

压差预冷环境因子与蓝莓果实品质耦合效应研究

王 达¹ 姚超阳¹ 邓秀丽¹ 吴茂玉¹ 孙占新² 赵 丽³ 郑 涛³ 杨相政¹

(1. 中华全国供销合作总社济南果品研究所, 济南 250220; 2. 稼沃(日照)生态农业有限公司, 日照 276800;
3. 日照农发集团有限公司, 日照 276827)

摘要: 针对易腐浆果蓝莓采后冷链中预冷环境因子与果实品质互作机制不明确的问题, 本文提出预冷贡献率评价指标, 研究延迟预冷时间(0、3、6 h)、环境风速(0.1、0.5、1.0、1.5 m/s)和环境温度(0、5、10、15℃)对蓝莓冷链品质的影响规律, 开展以压差预冷为基础的蓝莓冷链周期内品质评价。结果表明: 采后立即预冷可使冷链期间可溶性固形物含量提升2.8个百分点(预冷贡献率为20.49%), 商品化率提高6个百分点(预冷贡献率为6.74%), 预冷实施越及时越有利于保持果实采后品质; 环境风速改善可增强预冷效能, 当预冷风速提升至1.0 m/s时, 可溶性固形物含量和商品化率分别增加1.75个百分点与4个百分点(预冷贡献率为15.15%和4.34%); 预冷处理对果实质地特性具有双面效应, 预冷阶段, 低环温和高风速会降低果实弹性, 增加运输损伤风险; 贮运阶段, 低环温和高风速有利于保持蓝莓弹性和紧实度, 提高果实抗颠簸能力。最佳预冷参数为环境温度5℃, 环境风速1.0 m/s。

关键词: 蓝莓品质; 环境因子; 压差预冷; 预冷贡献率

中图分类号: TS255.35

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2025)06-0090-08

OSID:



Coupling Effect of Pressure Differential Pre-cooling Environmental Factors and Blueberry Fruit Quality

WANG Da¹ YAO Chaoyang¹ DENG Xiuli¹ WU Maoyu¹ SUN Zhanxin² ZHAO Li³
ZHENG Tao³ YANG Xiangzheng¹

(1. Jinan Fruit Research Institute, All China Federation of Supply and Marketing Cooperatives, Ji'nan 250220, China
2. Jiawo (Rizhao) Ecological Agriculture Co., Ltd., Rizhao 276800, China
3. Rizhao Nongfa Group Co., Ltd., Rizhao 276827, China)

Abstract: Aiming at the problem of unclear interactions between pre-cooling environmental factors and fruit quality in the post-harvest cold chain of perishable berries, the pre-cooling contribution rate evaluation indexes were proposed, and the impacts of delayed pre-cooling time (0 h, 3 h, 6 h), ambient wind speed (0.1 m/s, 0.5 m/s, 1.0 m/s, 1.5 m/s), and ambient temperatures (0℃, 5℃, 10℃, 15℃) on the quality of the cold chain of blueberries were investigated, and a pre-cooled quality evaluation based on differential pressure pre-cooling was carried out. The quality of blueberries in the cold chain cycle was evaluated based on differential pressure pre-cooling. The results showed that immediate post-harvest pre-cooling could increase soluble solids content by 2.8 percentage points (pre-cooling contribution of 20.49%) and commercialisation rate by 6 percentage points (pre-cooling contribution of 6.74%), and the more timely pre-cooling was implemented, the more conducive it was to maintaining post-harvest quality; the improvement of ambient wind speed could enhance the effectiveness of pre-cooling, and the increase of pre-cooling wind speed up to 1.0 m/s, the soluble solids content and commercialisation rate were increased by 1.75 percentage points and 4 percentage points, respectively (pre-cooling contribution of 15.15% and 4.34%); the pre-cooling treatment had a double-sided effect on the texture characteristics of fruits; in the pre-cooling stage, low ambient temperature and high wind speed would reduce the elasticity of fruits and increase the risk of transport damage, and in the storage and transport stage, the low ambient temperature and high wind speed were conducive to the maintenance

收稿日期: 2025-03-20 修回日期: 2025-04-16

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2024TZXD042)和山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2023TSGC0563)

作者简介: 王达(1991—),男,副研究员,博士,主要从事冷链保鲜技术及装备研究,E-mail: wangda19910@163.com

通信作者: 杨相政(1988—),男,研究员,主要从事冷链保鲜技术研究,E-mail: yangxiangzheng318@163.com

of the elasticity and tightness of blueberries and improve the ability of the fruits to resist bumps. The optimal pre-cooling parameters were ambient temperature of 5°C and ambient wind speed of 1.0 m/s.

Key words: blueberry quality; environmental factors; differential pressure pre-cooling; pre-cooling contribution

0 引言

果蔬采后预冷是冷链物流的关键环节,通过预冷可以快速去除果蔬采后田间热,降低果蔬呼吸速率,延缓果蔬衰老等^[1-2]。延迟预冷时间、果实表面外掠风速、预冷环境温度是影响预冷效果的主要因素^[3-4]。现有研究大多集中在环境温度、风速等单一条件对果实品质影响,缺乏系统性预冷环境因子和品质控制耦合研究。预冷有助于减轻后续贮藏或运输作业过程中的制冷负荷,降低果蔬采后直接入库造成的温度波动,从而影响果蔬在冷库中的贮藏品质^[5]。

ZHANG等^[6]研究表明采后及时预冷可保持黄桃较好的品质,减少在后续贮存过程中的品质劣变。安容慧等^[7]对采后不同时间内压差预冷下水蜜桃常温货架品质变化进行感官评定,得出在3 h内快速进行预冷可以有效延长货架期。采后如预冷不及时会严重影响其品质^[8],如在常温20°C条件下,黄瓜若延迟1 h预冷,则相当于0°C冷藏条件下缩短贮藏寿命7~10 h^[9-10]。李帅^[11]研究送风风速对白萝卜预冷速率和冷却均匀度的影响,结果表明风速越大,降温越快,但会造成包装箱温度死角,风速过小会使不均匀度增加。PHOENGMAK等^[12]发现适宜

的预冷温度可提高榴莲新鲜度,为后续销售提高经济效益。WU等^[13]通过虚拟冷链预测新鲜水果温度和质量损失关系,发现不同冷链场景之间冷链末端剩余质量差异显著。此外,梁芸志等^[14]研究不同预冷温度对番茄保鲜效果的影响,通过失重率、硬度、呼吸速率等指标测定确定了最佳预冷温度。

中国作为全球蓝莓最大生产国,但蓝莓极易腐,常温环境12 h即丧失商品价值^[15],采后损失高达20%~40%^[16],高损失率严重限制全球蓝莓市场^[17]。压差预冷是蓝莓最适宜的预冷方式^[18]。本文以蓝莓为研究对象,研究不同延迟预冷时间、压差预冷环境对蓝莓预冷、贮藏、运输及销售等采后供应链中的果实品质影响,以期预冷工艺选取提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

实验蓝莓品种为“莱克西”和“公爵”,采摘地点为稼沃(日照)生态农业有限公司蓝莓基地,采摘要求为无机械损伤、大小一致、色泽均匀、成熟度80%~90%蓝莓。

1.2 实验仪器与试剂

实验器材参数见表1。

表1 相关实验器材参数

Tab. 1 Parameters of relevant experimental equipment

名称	规格型号	厂家	精度
温度记录仪	MR5320	日本千野株式会社	±0.1%
风速仪	DLY-1601A	德力西电器有限公司	0.01 m/s
电子天平	TD15K-1B	天津天马衡基仪器有限公司	1 g
可溶性固形物计	PAL-1	Japan ATAGO Company	±0.2%
分光光度计	UV-5500PC	上海远华仪器有限公司	±0.003% T
质构仪	TA-XTplusC	北京微讯超技仪器技术有限公司	测试距离精度:0.001 mm;测试力量精度:0.1 g
色差仪	TC-PHG	北京光学仪器有限公司	

1.3 实验设计

以蓝莓“采收-预冷-贮藏(7 d)-运输(2 d)-销售(3 d)”共12 d的流通型冷链作为一个研究周期。其中延迟预冷处理、预冷及贮藏实验都在稼沃(日照)生态农业有限公司蓝莓基地进行;运输阶段由实验基地冷链运送至山东省济南市章丘区中国果蔬贮藏加工技术研究中心实验室,送至后立即放置于模拟运输实验室,保证运输时间和模拟运输时间之和为2 d;销售阶段实验在中国果蔬贮藏加工技术研

究中心实验室进行,设置如图1所示。

预冷方式采用压差预冷方式,压差预冷装置结构图如图2所示,包含制冷控温装置、压差通风装置、信息采集装置、蓝莓及包装箱。实验开始时需将实验装置放在冷库环境中,其中不同的预冷环境温度通过调节冷库制冷设备实现;不同外掠风速通过风速传感器监测并调节压差风机实现,传感器采集的数据包括蓝莓果心温度、进风口温度、蓝莓果实外掠风速等。

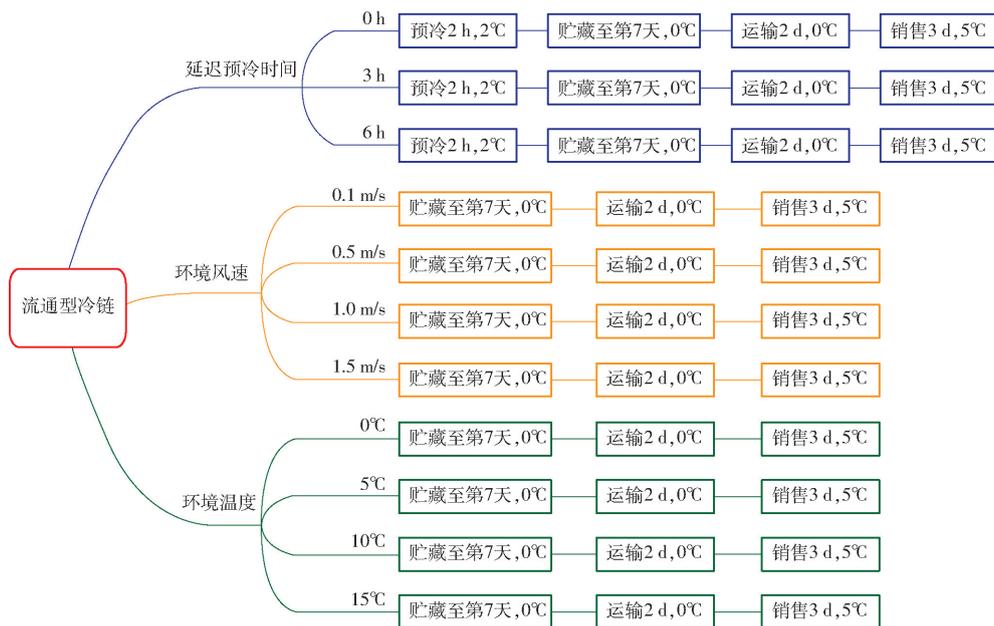


图1 冷链各环节参数设置

Fig. 1 Parameter setting for each link in cold chain

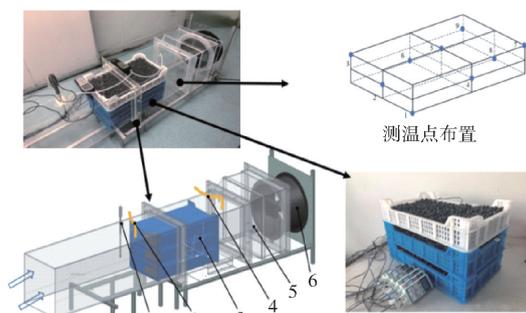


图2 蓝莓预冷实验台

Fig. 2 Blueberry pre-cooling lab bench

1. 风速、温度传感器 2. 正压接气管 3. 预冷对象(蓝莓) 4. 负压接气管 5. 静压腔 6. 压差风机

1.4 品质评价指标及测定方法

1.4.1 外观

每组处理随机取 100 颗果实, 每天进行拍照观察, 观察其外观变化^[19]。

1.4.2 色差

用色差仪评估蓝莓外观色泽变化, 测量时先进行黑板和白板校正, 测量值包含亮度(L^*)、红-绿(a^*)和黄-蓝(b^*)值^[20]。总颜色变化(ΔE)计算式为

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (1)$$

式中 L_0^* —— 蓝莓亮度初始值

a_0^* —— 蓝莓红-绿初始值

b_0^* —— 蓝莓黄-蓝初始值

1.4.3 可溶性固形物(SSC)

根据文献[21]方法进行测定, 在测量过程中, 以 10 个蓝莓颗粒为 1 组, 一共测试 100 个, 将挤压

出的蓝莓汁液均匀覆盖在测试仪器感光区域内, 实验结果为去掉极大值与极小值后平均值。

1.4.4 质地

采用 TA-XTplusC 型质构仪测定蓝莓质地^[22]。通过蠕变实验以 1 英寸球形探头 (P/1S) 实验模拟拇指按压或运输压(摔)伤的松弛或变形测试, 测试整颗蓝莓结构坚实度和弹性; 通过穿刺实验以小柱形探头进行穿刺测试, 测试果肉硬度及紧实度指标。蓝莓果实体积较小, 蓝莓直径约为 10 mm, 穿刺距离为 3~4 mm (约为果肉厚度的 2/3), 可避免穿刺距离过深受果实中心籽的影响。实验数据以平均值表示, 每个品种重复测定 20 个果实, 取平均值, 测试结果见表 2。

表2 蓝莓质地测试参数取值

Tab. 2 Blueberry texture test parameter values

项目	蠕变实验	穿刺实验
探头	P/1S	P/2
模式	Compression	Compression
选项	Hold Until Time	Return to start
测前速度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	1	1
测试速度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	1	1
测后速度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	1	5
位移/mm	3	5
触发力/N	0.098	0.049
数据采集速率/($\text{个} \cdot \text{s}^{-1}$)	250	250

1.4.5 软果率、发病率和腐烂率

采用统计法计算蓝莓软果率、发病率和腐烂率。其中软果按照硬度为初始硬度 80% 以下的果粒进行计算; 发病果按照是否出现病虫和霉变现象进行

鉴别;腐烂果根据是否出现果皮凹陷、流水和破裂现状进行鉴别。

1.4.6 商品化率

商品化率计算式为

$$A = 1 - \frac{h}{H} \times 100\% \quad (2)$$

式中 h ——软化、发病和腐烂质量, g

H ——总质量, g

预冷前处理后蓝莓商品化率为 100%, 通过去除软果率、发病率和腐烂率后获得商品化率。

1.4.7 预冷贡献率

为了更好地衡量预冷对各环节影响的比重, 提出预冷贡献率(β), 在合理条件范围内, 因预冷条件改善导致品质(可溶、商品化率等)提升率称为预冷贡献率。通过计算各环节预冷最优条件和预冷最差条件下品质值, 求出不同预冷操作下品质最大提升值, 进而获得预冷贡献率, 计算式为

$$\beta = \frac{C - c}{D} \times 100\% \quad (3)$$

式中 C ——预冷最优条件值

c ——预冷最差条件值

D ——采后原值

2 结果与讨论

2.1 延迟预冷时间对冷链周期品质的影响

2.1.1 可溶性固形物

不同延迟预冷时间下蓝莓可溶性固形物(总糖度)含量变化曲线如图3所示。由图3可知, 在整个冷链流通期间, 可溶性固形物含量呈先上升后下降趋势, 原因为蓝莓果实在采后存在后熟现象, 当延迟预冷时间分别为 0、3、6 h 时, 可溶性固形物高峰期分别出现在第 9、7、1 天左右, 延长预冷时间越久可溶性固形物高峰期出现越早, 原因为采后放置在常温下, 使高强度的呼吸消耗加速了后熟过程^[23], 也加速了在冷链流通期限品质消耗。采后及时预冷可有效减缓后熟, 推迟可溶性固形物高峰期, 保持冷链的可溶性固形物在一个较高水平。

图4为不同延迟预冷时间处理下, 在流通各环节可溶性固形物变化量。由图4可知, 不同延迟预冷处理对于冷链各环节的影响有较大的区别。在贮藏环节, 延迟预冷时间越短, 越有利于品质维持或者增加^[24], 冷链运输至销售环节, 与延迟预冷 0 h 相比, 延迟预冷 6 h 可溶性固形物消耗速度增加 1.9 倍, 表3为各环节可溶性固形物的预冷贡献率 β 。

由表3可知, 不同延迟预冷时间对预冷、贮藏、运输、销售各环节可溶性固形物贡献率分别为

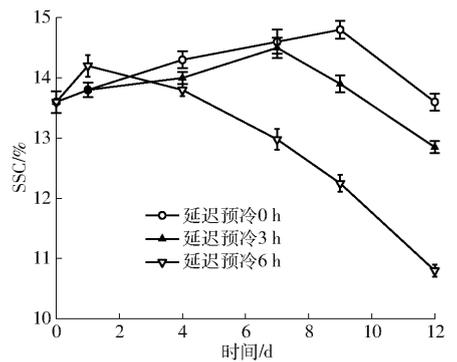


图3 延迟预冷对可溶性固形物影响

Fig. 3 Effect of delayed pre-cooling on soluble solids

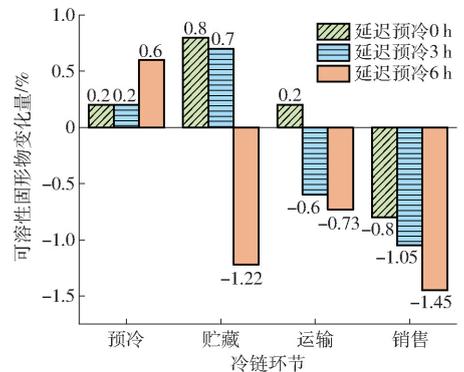


图4 各环节可溶性固形物的变化

Fig. 4 Changes in soluble solids by session

表3 延迟预冷对各环节可溶性固形物贡献率

Tab. 3 Contribution of delayed pre-cooling to soluble solids in each session %

冷链环节	预冷最优条件值	预冷最差条件值	差值	预冷贡献率 β
预冷	14.20	13.80	0.40	2.82
贮藏	14.60	12.98	1.62	11.10
运输	14.80	12.25	2.55	17.20
销售	13.60	10.80	2.80	20.49

2.82%、11.10%、17.20%、20.49%, 延迟预冷时间对整个冷链周期内可溶性固形物贡献率达 20.49%, 因此条件允许下, 采后应立即预冷以减少品质损失。

2.1.2 商品化率

商品化率统计方法是通过感官、测试等方法得到发病率、腐烂率、软果率之和。预冷前处理后蓝莓商品化率为 100%, 不同延迟预冷时间下各环节蓝莓商品化率变化曲线如图5所示。从图5可知, 商品化率在采后预冷过程中呈递减趋势, 延迟预冷时间分别为 0、3、6 h 时, 冷链流通 12 d 时, 商品化率分别为 95%、94%、89%。延迟 6 h 预冷在运输和销售阶段商品化率呈加速下降趋势, 在整个冷链流通期间, 采后立即预冷, 可提升商品化率 6 个百分点。

各环节商品化率预冷贡献率如表4所示, 从

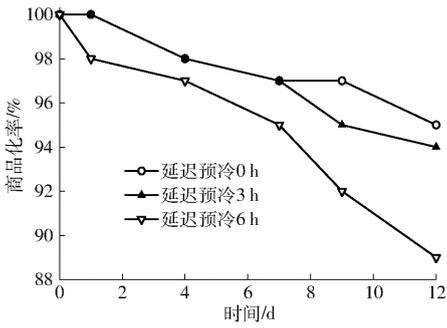


图5 延迟预冷对各环节蓝莓商品化率影响

Fig. 5 Effect of delayed pre-cooling on commercialisation rates of blueberries in various segments

表4 延迟预冷对各环节商品化率的贡献率

Tab. 4 Contribution of delayed pre-cooling to commercialisation rates in each segment %

冷链环节	预冷最优条件值	预冷最差条件值	差值	预冷贡献率 β
预冷	100	100	0	0
贮藏	97	95	2	2.11
运输	97	92	5	5.43
销售	95	89	6	6.74

表4可得预冷贡献率在预冷、贮藏、运输、销售环节分别为0、2.11%、5.43%、6.74%，因预冷操作条件的改善，冷链物流期间商品化率提高6个百分点，整个流通型冷链期间预冷贡献率最高可达6.74%。

2.2 预冷环境风速对冷链周期品质的影响

2.2.1 可溶性固形物

采摘后蓝莓通过调节变频压差风机转速同时结合风速仪测试，使得蓝莓预冷环境风速分别为0.1、0.5、1.0、1.5 m/s，其在流通型冷链周期内可溶性固形物含量变化曲线如图6所示。由图6可知，预冷环境风速为1.5、0.1 m/s时可溶性固形物变化规律呈先降后升又降过程，拐点分别出现在第3天和第9天。蓝莓采后可溶性固形物增加是由后熟造成的，而强冷风速1.5 m/s外掠起到冷激作用，具有抑制后熟效果；预冷风速0.1 m/s因降温缓慢使得果实平均温度维持在较高水平^[25]，因为后熟过程已经提前完成，高温下代谢旺盛，在第9天可溶性固形物

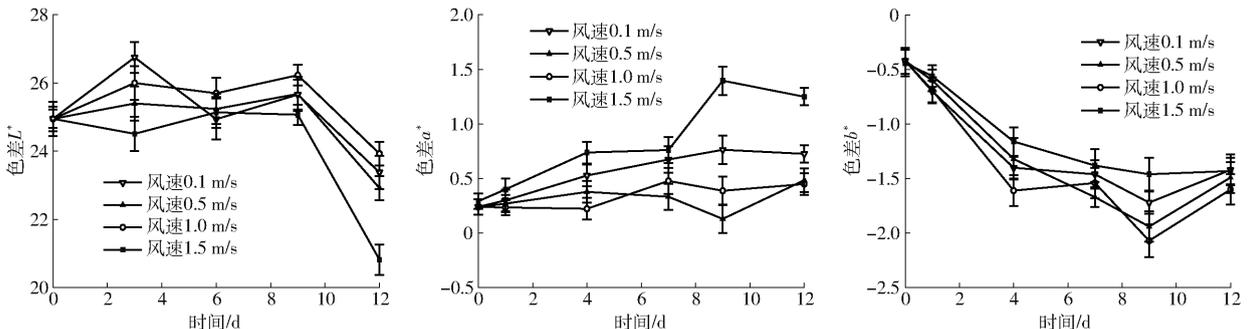


图7 不同预冷环境风速下各冷链环节色差变化曲线

Fig. 7 Variation of colour difference in various cold chain segments at different pre-cooling ambient wind speeds

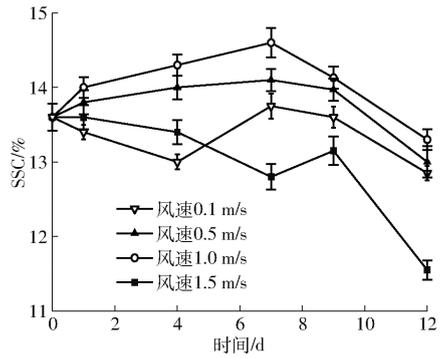


图6 预冷环境风速对可溶性固形物影响

Fig. 6 Effect of pre-cooling ambient wind speed on soluble solids

集体呈下降趋势。预冷风速1.0、0.5 m/s的可溶性固形物随着时间变化规律具有一致性，且预冷风速1.0 m/s较好地抑制蓝莓贮藏过程中可溶性固形物消耗。

各环节可溶性固形物的预冷贡献率如表5所示。由表5可知，预冷风速对预冷、贮藏、运输、销售各环节预冷贡献率分别为2.94%、14.06%、7.45%、15.15%，因为预冷风速改善，其可溶性固形物含量提升1.75个百分点，预冷贡献率为15.15%。

表5 预冷环境风速对各环节可溶性固形物贡献率

Tab. 5 Contribution of pre-cooling ambient wind speed to soluble solids in each session %

冷链环节	预冷最优条件值	预冷最差条件值	差值	预冷贡献率 β
预冷	14.00	13.60	0.40	2.94
贮藏	14.60	12.80	1.80	14.06
运输	14.13	13.15	0.98	7.45
销售	13.3	11.55	1.75	15.15

2.2.2 色差和商品化率

蓝莓色差是感官评价关键评估指标。颜色参数(L^* 、 a^* 、 b^*)用于评估样品表面颜色变化。在蓝莓表面上测试 L^* 、 a^* 和 b^* 。不同预冷风速下蓝莓流通型冷链期间色差变化如图7所示。

由图7可知，色差 L^* 呈先上升后下降趋势。贮

藏初期,预冷在一定程度上可改善蓝莓表面着色,增加亮度,但蓝莓在贮藏后期着色变暗;不同预冷环境风速下蓝莓色差 L^* 变化不同,风速 0.1、0.5、1.0 m/s 贮藏期间的变化规律一致,预冷风速 1.5 m/s 较差,较短时间内高强度外掠风速造成蓝莓表面果粉脱落和失水变暗,影响表面亮度, L^* 在销售期间下降较快,说明高风速下蓝莓在冷链后期表面光泽度下降迅速。

色差 a^* 表示蓝莓表面着色红绿程度,正值表示偏红,色差 b^* 表示黄蓝程度,负值表示偏蓝,由图 7 可知,预冷风速对色差 a^* 无明显的影响规律,整个冷链期间全部为正值,且呈上升趋势,在冷链后期蓝莓着色变暗变红。

总颜色变化量 ΔE 越小,表示产品色差越好。通过计算可得,预冷风速 0.1、0.5、1.0、1.5 m/s 对应的 ΔE 分别为 6.54、4.12、1.04、17.05,表明预冷 1.0 m/s 后贮藏期间蓝莓总体色差最好。

为了更直观地显示色差变化,不同预冷风速下蓝莓色差变化如图 8 所示。由图 8 可知,预冷风速 1 m/s 从感官以及果粉覆盖率均好于其他处理组。从表 6 可知,预冷贡献率在预冷、贮藏、运输、销售环节分别为 0、1.04%、4.30%、4.34%,因预冷风速的改善,冷链物流期间商品化率提高 4 个百分点,预冷贡献率可达 4.34%。

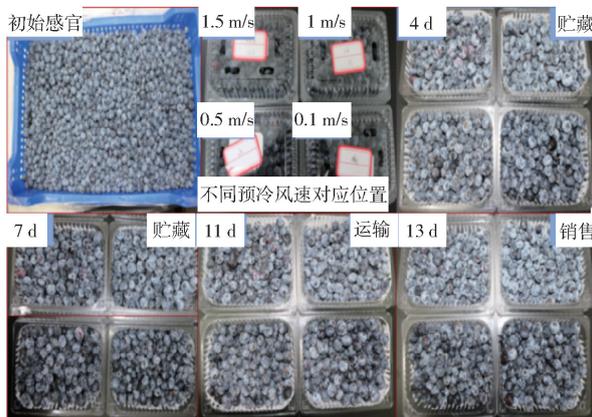


图 8 不同预冷环境风速下蓝莓的色差变化
Fig. 8 Variation of colour difference in blueberries at different pre-cooling ambient wind speeds

表 6 预冷环境风速对各环节商品化率的贡献率
Tab. 6 Contribution of pre-cooling ambient wind speed to commercialisation rate in each segment %

环节名称	预冷最优条 件值	预冷最差条 件值	差值	预冷贡献 率 β
预冷	100	100	0	0
贮藏	97	96	1	1.04
运输	97	93	4	4.30
销售	96	92	4	4.34

2.2.3 质地

质地表示食品组织状态,与口感相关联。在冷链环节,对果蔬质地指标中的侧重不同,贮藏和销售环节关注果蔬硬度、坚实度;运输环节更关注果蔬弹性、紧实度。蓝莓果实硬度、果肉坚实度、弹性、紧实度等指标随着不同预冷风速变化规律如图 9 所示。从图 9a、9b 可知,在冷链流通期间,果肉硬度与坚实度具有较强相关性,总体呈下降趋势,强风速可以延缓果肉硬度下降并增强果肉坚实度,风速越大,冷链后期果肉硬度和坚实度保持越好。这可能是由于较强预冷刺激导致蓝莓果皮柔韧度发生变化,从而降低果肉皮硬度和紧实度^[26]。此外,果肉硬度和紧实

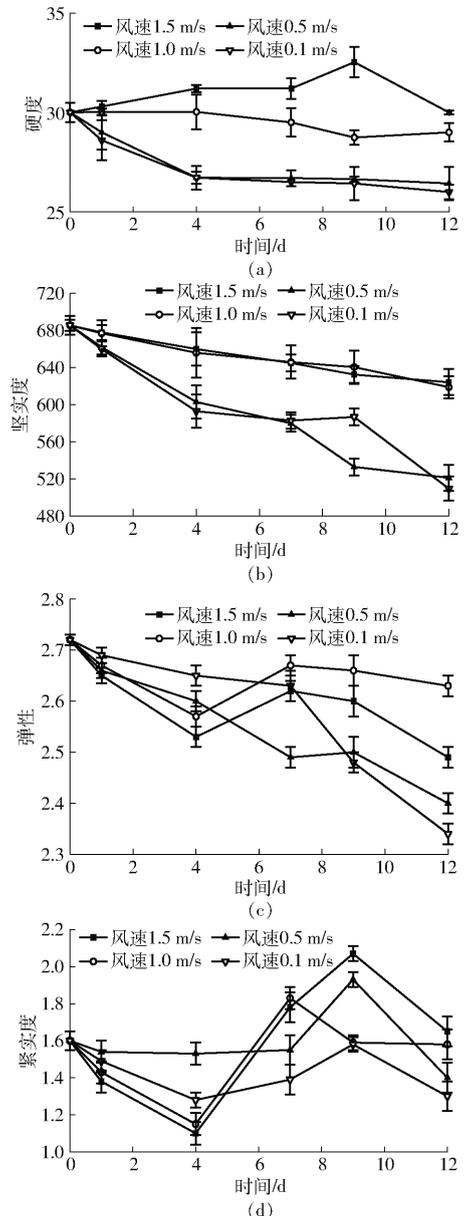


图 9 不同预冷环境风速下各环节果肉硬度、坚实度、弹性和紧实度变化曲线
Fig. 9 Changes in flesh hardness, firmness, elasticity and tightness in various segments at different pre-cooling ambient wind speeds

度反映蓝莓内部结构或纤维紧实程度。在销售环节,预冷风速 1.5 m/s 条件下蓝莓硬度和坚实度为 0.1 m/s 处理组 1.2 倍和 1.3 倍。

图 9c、9d 显示了不同预冷风速下各冷链环节果肉弹性和紧实度,4 种条件下蓝莓弹性和紧实度变化趋势大体一致。预冷初期,较强的预冷刺激会降低蓝莓果实的弹性,弹性下降会增加蓝莓果实机械损伤,因此预冷后直接运输建议增加衬垫等缓冲包装以减少机械损伤;在贮运及销售期间,风速 1 m/s 能保持蓝莓较高弹性,风速 1.5 m/s 蓝莓果肉更加紧实,而较高的弹性和紧实度能够减少果实机械损伤,提高果实抗颠簸能力,适合运输^[27]。因此,建议最佳预冷环境风速控制在 1 m/s。

2.3 预冷环境温度对蓝莓冷链周期品质的影响

将两个初始温度为 25℃ 的蓝莓“公爵”和“莱克西”,置于预冷温度 0、5、10、15℃ 环境下稳定 2 h,测试其质地变化。如图 10a、10b 所示,“公爵”蓝莓弹性和紧实度随温度升高不断降低,15℃ 下蓝莓失去基本弹性和紧实度,可能是由于较高的预冷温度导致蓝莓较高的呼吸热,加快了果实成熟衰老,从而降低了蓝莓果肉附着力和粘滞力^[28]。较低的预冷温度可以降低蓝莓果实弹性,此结果和上文对预冷风速对弹性的结果研究一致,冷链初始阶段,预冷对于蓝莓果实的弹性具有负作用,且温度越低,负作用越明显。

从图 10c、10d 可知,预冷温度的降低对蓝莓果肉硬度具有促进作用^[29]，“莱克西”随温度变化的影响规律不明显,“公爵”蓝莓随预冷温度的降低其硬度和坚实度均有提高,其中,预冷温度 0℃ 及 5℃ 下两种蓝莓的硬度和坚实度最佳。不同品种蓝莓虽然对预冷温度有细微的差别,但较低的预冷温度更有利于提高其质地品质。

3 结论

(1) 预冷时效性对蓝莓采后品质具有显著影响。采后立即实施预冷处理可使冷链周期内可溶性固形物含量提升 2.8 个百分点(预冷贡献率 20.49%),商品化率提高 6 个百分点(预冷贡献率 6.74%)。延迟预冷时间与果实品质劣变速率呈正相关,蓝莓采后预冷越及时越有利于保持其品质。

(2) 预冷环境风速对蓝莓冷链周期品质影响显著,因环境风速的改善,冷链周期内蓝莓可溶性固形物含量增加 1.75 个百分点(预冷贡献率 15.15%),商品化率提升 4 个百分点(预冷贡献率 4.34%),预

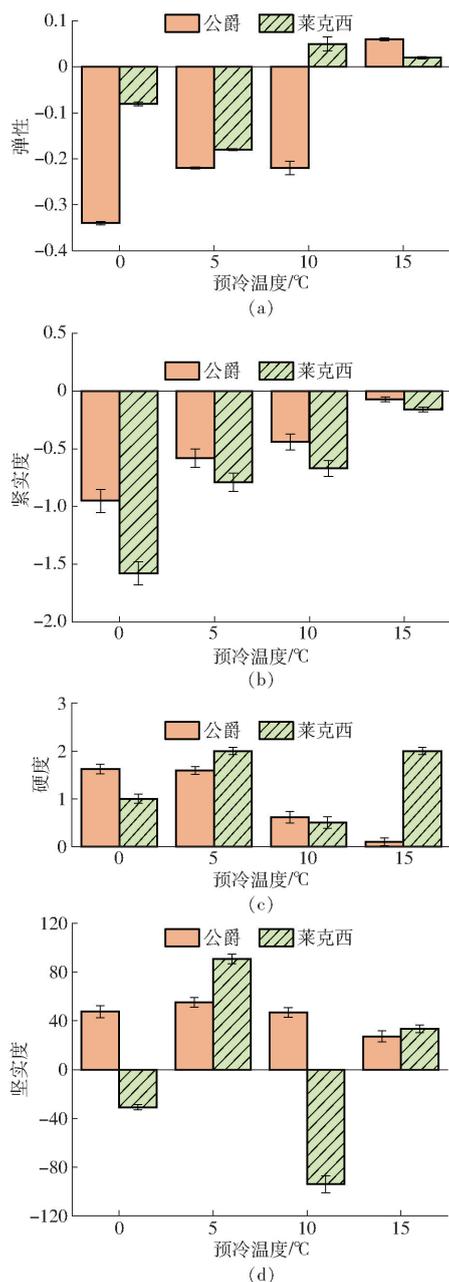


图 10 不同预冷环境温度下各品种果肉弹性、紧实度、硬度和坚实度变化

Fig. 10 Changes in elasticity, firmness, flesh hardness and firmness of varieties at different pre-cooling ambient temperatures

冷风速 1 m/s 可以最大限度地保持蓝莓质地、色泽和营养物质。

(3) 预冷处理对果实质地存在双重效应,预冷阶段,低环温和高风速会降低果实弹性,且环境温度越低、风速越大,弹性降低越明显,预冷后直接运输建议采用柔性缓冲包装以减少机械损伤风险;贮运阶段,低环温和高风速有利于蓝莓弹性和紧实度保持,提高果实抗颠簸能力。最佳预冷参数为环境温度 5℃,环境风速 1.0 m/s。

参 考 文 献

- [1] 郭嘉明,蔡威,林济诚,等. 移动式荔枝蓄冷喷淋预冷装置控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 367-375.
GUO Jiaming, CAI Wei, LIN Jicheng, et al. Design and test of control system of mobile lychee cooling spray pre-cooling device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 367-375. (in Chinese)
- [2] 唐钰,杨建伟,王胜虎,等. 苹果采后预冷技术应用现状与发展建议[J]. 西北园艺, 2024(4): 8-10.
TANG Yu, YANG Jianwei, WANG Shenghu, et al. Application of postharvest pre-cooling technology for apples and development suggestions[J]. Northwest Horticulture, 2024(4): 8-10. (in Chinese)
- [3] 张群,宁密密,舒楠. 预冷不同时间对阳光玫瑰葡萄贮藏品质的影响[J]. 湖南农业科学, 2024(1): 45-50.
ZHANG Qun, NING Mimi, SHU Nan. Influence of pre-cooling time on storage quality of sunny rose grapes [J]. Hunan Agricultural Science, 2024(1): 45-50. (in Chinese)
- [4] 郑恒,陈大磊,焦中高. 预冷对果蔬的保鲜作用及其影响因素[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(13): 137-148.
ZHENG Heng, CHEN Dalei, JIAO Zhonggao. Effects of pre-cooling on the freshness preservation of fruits and vegetables and its influencing factors [J]. Anhui Agricultural Bulletin, 2020, 26(13): 137-148. (in Chinese)
- [5] AMBAW A, DELELE M A, DEFRAEYE T, et al. The use of CFD to characterize and design post-harvest storage facilities: past, present and future [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 93:184-194.
- [6] ZHANG Y C, GUO M J, MEI J, et al. Effects of different postharvest precooling treatments on cold-storage quality of yellow peach (*Amygdalus persica*) [J]. Plants, 2022, 11(18): 2334.
- [7] 安容慧,陈兴开,常子安,等. 采后不同时间压差预冷对水蜜桃货架品质和香气成分的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(9): 317-324.
AN Ronghui, CHEN Xingkai, CHANG Zian, et al. Effects of postharvest differential pressure precooling on shelf quality and aroma composition of peach [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(9): 317-324. (in Chinese)
- [8] MARTINEZ-ROMERO D, CASTILLO S, VALERO D. Forced-air cooling applied before fruit handling to prevent mechanical damage of plums (*Prunus salicina* Lindl.) [J]. Postharvest Biology and Technology, 2003, 28(1): 135-142.
- [9] 郑恒,陈大磊,焦中高. 预冷对果蔬的保鲜作用及其影响因素[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(13): 137-148.
ZHENG Heng, CHEN Dalei, JIAO Zhonggao. Freshness preservation of fruits and vegetables by pre-cooling and its influencing factors [J]. Anhui Agricultural Bulletin, 2020, 26(13): 137-148. (in Chinese)
- [10] 丁艳. 预冷时间对生鲜农产品贮藏品质的影响[J]. 现代食品科技, 2019, 35(5): 131-136,243.
DING Yan. Effect of pre-cooling time on storage quality of fresh produce [J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(5): 131-136,243. (in Chinese)
- [11] 李帅. 类圆柱形果蔬差压预冷实验研究及模拟仿真[D]. 天津:天津商业大学, 2012.
LI Shuai. Experimental study and simulation of differential pressure pre-cooling of cylindrical fruits and vegetables [D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2012. (in Chinese)
- [12] PHONEGMAK W, SIRIVONGPAISAL N, SRIDACH W, et al. Effects of the precooling process on the preservation of fresh-cut durian [J]. Journal of Food Process Engineering, 2023, 46(12): e14463.
- [13] WU W, CRONJE P, NICOLAI B, et al. Virtual cold chain method to model the postharvest temperature history and quality evolution of fresh fruit—a case study for citrus fruit packed in a single carton [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 144:199-208.
- [14] 梁芸志,陈存坤,吴昊,等. 不同预冷温度对采后番茄贮藏品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(13): 188-200.
LIANG Yunzhi, CHEN Cunkun, WU Hao, et al. Effects of different pre-cooling temperatures on storage quality of postharvest tomatoes [J]. Food Research and Development, 2018, 39(13): 188-200. (in Chinese)
- [15] 宁静红,宋志朋,杨鑫,等. 多出口扇形喷嘴干冰喷射速冻蓝莓特性研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3): 392-400.
NING Jinghong, SONG Zhipeng, YANG Xin, et al. Characteristics of quick-frozen blueberries by dry ice blasting with multi-outlet fan nozzles [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 392-400. (in Chinese)
- [16] CHEN W, DENG J, WANG D, et al. Slow-release antimicrobial preservation composite coating based on bamboo-derived xylan—a new way to preserve blueberry freshness [J]. Food Chemistry, 2025, 463:141291.
- [17] LIU M, ZOU X, WU X, et al. Preparation of chitosan/tenebrio molitor larvae protein/curcumin active packaging film and its application in blueberry preservation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 275:133675.
- [18] 王达,杨相政,贾斌广,等. 不同包装结构对蓝莓压差预冷效果的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2020, 46(1): 47-63.
WANG Da, YANG Xiangzheng, JIA Binguang, et al. Influence of different packaging structures on the pre-cooling effect of blueberries under differential pressure [J]. Journal of Zhejiang University (Agricultural and Life Sciences Edition), 2020, 46(1): 47-63. (in Chinese)
- [19] WU S, ZHANG Y, WANG M, et al. 1-Methylcyclopropene and bacillus treatment affects blueberry storage quality and antioxidant levels [J]. Horticulturae, 2024, 10(8): 859.
- [20] 朱金艳. 基于BP神经网络的电子鼻、电子舌和色差仪多信息融合技术预测蓝莓汁中花青素含量[J]. 食品科技, 2021, 46(9): 289-295.
ZHU Jinyan. Prediction of anthocyanin content in blueberry juice by BP neural network-based multi-information fusion of electronic nose, electronic tongue and colorimeter [J]. Food Science and Technology, 2021, 46(9): 289-295. (in Chinese)

- YU Hongling, WANG Hongguo, QU Jianhua, et al. Optimization method to vehicle routing based on traffic flow [J]. *Application Research of Computers*, 2013, 30(6): 1675–1677. (in Chinese)
- [22] 汪浩祥, 曹光乔, 闫子彤, 等. 天气变化情形下基于动态时间窗的收获机应急调度技术[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(10): 105–113.
WANG Haoxiang, CAO Guangqiao, YAN Zitong, et al. Emergency scheduling of harvester caused by change of dynamic time window due to weather change[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(10): 105–113. (in Chinese)
- [23] 段征宇, 杨东援, 王上. 时间依赖型车辆路径问题的一种改进蚁群算法[J]. *控制理论与应用*, 2010, 27(11): 1557–1563.
DUAN Zhengyu, YANG Dongyuan, WANG Shang. Improved ant colony optimization algorithm for time-dependent vehicle routing problem[J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(11): 1557–1563. (in Chinese)
- [24] SOLOMON M M. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints[J]. *Operations research*, 1987, 35(2): 254–265.
- [25] FINNVEDEN G, HAUSCHILD M Z, EKVALL T, et al. Recent developments in life cycle assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 91(1): 1–21.
- [26] 叶岩, 祝天宇, 吴泽全, 等. 反刍动物甲烷排放量监测技术应用研究进展[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(增刊1): 277–292.
YE Yan, ZHU Tianyu, WU Zequan, et al. Research progress on application of methane emission monitoring technology in ruminants[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(Supp. 1): 277–292. (in Chinese)
- [27] 林懋. 三种新型新能源汽车与传统汽油车的全生命周期评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2020.
LIN Yue. Life cycle assessment of three new type energy vehicles and internal combustion engine vehicle[D]. Beijing: China Agricultural University, 2020. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 97 页)

- [21] 王姗姗. 蓝莓可溶性固形物、总酚和花青素近红外光谱检测技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.  
WANG Shanshan. Research on near-infrared spectroscopic detection of soluble solids, total phenols and anthocyanins in blueberries[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012. (in Chinese)
- [22] RIVERA S, KERCKHOFFS H, SOFKOVA-BOBCHEVA S, et al. Influence of harvest maturity and storage technology on mechanical properties of blueberries[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 191: 111961.
- [23] 尚夔栋, 刘升. 延迟预冷对菠菜冷链流通中营养和品质的影响[J]. *食品与生物技术学报*, 2023, 42(5): 50–56.  
SHANG Kuili, LIU Sheng. Effects of delayed pre-cooling on nutrition and quality of spinach in cold chain distribution[J]. *Journal of Food and Biotechnology*, 2023, 42(5): 50–56. (in Chinese)
- [24] 薛靖文, 刘升. 延迟预冷对芥蓝冷链过程品质和营养的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2022, 57(3): 169–174.  
XUE Jingwen, LIU Sheng. Effects of delayed pre-cooling on the quality and nutrition of kale during the cold chain process[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2022, 57(3): 169–174. (in Chinese)
- [25] 韩佳伟, 赵春江, 杨信廷, 等. 送风风速对苹果差压预冷性能的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(11): 280–289.  
HAN Jiawei, ZHAO Chunjiang, YANG Xinting, et al. Influence of air supply velocity on the performance of differential pressure pre-cooling of apples[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(11): 280–289. (in Chinese)
- [26] HUSSAIN T, KAMAL M A, ALAM Z, et al. Experimental and numerical investigation of spherical food product during forced convection cooling[J]. *Measurement: Food*, 2021, 3: 100006.
- [27] 付燕, 杨琴, 林焯. 8个蓝莓品种果实质地品质差异分析[J]. *中国南方果树*, 2023, 52(3): 144–153.  
FU Yan, YANG Qin, LIN Xin. Analysis of fruit texture and quality differences among eight blueberry varieties[J]. *Southern China Fruit Tree*, 2023, 52(3): 144–153. (in Chinese)
- [28] RIVERA S, GIONGO L, CAPPAL F, et al. Blueberry firmness—a review of the textural and mechanical properties used in quality evaluations[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 192: 112016.
- [29] 王贺. 不同预冷温度对壶瓶枣货架期影响的研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2022.  
WANG He. Effects of different pre-cooling temperatures on the shelf-life of jujube [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2022. (in Chinese)