

层层自组装可食性涂层在蓝莓常温保鲜中的应用

张楠¹, 卢敏^{1*}, 侯聚敏^{1,2*}

(1. 长春大学食品科学与工程学院, 长春 130022; 2. 吉林省健康状态辨识与机能增强重点实验室, 长春 130022)

摘 要: **目的** 优化层层自组装可食性涂层的工艺参数, 延长蓝莓常温保鲜期。 **方法** 以“绿宝石”蓝莓 (*Vaccinium rhododendraceae*) 为试验原料, 以失重率和糖酸比为单因素的评价指标, 考察不同浓度壳聚糖 (chitosan, CS)、羧甲基纤维素钠 (sodium carboxymethyl cellulose, CMC-Na)、甘油以及晾干时间对层层自组装可食性涂层保鲜效果的影响, 并采用正交试验设计获得层层自组装可食性涂层对蓝莓采后常温保鲜效果的最佳参数。 **结果** 层层自组装可食性涂层最佳的工艺参数为 CS 浓度为 6 mg/mL、CMC-Na 浓度为 10 mg/mL、甘油浓度为 0.06 mL/mL、晾干时间 50 min。在此条件下, 蓝莓常温保鲜期可以达到 12 d, 蓝莓失重率为 (23.97±2.64)%, 明显优于对照组失重率 (33.04±3.39)%。 **结论** 本研究优化后的层层自组装可食性涂层处理蓝莓可减缓其贮藏期内的失重率、糖酸比下降速率, 有利于蓝莓的常温保鲜。

关键词: 蓝莓; 常温保鲜; 层层自组装; 可食性涂层

Application of layer-by-layer edible coating on blueberry preservation at room temperature

ZHANG Nan¹, LU Min^{1*}, HOU Ju-Min^{1,2*}

(1. College of Food Science and Engineering, Changchun University, Changchun 130022, China; 2. Key Laboratory of Health Status Identification and Function Enhancement in Jilin Province, Changchun 130022, China)

ABSTRACT: Objective To optimize the construction process parameters of layer-by-layer edible coating to extend the freshness period of blueberry at room temperature. **Methods** The blueberry named *Emerald* (*Vaccinium rhododendraceae*) was used as raw materials, the weight loss rate and sugar/acid ratio were used as single factor evaluation indexes for exploring the effects of the concentration of chitosan (CS), sodium carboxymethyl cellulose (CMC-Na), glycerol and drying time on the preservation efficiency of the blueberry. Subsequently, the orthogonal design was applied to obtain the optimal parameters of the edible coating on blueberry in room temperature. **Results** The optimal coating parameters for layer-by-layer edible coating on blueberry preservation were: CS concentration

基金项目: 中国博士后科学基金第 65 批面上资助项目(2019M651212)、吉林省教育厅“十三五”科学技术研究项目(JJKH20191208KJ)、长春大学科研培育项目春蕾基金项目(zkc201909/2019JBC26L35)、长春大学攀登计划项目(zkp202029/2020JBD26L45)

Fund: Supported by the 65th Batch of General Funded Projects of China Postdoctoral Science Foundation (2019M651212), the 13th Five Year Plan Scientific and Technological Research Project of Jilin Provincial Department of Education (JJKH20191208KJ), the Scientific Research and Cultivation Project of Changchun University Spring Bud Fund Project (zkc201909/2019JBC26L35), and the Climbing Plan of Changchun University (zkc202029/2020JBD26L45)

***通信作者:** 卢敏, 博士, 教授, 主要研究方向为谷物贮藏与加工。E-mail: 1299625439@qq.com

侯聚敏, 博士, 讲师, 主要研究方向为小浆果加工与贮藏。E-mail: houjm@ccu.edu.cn

***Corresponding author:** LU Min, Ph.D, Professor, Changchun University, 6543 Weixing Road, Chaoyang District, Changchun 130022, China. E-mail: 1299625439@qq.com

HOU Ju-Min, Ph.D, Lecturer, Changchun University, 6543 Weixing Road, Chaoyang District, Changchun 130022, China. E-mail: houjm@ccu.edu.cn

was 6 mg/mL, CMC-Na concentration was 10 mg/mL, glycerol content was 0.06 mL/mL, drying time was 30 min. Under the conditions, the freshness period of blueberries could reach 12 d, the weight loss rate of blueberry was $(23.97 \pm 2.64)\%$, which were significantly better than that of the control group [weight loss: $(33.04 \pm 3.39)\%$] ($P < 0.05$).

Conclusion The treated with the optimized layer-by-layer edible coating can significantly slow down the weight loss rate and sugar/acid ratio of blueberries, which provides theoretical supports for the practical application of this technology in fruit and vegetable preservation.

KEY WORDS: blueberry; preservation at room temperature; layer-by-layer; edible coating

0 引言

蓝莓(*Vaccinium* Ericaceae), 杜鹃花科越橘属植物的果实, 为全球第二大浆果^[1], 也被称为“黄金浆果”, 因其具有较高的营养和药用价值而被联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization, FAO)列为 5 大保健食品之一^[2]。蓝莓富含维生素、花青素和抗氧化酶等多种营养成分, 被认为是膳食抗氧化剂和促进健康的生物活性化合物最丰富的来源之一^[3-4]。目前, 中国的蓝莓总进口量从 2012 年的 499 t 增加到 2020 年的 22045 t, 7 年间增加了 44 倍, 由此可见, 中国蓝莓鲜果市场具有巨大的市场潜力^[5]。然而, 受水分扩散、代谢性萎蔫、微生物污染和贮运时机械损伤等影响, 蓝莓采后损失率高达 30%~40%, 且货架期极短^[6-7], 常温下仅能保存 2~4 d^[8], 这导致蓝莓在运输及日常保鲜中面临很大的问题。因此, 研究人员开发了多种蓝莓采后处理方法来延长蓝莓的货架期, 包括低温贮藏、气调贮藏等物理处理, 熏蒸处理、涂膜处理等化学处理以及生物拮抗和植物精油等的生物处理^[9]。这些措施在一定程度上有利于蓝莓品质的维持, 但仍存在一些问题。例如, 物理处理存在成本较高的问题, 化学处理则存在食品安全隐患, 而常用涂层保鲜材料功能单一, 因此仍需要开发更为有效的保鲜方法, 来延长蓝莓常温保鲜时间。

层层自组装技术(layer-by-layer self-assembly, LBL)在水果保鲜方面具有多功能优势, 可用于解决常规可食性涂层在果品保鲜中所面临的功能单一问题。LBL 是利用逐层交替吸附的原理, 两种及以上材料通过相互之间的作用力(包括静电力、氢键、配位键、化学键等)自发地在基体上缔合, 形成一种多层复合膜的技术^[10], 可提高涂层的性能和功能^[11]。CHEN 等^[12]用壳聚糖(chitosan, CS)和羧甲基纤维素制成 LBL 涂层, 结果表明, 经过 LBL 涂层保藏的柠檬可以在 0 °C 下贮藏 20 d, 而且涂层显著提高了柠檬果实的硬度、可溶性固形物和维生素 C 含量, 并且可以抑制果实失重和果肉褐变。YAN 等^[13]发现, LBL 涂层在 10 d 的贮藏期内对草莓果实硬度和香气损失有明显地抑制作用, 而对可溶性固形物含量和总酸度的影响不大, 而且 LBL 显著降低了草莓贮藏后碳水化合物、脂肪酸和氨基酸代谢的初级

代谢产物含量和萜类、类胡萝卜素、苯丙酸和类黄酮代谢的次级代谢产物含量。杨皓月等^[14]用明胶和壳聚糖对樱桃柿子进行层层自组装涂层, 考察了双层涂层的浸涂顺序对樱桃柿子保鲜效果的影响, 结果表明, 壳聚糖具有良好的抑菌性, 在外层时可以减少内层物质受到细菌的侵蚀, 对果实的保鲜效果较好。

目前, 用于对果蔬进行涂膜的成膜物质大多是天然的多糖类、蛋白质、脂类物质及其衍生物等^[15]。其中, CS 具有无毒、生物可降解和生物相容性等优势^[16], 也具有较高的抗菌活性^[17], CS 中的氨基在溶液中质子化后可携带正电荷, 有利于 LBL 可食性涂层的构建。此外, 羧甲基纤维素钠(sodium carboxymethyl cellulose, CMC-Na)是由天然纤维素经过碱化和羧甲基化而制得的高分子化合物^[18], 成膜性能好, 具有良好的生物相容性、可降解性和亲水性, 同时价格便宜^[15], 可作为 LBL 可食性涂层的理想原料。经过预试验发现, 只具有 CS 和 CMC-Na 的涂层容易碎裂, 而甘油作为一种塑化剂, 当它被添加到涂层中后, 具有提高聚合物的机械性能和光泽度的能力, 因此在 CS 溶液中加入一定的甘油来进一步提高涂层的粘附性和机械性能, 防止膜的干裂现象^[19]。

因此, 本研究采用 CS、CMC-Na、甘油作为 LBL 涂层原料, 通过层层自组装的方式在蓝莓表皮构建涂层, 以蓝莓在常温贮藏 10 d 的失重率和糖酸比为评价标准, 得出可食性涂层最佳工艺参数, 为该技术在果蔬保鲜产业的实际应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

“绿宝石”蓝莓(Emerald)购于大连丹东(2021 年 3 月采摘), 选择无畸变、无虫害、无损伤、大小均匀、颜色一致的果样。采后经 1 d 的快递运输, 到达实验室后迅速置于 4 °C 的冰箱中以备试验使用。

二氧化氯(ClO_2)(食品级, 山东省武城雅洁消毒用品有限公司); 水溶 CS(食品级, 仟味食品添加剂有限公司); CMC-Na(食品级, 上海申光食用化学品有限公司); 甘油(食品级, 马来西亚 Vance Bioenergy 公司)。

1.2 仪器与设备

KFJ-A 型电子天平(凯丰集团有限公司); DF-101 型恒温磁力搅拌器(巩义市予华仪器有限责任公司); PAL-BX/ACID F5 型糖酸一体机(广州市爱宕科学仪器有限公司)。

1.3 试验设计

采取 CMC-Na 在内层, 而 CS 在外层的涂膜方式^[14], 按照图 1 所示的流程进行 LBL 可食性涂层的构建。

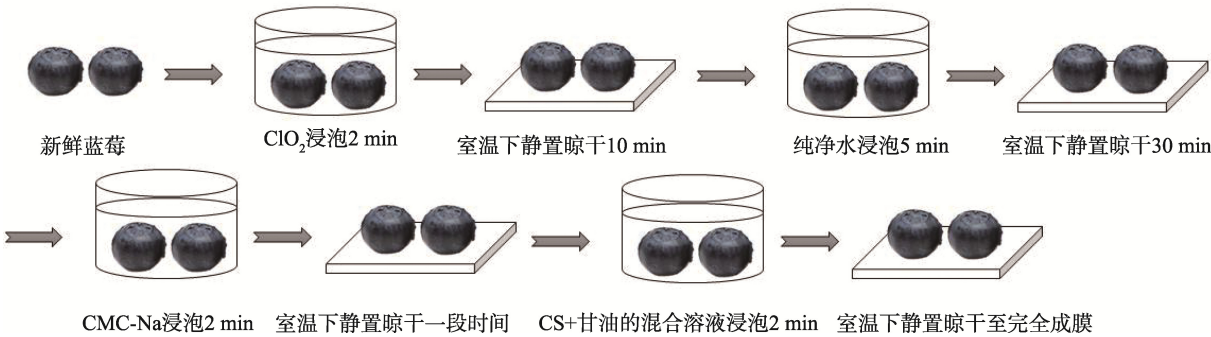


图 1 LBL 可食性涂层的构建工艺流程图
Fig.1 Construction process flow chart of LBL edible coating

表 1 涂层构建工艺单因素试验表
Table 1 Single factor test table of layer construction process

变量	CS 浓度/(mg/mL)	CMC-Na 浓度/(mg/mL)	甘油浓度/(mL/mL)	晾干时间/min
水平	2、4、6、8、10	8	0.09	30
	4	4、6、8、10、12	0.09	30
	4	8	0.05、0.07、0.09、0.11、0.13	30
	4	8	0.09	10、20、30、40、50

1.3.2 正交试验

在单因素试验结果的基础上, 通过正交试验设计 $L_9(3^4)$ 对蓝莓层层自组装涂层构建条件进行优化, 设置 4 因素[晾干时间(A)、CS 浓度(B)、CMC-Na 浓度(C)和甘油浓度(D)], 详见表 2, 每个因素设 3 个水平, 重复 3 次。

表 2 正交试验因素水平表
Table 2 Factor level of orthogonal test

水平	因素			
	A 晾干时间 /min	B CS 浓度 /(mg/mL)	C CMC-Na 浓度 /(mg/mL)	D 甘油浓度 /(mL/mL)
1	30	6	6	0.06
2	40	8	8	0.07
3	50	10	10	0.08

1.3.3 验证试验

采用最优工艺对蓝莓进行层层自组装可食性涂层(LBL 组), 与无菌水处理(CK 组)、单层壳聚糖处理(CS 组)、单层羧甲基纤维素钠处理(CMC-Na 组)进行对比, 每隔 3 d 测定蓝莓的失重率、糖酸比, 观察蓝莓在贮藏期间的品质

1.3.1 单因素试验

失重率是衡量果实贮藏保鲜品质的关键指标, 糖酸比是果实中全糖含量与有机酸含量的比率, 是衡量果实风味品质的主要指标, 一般稳定在 15~20 为宜。考察 CS 浓度、CMC-Na 浓度、甘油浓度、CMC-Na 浸泡后的晾干时间对失重率和糖酸比的影响, 分别设置 5 个水平, 每个处理进行 3 次重复, 按照流程制备 LBL 可食性涂层。因素水平表如表 1 所示。

变化情况。

1.4 指标测定

待蓝莓成膜完全后, 将蓝莓置于保鲜盒中于(20±1) °C 的室温下贮藏, 在贮藏的第 10 d 测定失重率和糖酸比。失重率的测定采取称量法^[20], 糖酸比用糖酸一体机测定。

1.5 统计分析

试验结果均以平均值±标准偏差表示, 采用 Origin 2018 绘图软件绘图, 用 IBM SPSS Statistics 23 软件对数据进行统计学分析, 并进行 Tuckey 差异分析($P<0.05$ 表示差异显著)。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 壳聚糖浓度对蓝莓失重率和糖酸比的影响

贮藏 10 d 时, 蓝莓的失重率随 CS 浓度的增加不断下降, 在 8 mg/mL 时达到最小值(18.31±1.77)%, 但各个处理之间没有显著性差异($P>0.05$)。蓝莓的糖酸比随着 CS 浓度

的增加先下降后上升,当 CS 浓度为 4 mg/mL 时,蓝莓的糖酸比达到最大值,为(26.65±0.29)%。当 CS 浓度继续增加时,蓝莓的糖酸比迅速下降($P<0.05$),当 CS 浓度为 6 和 8 mg/mL 时,蓝莓的糖酸比分别为(21.61±0.31)%和(21.19±0.17)%($P>0.05$),但显著低于其他 3 组($P<0.05$)。壳聚糖本身具有抑菌性,可以抑制或杀灭水果表面的多种病原菌,还可以提高果实细胞内抗性酶的活性,从而达到保鲜水果的目的^[21]。CS 浓度适中时所制成的可食性涂层厚度较为均匀,致密性较强,而 CS 浓度过高时,水果表面的涂层过厚,不利于水果的呼吸作用,影响保鲜效果。因此应选择 CS 浓度为 6、8 和 10 mg/mL 进行后续的正交试验。

2.1.2 羧甲基纤维素钠浓度对蓝莓失重率和糖酸比的影响

贮藏 10 d 时,各个处理组蓝莓的失重率没有显著差别($P>0.05$),但蓝莓糖酸比随着 CMC-Na 的浓度呈现先显著下降($P<0.05$)再显著上升($P<0.05$)。当 CMC-Na 浓度最低时,蓝莓的糖酸比为(36.88±0.12)%,而随着 CMC-Na 浓度的升高,蓝莓的糖酸比不断下降,当 CMC-Na 浓度为 8 mg/mL 时,蓝莓贮藏 10 d 后的糖酸比最低,为(18.82±0.21)%,之后继续升高 CMC-Na 浓度,蓝莓的糖酸比上升。蓝莓的失重率呈现类似的趋势,但此趋势不具统计学差异,当 CMC-Na 浓度为 10 mg/mL 时,失重率最小,为(21.92±0.42)%。当 CMC-Na 浓度过大时,成膜液过于黏稠,会造成可食性涂层不均匀而且气泡较多,影响蓝莓的保鲜效果。综上所述,当 CMC-Na 浓度为 8 mg/mL 时,蓝莓的保鲜效果较好。因此,选择 CMC-Na 浓度为 6、8 和 10 mg/mL 进行后续的正交试验。

2.1.3 甘油浓度对蓝莓失重率和糖酸比的影响

贮藏 10 d 时,各个处理组蓝莓的失重率没有显著差别($P>0.05$),当甘油浓度为 0.07 mL/mL 时,蓝莓的失重率最低,为(19.99±2.79)%。蓝莓糖酸比随着甘油浓度的增加呈现先显著下降($P<0.05$)再显著上升($P<0.05$),甘油浓度为 0.07 mL/mL 时,蓝莓糖酸比仅为(17.56±0.14)%,与其他处理均有显著差别($P<0.05$)。当甘油浓度升高到 0.11 mL/mL 后,甘油浓度的增加对蓝莓的糖酸比影响不显著,甘油浓度为 0.11 和 0.13 mL/mL 时,蓝莓的糖酸比分别为(33.39±0.5)%和(33.74±0.12)%。甘油是亲水的小分子物质,可以进入涂层的分子链间,减小分子间的相互作用力,从而减低涂层的抗拉伸强度,防止涂层的干裂现象^[21],但是当甘油浓度过大时,涂层的透光率降低,保鲜效果也会降低^[15]。因此采用甘油浓度为 0.06、0.07 和 0.08 mL/mL 进行后续的正交试验。

2.1.4 晾干时间对蓝莓失重率和糖酸比的影响

晾干时间是指蓝莓在 CMC-Na 溶液中浸泡后的晾干时间,当晾干时间短的时候蓝莓表面的羧甲基纤维素钠残留量较多,再浸泡在壳聚糖中有损失,保鲜效果降低,而随着晾干时间的增长,蓝莓表面的羧甲基纤维素钠薄膜形

成较好,再与壳聚糖形成完美的层层自组装涂层,具有良好的保鲜效果。因此,这一因素会影响双层涂膜连接的效果,从而对蓝莓保鲜产生影响。贮藏 10 d 时,随着 CMC-Na 涂层晾干时间的增加,蓝莓失重率和糖酸比都呈现先下降后上升的变化趋势。当晾干时间为 40 min 时,蓝莓的失重率和糖酸比均为最低,分别是(19.05±2.24)%和(24.44±0.25)%,糖酸比显著低于其他处理组($P<0.05$),但各个处理的失重率之间没有显著差别($P>0.05$),因此可以判断晾干时间 40 min 时为较优水平。因此,选择晾干时间为 30、40 和 50 min 进行后续正交试验。

2.2 正交试验

以失重率和糖酸比作为考察指标,对正交试验的结果进行分析。正交试验结果和方差分析见表 3~4。

正交试验的方差分析结果表明,所选择的 4 个因素对 LBL 可食性涂层对蓝莓的失重率均没有显著影响,但是对蓝莓的糖酸比均具有极其显著的影响。根据正交试验直观结果的极差分析表明:这 4 个因素对失重率和糖酸比的影响顺序分别为 $D>A>C>B$ 和 $B>D>A>C$,由于 C 因素和 D 因素对失重率和糖酸比最优的条件均为 C_3D_1 ,而 A 因素对失重率的影响次序排第 2 位,最优水平为 A_3 ,B 因素对糖酸比的影响次序排第 1 位,最优水平为 B_1 ,因此结合两者的结果来看,应该选择 $A_3B_1C_3D_1$ 为最优工艺。故而,层层自组装常温保鲜蓝莓的最佳工艺条件为 $A_3B_1C_3D_1$,即 CS 浓度为 6 mg/mL、CMC-Na 浓度为 10 mg/mL、甘油浓度为 0.06 mL/mL、晾干时间 50 min,后续进行验证试验证明。

2.3 验证试验

从图 2 可以看出,在贮藏期间,除储藏 9 d 时,经单层 CS、单层 CMC-Na 处理的蓝莓失重率与无菌水处理组无显著性差异外($P<0.05$),其余各组蓝莓在储藏期间的失重率均显著低于无菌水处理($P>0.05$),其中,LBL 可食性涂层处理的蓝莓的失重率最低,在贮藏 12 d 时为(23.97±2.64)%,但与单层 CS 和单层 CMC-Na 处理组不存在显著性差异($P>0.05$),而无菌水处理组在贮藏第 6 d 时,失重率已经达到了(22.80±1.49)%,贮藏 12 d 时,无菌水处理组失重率已高达(33.04±3.39)%。在第 9 d 时,CK 组蓝莓糖酸比高于适宜范围,CMC 和 CS 组在第 12 d 时糖酸比才高于适宜范围,而 LBL 处理组蓝莓的糖酸比一直在适宜范围内。值得注意的是,LBL 处理组蓝莓的腐烂率仅仅在贮藏 3 d 时高于其他处理组,这可能是由于在涂膜过程中破坏了蓝莓,之后由于外部条件的污染,CK 组蓝莓的腐烂率不断增加,且显著高于各涂层处理组($P<0.05$)。蓝莓的硬度也呈现跟失重率和腐烂率类似的趋势,虽然在整个贮藏期呈现不断下降的趋势,但是 LBL 处理组却显著优于其他处理组。由此可见,层层自组装可食性涂层可以更好地保鲜蓝莓。

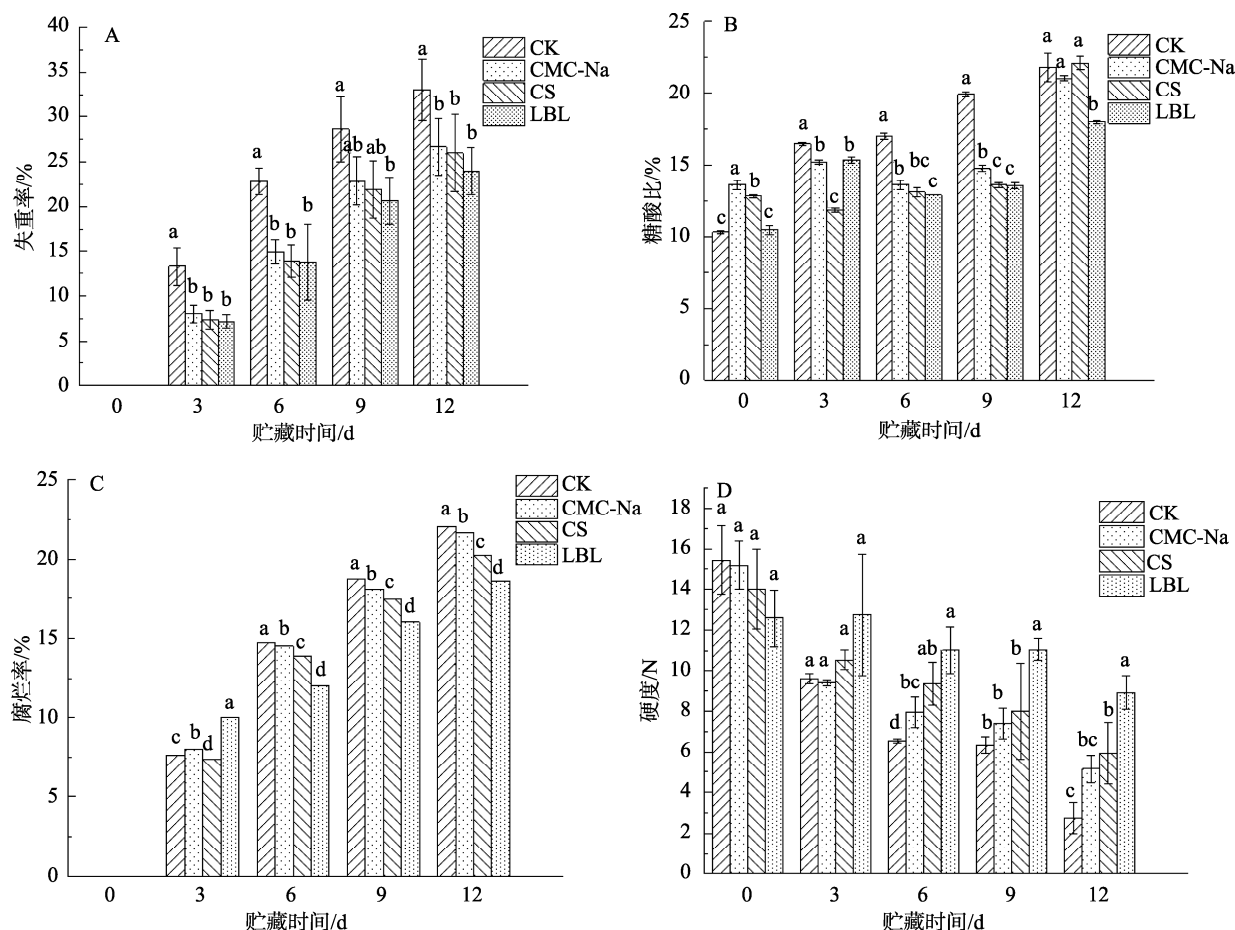
表 3 正交试验结果
Table 3 Results of orthogonal test

试验号	A 晾干时间/min	B CS 浓度/(mg/mL)	C CMC-Na 浓度/(mg/mL)	D 甘油浓度/(mL/mL)	失重率/%	糖酸比/%
1	1	1	1	1	17.06±1.22	31.19±0.72
2	1	2	2	2	17.97±0.65	39.70±0.00
3	1	3	3	3	17.19±0.23	41.37±0.17
4	2	1	2	3	18.78±3.39	28.31±0.34
5	2	2	3	1	16.68±1.82	26.62±0.31
6	2	3	1	2	19.36±0.47	37.80±0.64
7	3	1	3	2	17.25±3.24	28.44±0.00
8	3	2	1	3	17.49±3.75	40.43±0.74
9	3	3	2	1	16.42±0.77	31.14±0.14
失重率/%	k1	17.40	17.69	17.97	16.72	
	k2	18.27	17.38	17.72	18.19	
	k3	17.05	17.66	17.04	17.82	
	极差 R	1.22	0.31	0.93	1.47	
	影响顺序	D>A>C>B				
糖酸比/%	最优组合	A ₃ B ₂ C ₃ D ₁				
	k1	37.42	29.31	36.47	29.65	
	k2	30.91	35.58	33.05	35.31	
	k3	33.34	36.77	32.15	36.71	
	极差 R	6.51	7.46	4.32	7.06	
	影响顺序	B>D>A>C				
	最优组合	A ₂ B ₁ C ₃ D ₁				

表 4 正交试验结果方差分析
Table 4 Analysis of variance of orthogonal test results

因素	平方和	自由度	均方	F	显著性
失重率/%	晾干时间	7.128	2	3.564	0.760
	CS 浓度	0.528	2	0.264	0.056
	CMC-Na 浓度	4.224	2	2.112	0.450
	甘油添加量	10.627	2	5.313	1.133
	误差	84.443	18	4.691	
	总计	106.95	26		
糖酸比/%	晾干时间	194.768	2	162.986	526.88
	CS 浓度	289.003	2	13.567	43.858
	CMC-Na 浓度	93.681	2	61.957	200.288
	甘油添加量	251.349	2	239.514	774.272
	误差	3.452	18	0.309	
	总计	832.253	26		

注: **表示影响极显著, P<0.01。



注: A~D 分别为蓝莓失重率、糖酸比、腐烂率和硬度在储藏期间随着时间的变化; a~d: 标注不同字母表示同一指标不同组间具有显著性差异, $P < 0.05$; 标注相同字母表示同一指标不同组间无显著差异, $P > 0.05$ 。

图2 不同处理的蓝莓贮藏期间的品质变化($n=12$)

Fig.2 Quality changes of blueberries with different treatments during storage ($n=12$)

3 结论与讨论

蓝莓保鲜一直是各学者关注的热点, 马江林等^[23]综述了超声波与微酸性电解水在食品杀菌保鲜中的应用进展, 然而该技术在大规模推广应用中面临许多挑战, 因此急需开发更为有效的保鲜方法。本研究在参考前人用层层自组装可食性涂层对水果保鲜效果的基础上, 将可食性涂层应用于蓝莓鲜果的保鲜上。通过正交试验优选对层层自组装可食性涂层保鲜蓝莓的工艺参数进行探索, 研究表明, 最佳工艺参数为: CS 浓度为 6 mg/mL、CMC-Na 浓度为 10 mg/mL、甘油浓度为 0.06 mL/mL、晾干时间 50 min, 采取先在羧甲基纤维素钠中浸泡, 再在壳聚糖溶液中浸泡的浸泡顺序。采取这种方式处理的 LBL 可食性涂层在一定程度上保持其贮藏品质, 对于延长蓝莓的保鲜期有一定的效果。

一般情况下, 蓝莓采后极易受到微生物的侵染, 保存时间较短, 尤其是在 20 °C 左右的室温下, 蓝莓的呼吸强度增强, 影响果品品质及贮藏性能。通过层层自组装可食性

涂层, 延长了蓝莓的保鲜时间, 经过涂层的蓝莓可以在室温下贮藏 12 d 左右。但是由于蓝莓在涂层过程中容易对蓝莓的表面造成伤害, 导致蓝莓贮藏初期的品质低于没有经过处理的蓝莓, 但是在贮藏后期, 涂层可以很好地保护蓝莓果实免受微生物的侵染, 延长货架期, 因此 LBL 可食性涂层在果蔬保鲜方面具有广阔的应用前景, 可以进一步研究层层自组装可食性涂层与其他保鲜方法的联用以用于保鲜果蔬。

参考文献

- [1] 李亚东, 裴嘉博, 孙海悦. 全球蓝莓产业发展现状及展望[J]. 吉林农业大学学报, 2018, 40(4): 421-432.
LI YD, PEI JB, SUN HY. Status and prospect global blueberry industry [J]. J Jilin Agric Univ, 2018, 40(4): 421-432.
- [2] WANG C, GAO Y, TAO Y, *et al.* Influence of γ -irradiation on the reactive-oxygen metabolism of blueberry fruit during cold storage [J]. Innov Food Sci Emerg, 2017. DOI: 10.1016/j.ifset.2017.04.007
- [3] CELIKF, BOZHUYUK MR, ERCISLI S, *et al.* Physicochemical and bioactive characteristics of wild grown bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.)

- genotypes from northeastern Turkey [J]. Not Bot Horti Agrobot, 2018, 46(1): 128–133.
- [4] MJOSE JP, ADELA S, BELEN G, *et al.* Comparative study of red berry pomaces (blueberry, red raspberry, red currant and blackberry) as source of antioxidants and pigments [J]. Eur Food Res Technol, 2019. DOI: 10.1007/s00217-018-3135-z
- [5] 李亚东, 裴嘉博, 陈丽, 等. 2020 中国蓝莓产业年度报告[J]. 吉林农业大学学报, 2021, 43(1): 1–8.
- LI YD, PEI JB, CHEN L, *et al.* China blueberry industry report 2020 [J]. J Jilin Agric Univ, 2021, 43(1): 1–8.
- [6] LI, JAMES, HE, *et al.* Effect of hypobaric treatment on the quality and reactive oxygen species metabolism of blueberry fruit at storage [J]. CyTA-J Food, 2019, 17(1): 937–948.
- [7] JI Y, HU W, JIANG A, *et al.* Effect of ethanol treatment on the quality and volatiles production of blueberries after harvest [J]. J Sci Food Agric, 2019, 99(14): 6296–6306.
- [8] TOTADM G, SHARMAR R, SETHI S, *et al.* Effect of edible coatings on ‘Misty’ blueberry (*Vaccinium corymbosum*) fruits stored at low temperature [J]. Acta Physiol Plant, 2019, 41(12): 1–7.
- [9] 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 YR, HU WZ, LIAO J, *et al.* Research progress on postharvest physiology and pathology of blueberry and preservation technology [J]. Food Ferment Ind, 2019, 45(18): 263–269.
- [10] MARCOS C, JOSEBA I, TEODORO AG, *et al.* Layer-by-layer assembly of polymersomes and polyelectrolytes on planar surfaces and micro-sized colloidal particles [J]. J Colloid Interf Sci, 2014, 421(9): 132–140.
- [11] CRISTINA BS, CHIOU BS, PUNOTAI K, *et al.* Layer-by-layer alginate and fungal chitosan based edible coatings applied to fruit bars [J]. J Food Sci, 2018, 83(7): 1880–1887.
- [12] CHEN FY, ZHANG JL, CHEN CK, *et al.* Chitosan-based layer-by-layer assembly: Towards application on quality maintenance of lemon fruits [J]. Adv Polym Technol, 2020, 1–10.
- [13] YAN JW, LUO ZS, BAN ZJ, *et al.* The effect of the layer-by-layer (LBL) edible coating on strawberry quality and metabolites during storage [J]. Postharvest Biol Technol, 2019. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2018.09.002
- [14] 杨皓月, 滕玉红, 李欣悦, 等. 明胶/壳聚糖层层自组装涂层对樱桃柿子保鲜效果研究[J]. 数字印刷, 2021, (2): 83–90.
- YANG HY, TENG YH, LI XY, *et al.* Study on the controllable preparation of gelatin/chitosan lbl film and its fresh-keeping property for cherry persimmon [J]. Digit Print, 2021, (2): 83–90.
- [15] 刘雪帆. 层层自组装可食用保鲜涂层的制备及应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- LIU XF. Fabrication and applications of layer-by-layer edible fresh-keeping coatings [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [16] MAYRA ZTG, SANTOS G, NORMA H, *et al.* Layer-by-layer edible coatings based on mucilages, pullulan and chitosan and its effect on quality and preservation of fresh-cut pineapple (*Ananas comosus*) [J]. Postharvest Biol Technol, 2017. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2017.01.007
- [17] ARNON H, GRANIT R, PORAT R, *et al.* Development of polysaccharides-based edible coatings for citrus fruits: A layer-by-layer approach [J]. Food Chem, 2015. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.06.061
- [18] 卫赛超, 谢晶. 四种涂膜材料在芒果贮藏保鲜中的应用研究进展[J]. 包装工程, 2020, 41(11): 64–71.
- WEI SC, XIE J. Advances in application of four coating materials in storage and preservation of mango [J]. Packag Eng, 2020, 41(11): 64–71.
- [19] 陈佩华. 魔芋葡甘聚糖/壳聚糖可食性复配膜性质及其应用研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2011.
- CHEN PH. Study on the property and application of the edible membrane of konjac glucomannan/chitosan blends [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2011.
- [20] 黄晓杰. 采后处理对蓝莓果实衰老的作用及机理研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- HUANG XJ. Effect and mechanism of postharvest treatments on senescence of blueberry fruits [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016.
- [21] 沈婷婷. 壳聚糖在水果保鲜中的应用研究进展[J]. 保鲜与加工, 2017, 17(3): 133–138.
- SHEN TT. Application of chitosan in fruit preservation [J]. Storage Process, 2017, 17(3): 133–138.

(责任编辑: 郑丽 张晓寒)

作者简介



张楠, 硕士研究生, 主要研究方向为小浆果加工与贮藏。

E-mail: 1084854521@qq.com



卢敏, 博士, 教授, 主要研究方向为谷物贮藏与加工。

E-mail: 1299625439@qq.com



侯聚敏, 博士, 讲师, 主要研究方向为小浆果加工与贮藏。

E-mail: houjm@ccu.edu.cn