

张春洁, Mohamed Hawali Bata Gouda, 王俊豪, 等. 海藻酸钠复合天然化学物质涂膜对鲜切莲藕保鲜效果的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(1): 175-184.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.01.023

## 海藻酸钠复合天然化学物质涂膜对鲜切莲藕保鲜效果的影响

张春洁, Mohamed Hawali Bata Gouda, 王俊豪, 彭思佳, 孔晓雪, 张秋婷, 罗海波  
(南京师范大学食品与制药工程学院, 江苏 南京 210023)

**摘要:** 利用响应面法优化鲜切莲藕复合涂膜保鲜剂。根据不同保鲜剂的功能特性, 选择 7 种保鲜剂(L-半胱氨酸、柠檬酸、草酸、L-精氨酸、海藻酸钠、亚麻籽胶、壳聚糖), 考察不同质量分数保鲜剂对鲜切莲藕色泽的影响。以此单因素试验结果为基础, 采用 Design-Expert.V8.0.6.1 软件进行响应面试验方案设计。结果表明, 所选 7 种保鲜剂均可显著( $P < 0.05$ )延缓鲜切莲藕表面褐变; 鲜切莲藕复合涂膜保鲜剂最佳组合为: 0.50% 海藻酸钠+0.27% L-半胱氨酸+0.76% 柠檬酸。在此条件下鲜切莲藕贮藏 12 d 后色差值为 1.86, 菌落总数为  $2.69 \times 10^5$  CFU/g, 与回归方程预测值相近。表明海藻酸钠复合 L-半胱氨酸和柠檬酸涂膜处理可有效延缓鲜切莲藕表面褐变和微生物腐败, 维持较好的鲜切莲藕商品品质。

**关键词:** 鲜切莲藕; 涂膜保鲜剂; 品质; 货架寿命

中图分类号: TS255.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2021)01-0175-10

## Effects of sodium alginate and natural chemical composite coating on quality of fresh-cut lotus root during storage

ZHANG Chun-jie, BATA GOUDA Mohamed-hawali, WANG Jun-hao, PENG Si-jia, KONG Xiao-xue, ZHANG Qiu-ting, LUO Hai-bo

(School of Food Science and Pharmaceutical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** The response surface method was used to optimize the compound coating antistaling agent of fresh-cut lotus root. According to the functional characteristics of different preservatives, seven kinds of preservatives were selected to investigate the effects of preservatives with different mass ratios on the color of fresh-cut lotus root. Based on the single factor test results, Design-Expert.V8.0.6.1 software was used to analyze the response surface test design. The results showed that the seven preservatives could significantly ( $P < 0.05$ ) delay the surface browning of fresh-cut lotus root, and the optimal combination of compound coating antistaling agent was 0.50% sodium alginate, 0.27% L-cysteine, 0.76% citric acid. Under these conditions, the color difference value and the total number of colonies were 1.86 and  $2.69 \times 10^5$  CFU/g after 12 days of fresh-cut lotus root storage, which was similar to the predicted value of the regression equation. Sodium alginate combined with L-cysteine and citric acid coating can effectively delay the surface browning and microbial spoilage of fresh-cut lotus root and maintain the good quality of fresh-cut lotus root.

**Key words:** fresh-cut lotus root; coating antistaling agent; quality; shelf-life

收稿日期: 2020-05-05

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(211040B31701); 南京师范大学引进人才(五类)科研启动项目(184080H202B117)

作者简介: 张春洁(1997-), 女, 江苏南京人, 硕士研究生, 研究方向为食品工程。(E-mail) zhangchunjie1881@163.com

通讯作者: 罗海波, (E-mail) luohaibo\_1216@126.com

莲藕外观洁白、口感脆爽、营养丰富, 是中国重要的水生蔬菜之一<sup>[1]</sup>。莲藕不仅有较高的食用价值, 也有相当高的药用价值, 是药食同源型食品, 具

有清热生津、止呕止渴、益血补心、健脾益气之功效<sup>[2]</sup>。鲜切莲藕是将新鲜莲藕进行清洗、整修、去皮、切分、护色、包装等加工流程,保持莲藕的风味及新鲜态,供消费者即食或餐饮业使用的一种新式加工产品<sup>[3]</sup>。但是,将新鲜莲藕切分后,莲藕的呼吸速率提高,衰老加速。切分还会引发一系列生理生化变化,使微生物侵染的概率大大提高,具体表现有颜色劣变、硬度下降及风味恶化等,导致莲藕品质和食用安全性降低<sup>[4]</sup>,其中褐变和微生物侵染是导致鲜切莲藕货架期品质下降的主要原因。因此,探究鲜切莲藕的褐变机理和微生物污染的情况,对于提高鲜切莲藕食用安全性及延长货架期有重要意义。

关于鲜切莲藕的保鲜方法,目前采取较多的是物理化学方法。其中常见的有清洗消毒、气调、辐照及化学药剂浸泡等,这些方法对于有效延缓鲜切蔬菜褐变的发生,维持鲜切蔬菜的品质,均有较好的效果。何萌等<sup>[5]</sup>从清洗消毒的角度研究了酸性氧化电解水对鲜切莲藕的保鲜效果,结果显示鲜切莲藕的货架期延长至 15 d,且 15 d 后检测菌落总数未超过  $1 \times 10^5$  CFU/g,色泽依然良好,多酚氧化酶(PPO)和过氧化物酶(POD)的活性低,营养成分含量损失少于 30%,表明酸性氧化电解水在杀灭鲜切莲藕表面的微生物以及维持色泽等方面有着良好的效果。Ding 等<sup>[6]</sup>向低密度聚乙烯(LDPE)包装材料中加入了纳米 ZnO 和纳米 Ag,用这种纳米包装材料包装鲜切藕片,显著抑制了酵母菌的生长,维持了色泽,减缓了鲜切莲藕组织衰老,将鲜切莲藕的货架期延长至 9 d。方凌等<sup>[7]</sup>研究发现,先将鲜切莲藕采用真空包装,再进行 0.3 kGy  $^{60}\text{Co}\gamma$  辐照处理,鲜切莲藕在之后的 12 d 内,亮度值和硬度与对照组相比,保持在较高的水平,营养物质损失也较少。Zhang 等<sup>[8]</sup>研究证明,CO 处理后的鲜切莲藕货架期明显延长,CO 有效抑制了鲜切莲藕的褐变,减少丙二醛(MDA)的积累,并且抑制 PPO 和 POD 活性。但是这些方法也存在设备昂贵、成本高、操作费时费力以及化学药剂残留等问题,因而有一定的局限性。

近年来,涂膜保鲜因为成本低廉,操作方法简便,已经成为最广泛的保鲜手段。涂膜是采用浸渍、涂抹、喷洒等方式将选择的被膜剂覆盖在食品表面(或内部),形成一层薄薄的膜,可以有效减少水分挥发和营养流失<sup>[9]</sup>。因此涂膜有限制气体交换、控制呼吸、抑制微生物侵入、减缓果蔬褐变的作用,将

其应用于鲜切果蔬保鲜中有利于产品延长货架期,维持商品价值。目前,涂膜保鲜已成功应用于辽西大枣<sup>[10]</sup>、菠萝蜜<sup>[11]</sup>、木瓜<sup>[12]</sup>、富士苹果<sup>[13]</sup>等鲜切果蔬保鲜。Zhou 等<sup>[14]</sup>用魔芋葡聚糖单独处理鲜切莲藕,发现其可以通过提高抗氧化活性和抑制酚类物质降解来延缓鲜切莲藕氧化褐变,延长其货架期。黄杨敏等<sup>[15]</sup>用魔芋葡聚糖、黄原胶和植酸制作复合涂膜,用来处理鲜切莲藕,发现这种复合涂膜处理在延缓鲜切莲藕褐变方面有良好的效果,同时能有效提高其抗氧化能力。祝美云等<sup>[16]</sup>研究发现壳聚糖、海藻酸钠和黄原胶的复合涂膜也有显著保鲜效果。于有伟等<sup>[17]</sup>报道采用 1% (质量分数)壳聚糖和 1% (质量分数)植酸复合涂膜可以有效减少 MDA 的积累,减缓褐变。以上关于鲜切莲藕的研究较少涉及微生物方面,未能体现涂膜材料的抑菌性,溶解壳聚糖的乙酸会对鲜切莲藕品质产生一定影响。与常见的涂膜材料壳聚糖、淀粉、明胶、黄原胶等相比,从藻类中提取的海藻酸钠来源更加丰富广泛,原料成本和提取成本均较低,海藻酸钠具有独特的胶体性质和抑制腐败的特性。

本研究采用不同质量分数的 L-精氨酸、L-半胱氨酸、草酸、柠檬酸、海藻酸钠、壳聚糖、亚麻籽胶对鲜切莲藕进行保鲜研究,筛选适宜鲜切莲藕保鲜的天然化学物质,进而通过响应面试验优化鲜切莲藕复合涂膜保鲜剂,提高鲜切莲藕食用品质,延长货架期。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

1.1.1 材料 新鲜莲藕购于南京市新港粮油批发市场,立即运回实验室,挑选品种一致、形状正常、大小一致、完整无机械损伤和病虫害的莲藕,备用。

1.1.2 试剂 L-精氨酸、L-半胱氨酸、草酸、柠檬酸、海藻酸钠、壳聚糖、亚麻籽胶均为食品级试剂,次氯酸钠、胰蛋白胨、酵母浸膏、葡萄糖、琼脂粉、氯化钠均为分析纯试剂。以上试剂均为南京峰昌生物科技有限公司产品。

### 1.2 仪器与设备

美能达 CR-200 色差仪,深圳市三利化学品有限公司产品;AUY220 电子分析天平,日本 Shimadzu 公司产品;CJ-2S 超净工作台,天津市泰斯特仪器有限公司产品;LDZX-30FBS 立式蒸汽灭菌锅,上海申

安医疗器械厂产品;LRH-250A 生化培养箱,广东省医疗器械厂产品;Molresearch 1005a 分析型超纯水机,上海摩勒生物科技有限公司产品;GL-88B 漩涡混合器,海门市其林贝尔仪器制造有限公司产品。

### 1.3 方法

1.3.1 单因素试验 样品处理:将挑选好的莲藕用软布在不形成机械伤的前提下轻轻擦拭,自来水冲洗,洗去泥土。切除藕节后去皮,切分成3~5 mm 左右的藕片,立刻置于臭氧消毒过的自来水中。将切分好的藕片分别放入质量分数 0、0.25%、0.50%、0.75%、1.00%的 *L*-精氨酸、*L*-半胱氨酸、草酸、柠檬酸、海藻酸钠、壳聚糖、亚麻籽胶溶液中处理 10 min,取出沥干。用保鲜盒(17.5 cm×10.8 cm×6.8 cm)分别包装,每盒(300±5) g,置于 4 °C 贮藏,每 3 d 用色差仪测定一次色泽。

1.3.2 响应面优化试验 样品处理同方法 1.3.1。根据单因素试验结果,用 Design-Expert. V8.0.6.1 软件中的 Box-Behnken 设计法设计 3 因素 3 水平响应面模型方案(表 1),色泽和菌落总数为响应值,筛选鲜切莲藕的最佳复合涂膜保鲜剂质量分数。

表 1 响应面试验设计因素与水平

Table 1 Factors and levels of response surface experiment

水平	因素		
	海藻酸钠质量分数 (%) (A)	<i>L</i> -半胱氨酸质量分数 (%) (B)	柠檬酸质量分数 (%) (C)
-1	0	0.25	0.50
0	0.25	0.50	0.75
1	0.50	0.75	1.00

1.3.3 色泽测定 用美能达 CR-200 型手持色差仪测定莲藕的  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值。 $L^*$  表示色明度, $L^* = 0$  为黑色, $L^* = 100$  为白色; $a^* +$  表示红色程度, $a^* -$  表示绿色程度; $b^* +$  表示黄色程度, $b^* -$  表示蓝色程度。

1.3.4 菌落总数测定 参考 GB 4789.2-2016《食品微生物学检验:菌落总数测定》<sup>[18]</sup> 方法测定。

### 1.4 数据处理

每个试验处理组均做 3 次重复试验,试验结果表示为平均值±标准差。试验设计采用 Design-Expert. V8.0.6.1 软件中的 Box-Behnken 法,显著性分析采用统计软件 SPSS19.0 (显著水平  $P < 0.05$ ),作图采用 Excel 2016。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同保鲜剂处理对鲜切莲藕外观的影响

图 1 为 7 种不同保鲜剂不同质量分数处理后,莲藕在 4 °C 贮藏 12 d 后的外观情况。由图 1 可见,效果最好的 3 种保鲜剂是海藻酸钠、*L*-半胱氨酸和柠檬酸,外观品质较好,色泽鲜亮,发酵异味不明显;对照组鲜切莲藕已经发生严重的褐变,并有肉眼可见的菌落和浓郁的发酵异味。

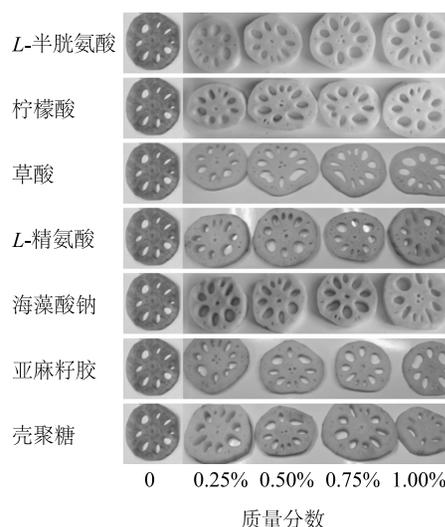


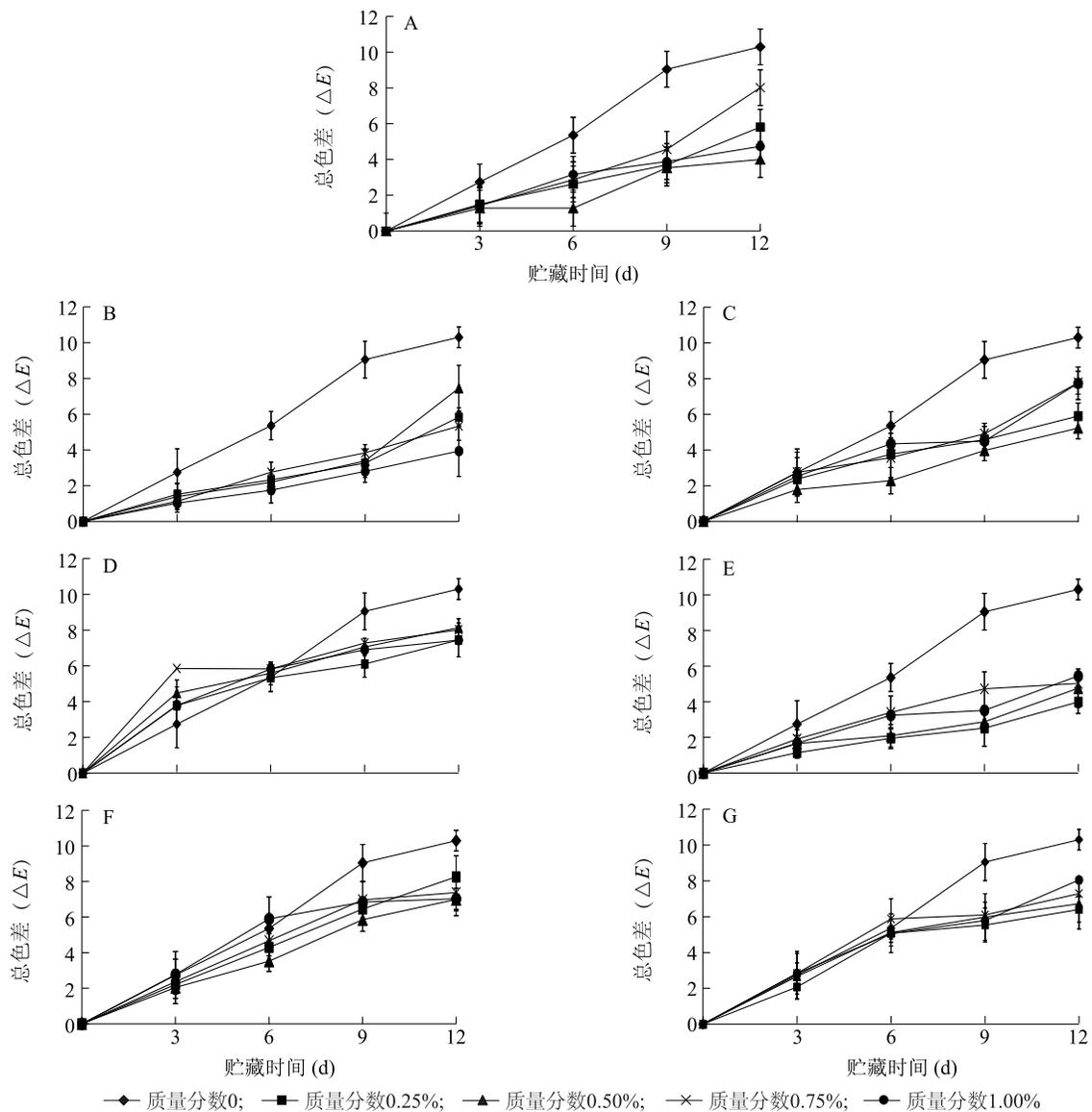
图 1 不同保鲜剂处理对 4 °C 贮藏 12 d 的鲜切莲藕外观品质的影响

Fig.1 Effects of different preservatives on appearance of fresh-cut lotus root after 12 days of storage at 4 °C

### 2.2 不同保鲜剂处理对鲜切莲藕色泽的影响

色泽是评价鲜切产品品质的重要指标之一,通过褐变深浅可以直观地体现出来,直接影响消费者购买欲望和产品的货架期。总色差  $\Delta E$  可以反应色泽的变化情况, $\Delta E$  越大,褐变程度越高, $\Delta E$  越小,褐变程度越小。在 4 °C 贮藏过程中,鲜切莲藕经 7 种不同质量分数保鲜剂处理后  $\Delta E$  值的变化如图 1 所示,表明各保鲜剂均有一定的保鲜效果,但不同保鲜剂保鲜效果存在差异。

由图 2A~2D 可知,随着贮藏时间的延长,不同质量分数的保鲜剂处理组  $\Delta E$  值都逐渐上升,在贮藏的 12 d 内不同质量分数的 *L*-半胱氨酸、柠檬酸和草酸处理  $\Delta E$  值都低于对照组,抑制褐变的护色效果良好。表 2 显示,贮藏 12 d 后,*L*-半胱氨酸处理



A: L-半胱氨酸; B: 柠檬酸; C: 草酸; D: L-精氨酸; E: 海藻酸钠; F: 亚麻籽胶; G: 壳聚糖。

图2 不同保鲜剂单独处理对鲜切莲藕色泽的影响

Fig.2 Effect of single factor treatment with different preservatives on the color change of fresh-cut lotus root

组中 0.50% L-半胱氨酸处理是组内效果最好的,  $\Delta E$  值为  $4.00 \pm 0.63$ ; 柠檬酸处理组中 0.75% 柠檬酸处理是组内效果最优的,  $\Delta E$  值为  $3.94 \pm 1.43$ ; 草酸处理组中 0.50% 草酸处理为组内效果最优的,  $\Delta E$  值为  $5.23 \pm 0.60$ 。这 3 组  $\Delta E$  值均显著 ( $P < 0.05$ ) 低于对照组  $10.30 \pm 1.67$ , L-半胱氨酸和柠檬酸抑制褐变的效果较好, 且两者无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 两者与草酸均有显著差异 ( $P < 0.05$ )。而 L-精氨酸组在 0~6 d 内  $\Delta E$  值超过对照组, 6~12 d 又略低于对照组, 前期表现出加速褐变的作用, 对商品的前期销售价值有不好影响。所以在保鲜剂处理中选择 L-半

胱氨酸和柠檬酸进行响应面实验。

从图 2E~2G 可见, 随着贮藏时间的延长, 不同质量分数的涂膜保鲜剂处理组的  $\Delta E$  值都逐渐上升, 不同质量比的海藻酸钠处理组在贮藏期间  $\Delta E$  值都显著低于对照组 ( $P < 0.05$ ), 而亚麻籽胶和壳聚糖虽然有效果, 但与海藻酸钠处理组相比, 效果较差。由表 2 可知, 贮藏 12 d 后, 0.25% 海藻酸钠处理的护色效果最好,  $\Delta E$  值为  $3.99 \pm 0.64$ , 显著 ( $P < 0.05$ ) 优于 0.50% 亚麻籽胶 ( $6.99 \pm 0.63$ )、0.25% 壳聚糖 ( $6.40 \pm 0.71$ )。所以在涂膜保鲜剂组中, 选择海藻酸钠进行响应面实验。

### 2.3 复合涂膜剂处理对鲜切莲藕色泽和菌落总数的影响

为确定最佳的鲜切莲藕复合涂膜处理,根据单因素试验结果,选取海藻酸钠质量分数(A)、L-半胱氨酸质量分数(B)和柠檬酸质量分数(C)为自变量, $\Delta E(Y_1)$ 和TVC值(菌落总数)( $Y_2$ )作为响应值,采用 Design-Expert.V8.0.6.1 软件中 Box-Behnken

设计试验,并利用软件进行多元回归拟合。试验设计和结果如表 3 所示。拟合得到的二元多项方程为:

$$Y_1 = 3.15 - 2.55A - 1.25B - 0.74C + 1.82AB + 0.46AC - 0.78BC + 2.11A^2 - 0.59B^2 + 2.10C^2, Y_2 = 6.000 - 0.520A + 0.280B + 0.190C + 0.500AB + 0.550AC + 0.019BC - 0.520A^2 + 0.004B^2 + 0.100C^2。$$

表 2 贮藏 12 d 后各浓度保鲜剂处理组总色差

Table 2 The total chromatic aberration of the group treated with different concentrations of preservatives after 12 days of storage

因素	总色差				
	0	0.25%	0.50%	0.75%	1.00%
L-半胱氨酸	10.30±1.67A	5.81±1.54Bbc	4.00±0.63Cd	6.05±0.67Bb	4.74±1.01Cc
柠檬酸	10.30±1.67A	5.38±0.53Cc	7.24±1.28Bab	3.94±1.43Dd	5.33±0.79Cc
草酸	10.30±1.67A	5.90±0.73Cbc	5.23±0.60Cc	7.77±0.64Ba	7.74±0.91Bab
L-精氨酸	10.30±1.67A	7.45±0.94Ba	8.14±0.50Ba	8.02±1.08Ba	7.44±0.56Bab
海藻酸钠	10.30±1.67A	3.99±0.64Cd	4.76±1.08BCed	5.03±0.46Bc	5.44±0.95Bc
亚麻籽胶	10.30±1.67A	8.26±1.19Ba	6.99±0.63Cb	7.38±0.93BCa	7.03±0.96Cb
壳聚糖	10.30±1.67A	6.40±0.71Cb	6.72±1.41Cb	7.29±0.72BCa	8.05±0.58Ba

同一列小写字母不同表示存在显著差异( $P < 0.05$ ),同一行大写字母不同表示存在极显著差异( $P < 0.01$ )。

表 3 响应面试验设计及结果

Table 3 Experimental design and results for response surface analysis

试验号	A:海藻酸钠水平	B:L-半胱氨酸水平	C:柠檬酸水平	$Y_1: \Delta E$	$Y_2: TVC$ 值(CFU/g)
1	0	-1	-1	6.31	$1.21 \times 10^6$
2	0	0	0	3.15	$9.96 \times 10^5$
3	0	0	0	3.15	$9.96 \times 10^5$
4	1	0	1	3.20	$9.89 \times 10^5$
5	-1	0	1	10.88	$9.37 \times 10^5$
6	1	0	-1	2.93	$1.21 \times 10^6$
7	0	0	0	3.15	$9.96 \times 10^5$
8	0	0	0	3.15	$9.96 \times 10^5$
9	-1	0	-1	12.44	$1.81 \times 10^6$
10	0	1	-1	5.31	$1.56 \times 10^6$
11	1	1	0	4.47	$9.05 \times 10^5$
12	0	1	1	1.45	$1.46 \times 10^6$
13	0	0	0	3.15	$9.96 \times 10^5$
14	1	-1	0	3.28	$1.02 \times 10^6$
15	-1	1	0	2.43	$9.01 \times 10^5$
16	-1	-1	0	8.51	$1.00 \times 10^6$
17	0	-1	1	5.57	$9.46 \times 10^5$

$\Delta E$ :总色差;TVC:菌落总数。

## 2.4 鲜切莲藕色差及菌落总数的多元回归模型分析

由表4可知,在试验设计的因素水平范围内,方程的一次项中A对 $Y_1$ 的影响显著( $P < 0.05$ ),B、C对 $Y_1$ 的影响不显著( $P > 0.05$ ),A、B对 $Y_2$ 的影响不显著( $P > 0.05$ ),C对 $Y_2$ 的影响显著( $P < 0.05$ );交互项中,AB、AC、BC对 $Y_1$ 的影响不显著( $P > 0.05$ ),AB、AC、BC对 $Y_2$ 的影响不显著( $P > 0.05$ );二次项中, $A^2$ 、 $B^2$ 、 $C^2$ 对 $Y_1$ 的影响不显著( $P > 0.05$ ), $A^2$ 、 $B^2$ 对

$Y_2$ 的影响不显著( $P > 0.05$ ), $C^2$ 对 $Y_2$ 的影响显著( $P < 0.05$ )。因此,各试验因素对响应值的影响不是简单的线性关系。其中一个回归模型为显著水平( $P < 0.05$ )。两个回归模型的决定系数( $R^2$ )分别为0.8287和0.7635,校正决定系数( $R^2_{Adj}$ )分别为0.6086和0.4593,变异系数分别为39.60%和17.03%。整体而言,回归模型能够满足对鲜切莲藕色差及菌落总数的分析和预测。

表4 回归方程的方差分析

Table 4 Variance analysis of regression equations

方差来源	平方和		自由度	均方和		F值		P值	
	$\Delta E$	TVC		$\Delta E$	TVC	$\Delta E$	TVC	$\Delta E$	TVC
模型	125.23	$8.10 \times 10^{11}$	9	13.91	$9.00 \times 10^{10}$	3.76	2.51	0.047 2*	0.119 1
A	51.92	$3.46 \times 10^{10}$	1	51.92	$3.46 \times 10^{10}$	14.04	0.96	0.007 2*	0.358 7
B	12.53	$5.12 \times 10^{10}$	1	12.53	$5.12 \times 10^{10}$	3.39	1.43	0.108 2	0.270 9
C	4.34	$2.61 \times 10^{11}$	1	4.34	$2.61 \times 10^{11}$	1.17	7.27	0.314 7	0.030 8*
AB	13.21	$4.90 \times 10^7$	1	13.21	$4.90 \times 10^7$	3.57	$1.37 \times 10^{-3}$	0.100 6	0.971 5
AC	0.84	$1.06 \times 10^{11}$	1	0.84	$1.06 \times 10^{11}$	0.23	2.97	0.648 6	0.128 8
BC	2.43	$6.72 \times 10^9$	1	2.43	$6.72 \times 10^9$	0.66	0.19	0.443 9	0.678 0
$A^2$	18.79	$9.10 \times 10^9$	1	18.79	$9.10 \times 10^9$	5.08	0.25	0.058 8	0.629 7
$B^2$	1.47	$2.06 \times 10^8$	1	1.47	$2.06 \times 10^8$	0.4	$5.76 \times 10^{-3}$	0.548 9	0.941 6
$C^2$	18.57	$3.44 \times 10^{11}$	1	18.57	$3.44 \times 10^{11}$	5.02	9.61	0.060 0	0.017 3*
残差	25.88	$2.51 \times 10^{11}$	7	3.70	$3.58 \times 10^{10}$				
失拟项	25.88	$2.51 \times 10^{11}$	3	8.63	$8.36 \times 10^{10}$				
纯误差	0	0	4	0	0				
总差	151.11	$1.06 \times 10^{12}$	16						

A:海藻酸钠质量分数;B:L-半胱氨酸质量分数;C:柠檬酸质量分数。 $\Delta E$ :总色差值;TVC:菌落总数。\*表示存在显著差异( $P < 0.05$ )。

## 2.5 响应面各因素交互作用分析

响应面图反映了2个因素对响应值的交互作用<sup>[19]</sup>。根据二次多项式回归方程,利用Design-Expert 8.06对表4中的数据进行多元回归拟合,得到交互作用的响应面图。图3a和图3b中,随着海藻酸钠和L-半胱氨酸质量分数的增加,总色差值逐渐降低,以此判断海藻酸钠和L-半胱氨酸这2个因素之间的交互作用不显著;图3c和图3d中,随着海藻酸钠和柠檬酸质量分数的增加,总色差值呈现逐渐降低的趋势,等高线图呈偏圆形,表明2个因素之间有一定的交互作用;图3e和图3f中,随着L-半胱氨酸和柠檬酸质量分数的增加,总色差值呈现逐渐降低的趋势,等高线图呈偏圆形,表

明2个因素之间有一定的交互作用。结合表4可知,3因素对色差影响力顺序为:海藻酸钠>L-半胱氨酸>柠檬酸。

图4a和图4b中,随着海藻酸钠和L-半胱氨酸质量分数的增加,TVC值呈现逐渐降低的趋势,判断2个因素之间的交互作用显著;图4c和图4d中,随着海藻酸钠和柠檬酸质量分数的增加,TVC值呈现逐渐降低的趋势,等高线图密集,表明2个因素之间有一定的交互作用;图4e和图4f中,随着L-半胱氨酸和柠檬酸质量分数的增加,等高线图不太密集,表明2个因素之间交互作用不显著。结合表4可知,3因素对TVC值影响力顺序为:海藻酸钠>L-半胱氨酸>柠檬酸。

## 2.6 鲜切莲藕复合涂膜保鲜剂验证试验结果

根据响应面试验结果,综合考虑复合涂膜保鲜剂处理对响应值 $\Delta E$ 和TVC的影响,经Design-Expert.V8.0.6.1软件分析得到最佳复合涂膜保鲜剂组成为0.50%海藻酸钠、0.27%L-半胱氨酸、0.76%柠檬酸,相应的响应面二次模型预测鲜切莲藕色差为

1.74,TVC值为 $8.51 \times 10^5$  CFU/g。选取此最佳复合涂膜保鲜剂组成进行验证,经过3次重复试验得到鲜切莲藕色差为1.86,TVC值为 $2.69 \times 10^5$  CFU/g,与回归方程预测值接近,表明回归模型能够有效对鲜切莲藕贮藏期间色差值及菌落总数进行预测。

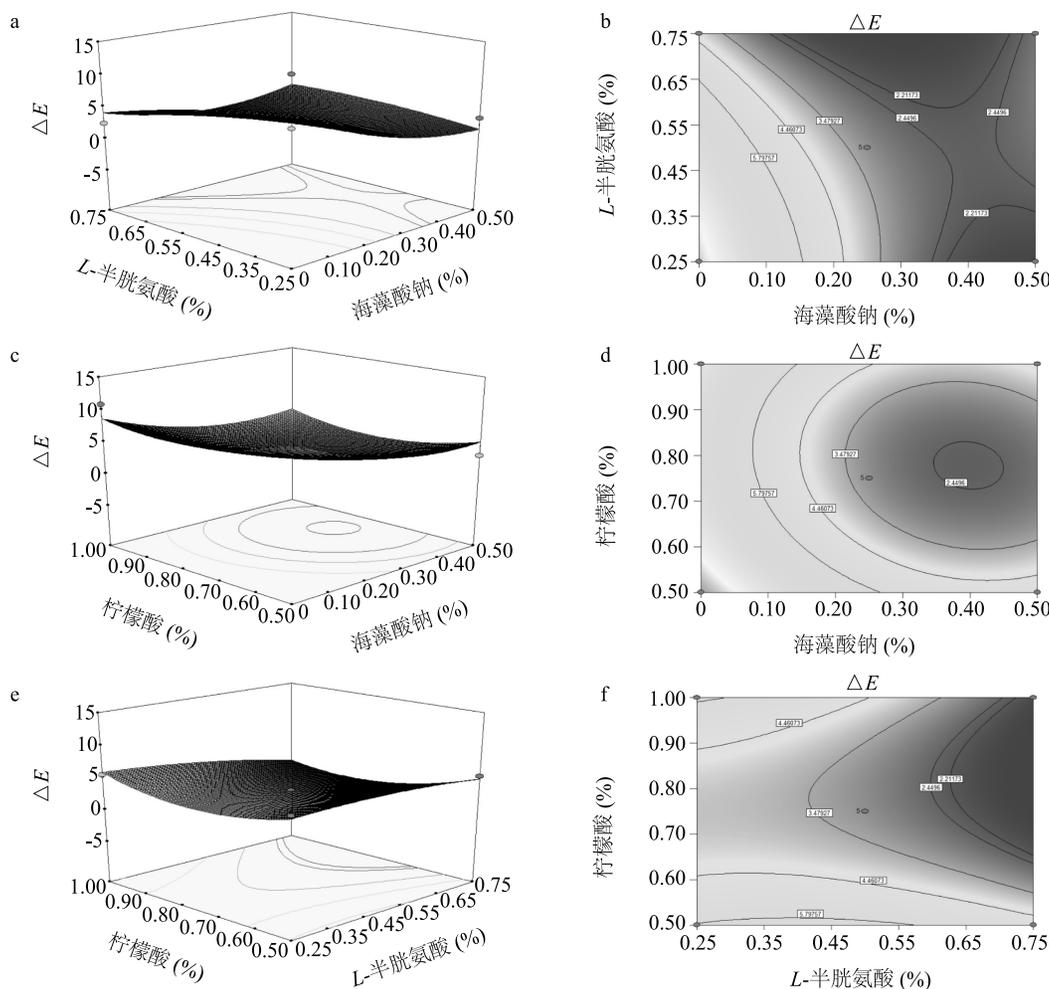


图3 海藻酸钠、L-半胱氨酸和柠檬酸质量分数两两交互作用对鲜切莲藕总色差的影响

Fig.3 Interactive effects of sodium alginate, L-cysteine and citric acid on the total color difference of fresh-cut lotus root

## 3 讨论

褐变是影响鲜切果蔬商品性状的重要因素,褐变严重影响产品的外观,是消费者评估是否购买产品的首要标准,直接影响消费者的消费意愿。涂膜能限制气体交换、控制呼吸、抑制微生物侵入、减缓果蔬褐变,将其应用于鲜切果蔬保鲜中有利于产品延长货架期,维持商品价值。

常见的涂膜保鲜剂有如柠檬酸、壳聚糖、L-半

胱氨酸、海藻酸钠、植酸等。海藻酸钠成膜性良好,安全性高。海藻酸钠吸水溶胀成膜后,可以有效地限制膜内外的气体交换及隔绝微生物。刘晓静等<sup>[20]</sup>研究结果显示,用1.0%海藻酸钠处理莲藕,可以有效抑制莲藕表皮的褐变。刘永等<sup>[21]</sup>研究发现用1.30%海藻酸钠、1.99%甘油和0.26%茶树油处理鲜切苹果,有良好的褐变抑制作用。L-半胱氨酸是组成蛋白质的20种氨基酸之一,天然具有生理功能,有较好的控制褐变能力,常作为食品添加剂应用

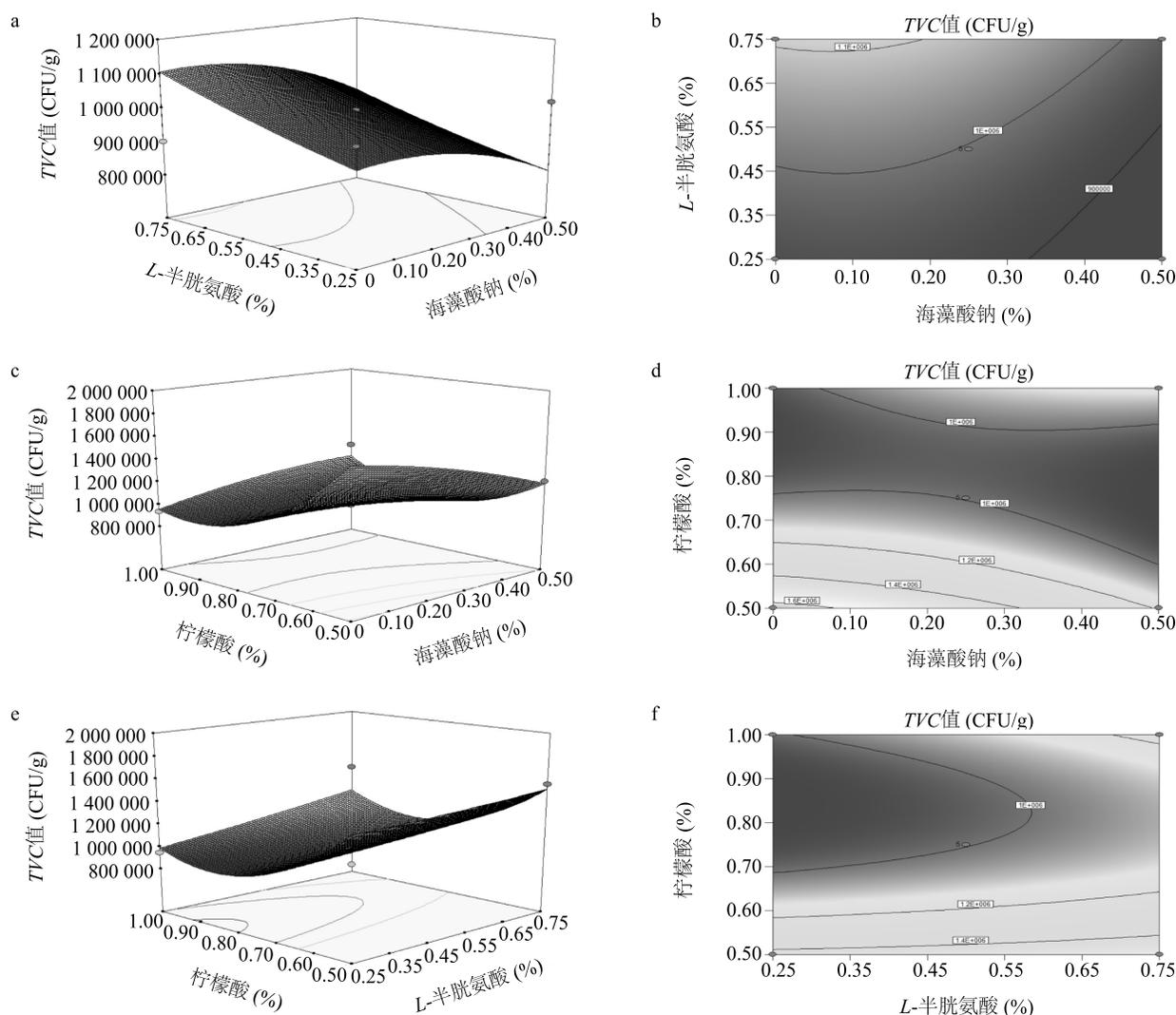


图4 海藻酸钠、L-半胱氨酸和柠檬酸质量分数两两交互作用对鲜切莲藕 TVC 值的影响

Fig.4 Interactive effects of sodium alginate, L-cysteine and citric acid on TVC value of fresh-cut lotus root

于食品加工中<sup>[22]</sup>。Ali 等<sup>[23]</sup>研究认为半胱氨酸作用于多酚氧化酶(PPO),可以高效地抑制 PPO 活性,但其具体作用机理较复杂尚不明确。鲜切苹果组织中有 2 种主要形式的 PPO:膜 PPO 和游离 PPO。半胱氨酸对活性较高的膜 PPO 有很强的抑制作用<sup>[24]</sup>。Perez-Gago 等<sup>[25]</sup>研究了抗氧化剂种类和含量对鲜切苹果保鲜效果的影响,结果表明,以乳清蛋白浓缩液(WPC)和蜂蜡(BW)为被膜剂,制备了可食用复合涂料,向其中加入抗坏血酸和半胱氨酸,其中 1.0%的抗坏血酸和 0.5%半胱氨酸对鲜切苹果的褐变抑制效果较好。陈晨等<sup>[26]</sup>用 0.5 g/L 的半胱氨酸溶液处理鲜切苹果,发现与对照组相比,半胱氨酸在贮藏初期能降低鲜切苹果的 PPO 活性,抑制 MDA 的积累,显著抑制鲜切苹果的褐变。柠檬

酸是目前食品中应用最广泛的酸味剂,酸味剂可通过抑制酶活性来降低褐变速率<sup>[27]</sup>。袁芳等<sup>[28]</sup>研究了不同保鲜剂复合处理对鲜切芒果相关性质的影响,结果显示 10 g/L 柠檬酸和乙二胺四乙酸二钠、异抗坏血酸、氯化钙复配处理能降低 PPO 活性,在贮藏后期抑制 POD 活性,有效抑制鲜切芒果褐变,保持色泽。本试验中,所选 7 种保鲜剂均有一定的延缓鲜切莲藕褐变的效果,其能力大小顺序为 0.75% 柠檬酸> 0.25% 海藻酸钠> 0.50% L-半胱氨酸> 0.50% 草酸> 0.25% 壳聚糖> 0.50% 亚麻籽胶> 1.00% L-精氨酸。

相关研究结果表明,复合保鲜剂效果优于单一保鲜剂。Rojas-Graue 等<sup>[29]</sup>将抗褐变剂 N-乙酰半胱氨酸和谷胱甘肽添加到海藻酸钠和结冷胶基质中,

研究其在鲜切苹果保鲜方面的效果,结果表明,与未添加抗褐变剂的涂膜相比,添加后的涂膜各项理化指标没有明显变化,且抗褐变剂正常发挥效果,对鲜切苹果有较好的保鲜效果。Robles-Sánchez 等<sup>[30]</sup>将抗坏血酸和柠檬酸添加到海藻酸钠中处理鲜切芒果,结果表明,与对照组相比,复合膜可以提高鲜切芒果的抗氧化活性,保持鲜切芒果的各项品质。吴佩等<sup>[31]</sup>用 0.02% V<sub>c</sub>+0.15% CA(柠檬酸)+0.20% NaHSO<sub>3</sub>复合保鲜剂处理鲜切莲藕,在 10℃下,8 d 内鲜切莲藕仍可保持良好的色泽。本试验中最佳复配组成为 0.50% 海藻酸钠+0.27% L-半胱氨酸+0.76% 柠檬酸,经其处理后的莲藕 12 d 内仍维持良好的色泽,表明其复合涂膜保鲜剂对延缓鲜切莲藕的褐变有较好的作用。

微生物生长繁殖是影响鲜切莲藕品质的另一重要因素。莲藕在去皮切分等处理过程中,组织结构受到机械损伤,一方面失去外皮的保护,另一方面与空气接触的面积也增大了,为微生物侵染提供了机会,流出的组织液为微生物提供营养<sup>[32]</sup>,从而导致腐烂,甚至导致食源性疾病<sup>[33-34]</sup>。曹娜等<sup>[35]</sup>对南京市和上海市等地超市销售的鲜切莲藕、土豆、白菜、青椒等多种鲜切产品进行的调查结果表明,鲜切蔬菜菌落总数总体偏高,达到  $1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^8$  CFU/g。目前,国内外科研人员对鲜切蔬菜微生物控制方面的研究已有较多报道。Ansorena 等<sup>[36]</sup>研究结果表明,2%壳聚糖或 0.75%羧甲基纤维素处理鲜切西兰花,在 5℃下贮藏 18 d,菌落总数分别下降至 31.62 CFU/g 和 7.94 CFU/g。Pushkala 等<sup>[37]</sup>研究结果表明,分别用 0.2%壳聚糖、0.2%壳聚糖乳酸盐处理鲜切胡萝卜丝,有利于胡萝卜丝的水分保持,减少褐变率,降低呼吸速率和微生物污染,可在 10℃低温下延长货架期至少 3 d。Sarengaowa 等<sup>[38]</sup>研究结果表明,含百里香油的海藻酸钠基涂膜处理可以延长鲜切哈密瓜 16 d 的货架期。本试验中,鲜切莲藕经 0.50%海藻酸钠+0.27%L-半胱氨酸+0.76%柠檬酸最佳复合涂膜保鲜剂处理,置 4℃贮藏 12 d 时其 TVC 值为  $2.69 \times 10^5$  CFU/g,表明复合涂膜保鲜剂处理对鲜切莲藕的微生物有较好的抑制作用。

## 4 结论

通过试验筛选出对鲜切莲藕护色效果较好的 3 种保鲜剂。在此基础上建立响应面模型,获得鲜切

莲藕的最佳复合涂膜保鲜剂组合为 0.50%海藻酸钠+0.27%L-半胱氨酸+0.76%柠檬酸。验证试验结果显示,4℃下贮藏 12 d 的鲜切莲藕色差值为 1.86,切面洁白,褐变程度低,TVC 值为  $2.69 \times 10^5$  CFU/g,保鲜效果良好。表明海藻酸钠复合 L-半胱氨酸和柠檬酸涂膜处理可有效延缓鲜切莲藕褐变和微生物腐败,维持其较好的品质。

## 参考文献:

- [1] 王国强. 全国中草药汇编[M].北京:人民卫生出版社,1996:56.
- [2] 朱定和,夏文水. 莲藕食品的加工现状与发展[J].食品工业科技,2002,23(8):99-100.
- [3] WANG D, CHEN L, MA Y, et al. Effect of UV-C treatment on the quality of fresh-cut lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) root [J]. Food Chemistry, 2019, 278(4):659-664.
- [4] TOIVONEN P M A, BRUMMELL D A. Biochemical bases of appearance and texture changes in fresh-cut fruit and vegetables[J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 48(1):1-14.
- [5] 何萌,王丹,马越,等. 不同清洗处理对鲜切莲藕贮藏期褐变的影响[J].食品科学,2014,35(18):214-218.
- [6] DING Y, YUN J, LI X, et al. Evaluation of nano-packing on the shelf life of fresh-cut lotus root (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) [J]. Advances in Intelligent and Soft Computing, 2012, 165:775-780.
- [7] 方凌,张继刚,钱世兵,等. <sup>60</sup>Coγ 辐照处理对鲜切莲藕采收后贮藏品质的影响[J].食品工业科技,2016,37(3):334-338.
- [8] ZHANG S, YU Y, XIAO C, et al. Effect of carbon monoxide on browning of fresh-cut lotus root slice in relation to phenolic metabolism[J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 53(2):555-559.
- [9] DAI L, ZHANG J, CHENG F. Cross-linked starch-based edible coating reinforced by starch nanocrystals and its preservation effect on graded Huangguan pears[J]. Food Chemistry, 2020, 311(3):125891.
- [10] 朱丹实,刘贺,励建荣. 壳聚糖/大豆果胶多糖可食性复合膜及 LDPE 膜对辽西大枣贮藏品质的影响[J].中国食品学报,2013,13(4):131-137.
- [11] 姜秋焕,叶盛权,叶春海,等. 壳聚糖涂膜对鲜切菠萝蜜的保鲜作用[J].现代食品科技,2012,28(1):14-17.
- [12] BRASIL I M, GOMES C, PUERTA-GOMEZ A, et al. Polysaccharide-based multilayered antimicrobial edible coating enhances quality of fresh-cut papaya [J]. Food Science and Technology, 2012, 47(1):39-45.
- [13] LI X, LI W, JIANG Y, et al. Effect of nano-ZnO-coated active packaging on quality of fresh-cut 'Fuji' apple [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2011, 46(9):1947-1955.
- [14] ZHOU D, HUANG Y, TU K. Effect of konjac glucomannan coating on antioxidant capacity and phenolic metabolism in fresh-cut

- lotus roots[J]. Journal of Food Processing & Preservation, 2018, 42(9):e13759.
- [15] 黄杨敏,孙 晔,耿思翌,等. 魔芋葡甘聚糖复合涂膜对鲜切莲藕保鲜效果的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(8):266-271.
- [16] 祝美云,党建磊,魏 征,等. 壳聚糖复合涂膜保鲜鲜切莲藕的研究[J]. 食品与机械, 2010, 26(1):145-147.
- [17] 于有伟,李 惠,邸金花,等. 壳聚糖植酸天然复合涂膜对鲜切莲藕保鲜效果的研究[J]. 中国食品学报, 2012, 12(3):131-136.
- [18] 国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局. 食品微生物学检验菌落总数测定: GB 4789.2-2016[S]. 北京:中国标准出版社,2016.
- [19] JIA J, MA H, ZHAO W, et al. The use of ultrasound for enzymatic preparation of ACE-inhibitory peptides from wheat germ protein [J]. Food Chemistry, 2010, 119(1):336-342.
- [20] 刘晓静,黄爱政,康云艳,等. 海藻酸钠和壳聚糖对莲藕贮藏效果及品质的影响[J]. 中国蔬菜, 2013(8):61-65.
- [21] 刘 永,郑丽怡,韦寿莲. 茶树油/海藻酸钠涂膜抑制鲜切苹果褐变的研究[J]. 中国食品添加剂, 2016(12):164-168.
- [22] CABEZAS-SERRANO A B, AMODIO M L, COLELLI G. Effect of solution pH of cysteine-based pre-treatments to prevent browning of fresh-cut artichokes[J]. Postharvest Biology & Technology, 2013, 75:17-23.
- [23] ALI S, KHAN A S, MALIK A U. Postharvest L-cysteine application delayed pericarp browning, suppressed lipid peroxidation and maintained antioxidative activities of litchi fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 121:135-142.
- [24] LIU F, ZHAO J H, GAN Z L, et al. Comparison of membrane-bound and soluble polyphenol oxidase in Fuji apple (*Malus domestica* Borkh. cv. Red Fuji) [J]. Food Chemistry, 2015, 173(15):86-91.
- [25] PEREZ-GAGO M B, SERRA M, DEL RÍO M A. Color change of fresh-cut apples coated with whey protein concentrate-based edible coatings[J]. Postharvest Biology & Technology, 2006, 39(1):84-92.
- [26] 陈 晨,胡文忠,姜爱丽,等. 半胱氨酸控制鲜切苹果褐变的生理机制[J]. 食品科学, 2018, 39(3):282-288.
- [27] 王秋成,吕 芬,高 颖,等. 柠檬酸对鲜切莲藕酶促褐变的影  
响研究[J]. 中国食品添加剂, 2016(8):166-171.
- [28] 袁 芳,邱诗铭,李 丽. 不同保鲜剂复合处理对鲜切芒果活性氧代谢、细胞膜透性和褐变的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(3):218-223.
- [29] ROJAS-GRAUE M A, TAPIA M S, RODRIGUEZ F J, et al. Alginate and gellan-based edible coatings as carriers of antibrowning agents applied on fresh-cut Fuji apples[J]. Food Hydrocolloids, 2007, 21(1):118-127.
- [30] ROBLES-SÁNCHEZ R M, ROJAS-GRAU M A, ODRIOZOLA-SERRANO I, et al. Influence of alginate-based edible coating as carrier of antibrowning agents on bioactive compounds and antioxidant activity in fresh-cut Kent mangoes [J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 50(1):240-246.
- [31] 吴 佩,杨列清,孙 莹,等. 复合护色剂防止鲜切莲藕褐变的研究[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(12):114-116.
- [32] 刘晓燕,何靖柳,胡 可,等. 气调包装对鲜切果蔬安全控制研究进展[J]. 分子植物育种, 2018, 16(2):607-613.
- [33] YARON S, ROMLING U. Biofilm formation by enteric pathogens and its role in plant colonization and persistence[J]. Microbial Biotechnology, 2014, 7(6):496-516.
- [34] ABADIAS M, ALEGRE I, OLIVEIRA M, et al. Growth potential of *Escherichia coli* O157:H7 on fresh-cut fruits (melon and pineapple) and vegetables (carrot and escarole) stored under different conditions[J]. Food Control, 2012, 27(1):37-44.
- [35] 曹 娜,郁志芳. 鲜切蔬菜加工流通期间微生物和化学危险因子的评价[D]. 南京:南京农业大学, 2016.
- [36] ANSORENA M R, MARCOVICH N E, ROURA S I. Impact of edible coatings and mild heat shocks on quality of minimally processed broccoli (*Brassica oleracea* L.) during refrigerated storage [J]. Postharvest Biology & Technology, 2011, 59(1):53-63.
- [37] PUSHKALA R, RAGHURAM P K, SRIVIDYA N. Chitosan based powder coating technique to enhance phytochemicals and shelf life quality of radish shreds [J]. Postharvest Biology & Technology, 2013, 86:402-408.
- [38] SARENGAOWA, HU W, FENG K, et al. Thyme oil alginate-based edible coatings inhibit growth of pathogenic microorganisms spoiling fresh-cut cantaloupe [J]. Food Bioscience, 2019, 32:100467.

(责任编辑:张震林)