

3) 相比于黑暗条件,LED 蓝光处理显著延缓了蓝莓营养物质的降解,故可考虑使用 LED 蓝光

辐照改善蓝莓在流通过程中因温度波动引起的品质劣变。

4) 总的来说,在实际低温流通过程中,应尽量减少贮藏期间温度波动的频率和时长,减小因温度波动造成的蓝莓果实品质下降。

参 考 文 献

- [1] 薛友林, 袁兴铃, 张鹏, 等. 精准温度控制对蓝莓的低温保鲜效果[J]. 现代食品科技, 2021, 37(11): 185-194, 150.
XUE Y L, YUAN X L, ZHANG P, et al. Precise temperature control for low temperature preservation of blueberries[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(11): 185-194, 150.
- [2] 姬亚茹, 胡文忠, 廖嘉, 等. 蓝莓采后生理病理与保鲜技术的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(18):

- 263-269.
- JI Y R, HU W Z, LIAO J, et al. Advances in postharvest physiopathology and preservation technology of blueberry[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(18): 263-269.
- [3] 韩春然, 李秀娟, 魏婧, 等. 蓝莓中多酚氧化酶的酶学特性[J]. 食品工业科技, 2016, 37(6): 187-190.
- HAN C R, LI X J, WEI J, et al. Enzymatic properties of polyphenol oxidase in blueberry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(6): 187-190.
- [4] VICENT V, NDOYE F T, VERBOVEN P, et al. Quality changes kinetics of apple tissue during frozen storage with temperature fluctuations[J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 92: 165-175.
- [5] 张瑞, 张新, 李喜宏, 等. 温度波动对灵武长枣贮藏品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(24): 199-203.
- ZHANG R, ZHANG X, LI X H, et al. Effect of temperature fluctuations on storage quality of Lingwu long jujube[J]. Food Research and Development, 2017, 38(24): 199-203.
- [6] XU C C, LIU D K, ZHANG L, et al. Influence of temperature fluctuations on the state/phase, ice crystal morphology, cell structure, and quality of celery during frozen storage[J]. LWT, 2020, 125: 109219.
- [7] 刘慧, 吕真真, 杨文博, 等. 不同模拟流通温度对桃果实硬度和糖酸品质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(9): 199-205.
- LIU H, LV Z Z, YANG W B, et al. Effect of different simulated circulation temperatures on peach fruit hardness and sugar-acid quality[J]. Food Science, 2021, 42(9): 199-205.
- [8] 刘佳, 乔丽萍, 李喜宏, 等. 温度波动对樱桃番茄贮藏效果研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(11): 198-202.
- LIU J, QIAO L P, LI X H, et al. Study on the effect of temperature fluctuation on storage of cherry tomatoes[J]. Food Research and Development, 2017, 38(11): 198-202.
- [9] ZHANG Y, ZHAO J H, DING Y, et al. Effects of state/phase transitions on the quality attributes of mango (*Mangifera indica* L.) during frozen storage[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2017, 52(1): 239-246.
- [10] TANO K, OULÉ M K, DOYON G, et al. Comparative evaluation of the effect of storage temperature fluctuation on modified atmosphere packages of selected fruit and vegetables[J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 46(3): 212-221.
- [11] XU F, CAO S, SHI L, et al. Blue light irradiation affects anthocyanin content and enzyme activities involved in postharvest strawberry fruit[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(20): 4778-4783.
- [12] ZHANG D, LIU Y, NI C, et al. Effect of LED light on the growth and physiological indices of blueberry[J]. Agronomy Journal, 2022, 114(4): 2105-2112.
- [13] 王晓芬, 郜海燕, 吴伟杰, 等. LED蓝光对辣椒采后色泽及品质的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(1): 112-119.
- WANG X F, GAO H Y, WU W J, et al. Effect of LED blue light on postharvest color and quality of peppers[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(1): 112-119.
- [14] 张哲, 张治权, 郝俊杰, 等. 贮运过程中温度及振动条件对葡萄贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(7): 230-235.
- ZHANG Z, ZHANG Z Q, HAO J J, et al. Effect of temperature and vibration conditions on the storage quality of grapes during storage and transportation[J]. Food Science, 2018, 39(7): 230-235.
- [15] 李洋, 张茜, 陈业莉, 等. 贮运过程中振动损伤对蓝莓品质的影响[J]. 林业科学, 2020, 56(9): 40-50.
- LI Y, ZHANG Q, CHEN Y L, et al. Effect of vibration damage on blueberry quality during storage and transportation[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(9): 40-50.
- [16] XU F, LIU S. Control of postharvest quality in blueberry fruit by combined 1-methylcyclopropene (1-MCP) and UV-C irradiation[J]. Food and Bioprocess Technology, 2017, 10: 1695-1703.
- [17] 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: 28-31.
- CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Experiment guidance of postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 28-31.

- [18] LIU Z L, XIE L, ZIELINSKA M, et al. Improvement of drying efficiency and quality attributes of blueberries using innovative far-infrared radiation heating assisted pulsed vacuum drying (FIR-PVD) [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2022, 77: 102948.
- [19] 章宁瑛, 郜海燕, 陈杭君. 臭氧处理对蓝莓贮藏品质及抗氧化酶活性的影响[J]. *中国食品学报*, 2017, 17(8): 170-176.
- ZHANG N Y, GAO H Y, CHEN H J. Effect of ozone treatment on storage quality and antioxidant enzyme activity of blueberries[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2017, 17(8): 170-176.
- [20] CHEN H, CAO S, FANG X, et al. Changes in fruit firmness, cell wall composition and cell wall degrading enzymes in postharvest blueberries during storage[J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 188: 44-48.
- [21] 熊金梁, 陈爱强, 刘婧, 等. 温度波动对猕猴桃在4℃下货架贮藏品质的影响[J]. *包装工程*, 2021, 42(19): 69-76.
- XIONG J L, CHEN A Q, LIU J, et al. Effect of temperature fluctuations on the shelf storage quality of kiwifruit at 4℃[J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(19): 69-76.
- [22] 刘萌, 范新光, 王美兰, 等. 不同包装方法对蓝莓采后生理及贮藏效果的影响[J]. *食品科学*, 2013, 34(14): 346-350.
- LIU M, FAN X G, WANG M L, et al. Effect of different packaging methods on postharvest physiology and storage effects of blueberries[J]. *Food Science*, 2013, 34(14): 346-350.
- [23] HUANG J Y, XU F, ZHOU W. Effect of LED irradiation on the ripening and nutritional quality of postharvest banana fruit[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(14): 5486-5493.
- [24] MA G, ZHANG L, SETIAWAN C K, et al. Effect of red and blue LED light irradiation on ascorbate content and expression of genes related to ascorbate metabolism in postharvest broccoli[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2014, 94: 97-103.
- [25] TRUFFAULT V, FRY S C, STEVENS R G, et al. Ascorbate degradation in tomato leads to accumulation of oxalate, threonate and oxalyl threonate [J]. *The Plant Journal*, 2017, 89(5): 996-1008.
- [26] 李恩惠, 矫馨瑶, 王晨歌, 等. 蓝莓花色苷降解动力学及稳定性[J]. *食品科学*, 2018, 39(5): 1-7.
- LI E H, JIAO X Y, WANG C G, et al. Kinetics and stability of blueberry anthocyanin degradation[J]. *Food Science*, 2018, 39(5): 1-7.
- [27] FANG Z, WANG L K, JIANG C, et al. Postharvest temperature and light treatments induce anthocyanin accumulation in peel of 'Akihime' plum (*Prunus salicina* Lindl.) via transcription factor PsMYB10. 1[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 179: 111592.
- [28] WEI Y, YU N, ZHU Y, et al. Exploring the biochemical properties of three polyphenol oxidases from blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) [J]. *Food Chemistry*, 2021, 344: 128678.
- [29] 朱凯, 吴伟杰, 房祥军, 等. 发光二极管蓝光结合紫外线处理对鲜切杏鲍菇贮藏品质的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(9): 223-231.
- ZHU K, WU W J, FANG X J, et al. Effect of light-emitting diode blue light combined with UV treatment on the storage quality of fresh-cut apricot mushrooms[J]. *Food Science*, 2022, 43(9): 223-231.
- [30] 张杰, 孙叶烁, 薛一花, 等. 贮藏温度对白菜叶片SOD、POD活性及MDA含量的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(10): 113-119.
- ZHANG J, SUN Y S, XUE Y H, et al. Effect of storage temperature on SOD and POD activities and MDA content of cabbage leaves[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)* 2019, 47(10): 113-119.
- [31] ZHAN L, LI Y, HU J, et al. Browning inhibition and quality preservation of fresh-cut romaine lettuce exposed to high intensity light [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2012, 14: 70-76.

Effects of Temperature Fluctuation and LED Blue Light on the Quality Characteristics of Blueberries during Low Temperature Flow

Yuan Di, Li Yang*, Chen Feng, Li Guoqing, Zhang Xinshuo
(Northeast Forestry University, Harbin 150040)

Abstract In order to study the effects of temperature fluctuations and LED blue light on the quality changes of blueberries during low temperature circulation, this experiment was conducted with dark treatment as the control group and temperature fluctuation treatment groups with no fluctuation, one, two, and three fluctuations and different chain break times (25, 55 min, and 3 h) designed under LED blue light conditions, and the effects of temperature fluctuations under cold break time on blueberry quality indicators and related oxidative enzymes were comparatively analyzed. The results showed that the temperature fluctuation treatment caused a continuous decrease in the quality of blueberries during storage. Compared with the no fluctuation group, blueberries with three fluctuation treatments showed a significant decrease in hardness; titratable acid, vitamin C and anthocyanin contents decreased by 60.49%, 71.82% and 42.27%, respectively; and PPO and POD activities increased at 15 days. Compared with the dark control group, LED blue light treatment could effectively delay the degradation of blueberry nutrients. In addition, the tolerance of blueberries to chain break time varies, and the rate of quality degradation is as follows: 3 h > 55 min > 25 min. The correlation analysis among the indicators showed that hardness, vitamin C and anthocyanins were significantly correlated ($P < 0.05$), which could be used to evaluate the quality changes of blueberries during low-temperature circulation. In summary, temperature fluctuations exacerbated the quality deterioration and nutrient loss of blueberries, so while avoiding severe temperature fluctuations, LED blue light irradiation could be considered to improve the quality deterioration of blueberries caused by temperature fluctuations during the circulation process.

Keywords temperature fluctuation; LED blue light; low-temperature circulation; blueberry; quality