

板栗加工过程中褐变控制工艺优化及指标分析

高春慧 苏 玉 刘时瑜 徐志祥

(山东农业大学食品科学与工程学院, 山东 泰安 271018)

摘要: [目的] 解决板栗加工过程中褐变问题。[方法] 以泰山板栗为原材料, 通过单因素试验确定护色工艺条件, 选取褪黑素浓度、苹果酸质量分数、柠檬酸质量分数 3 个因素进行响应面优化试验, 得到最佳护色剂浓度; 通过测定总酚含量、还原糖含量、抗坏血酸含量、丙二醛含量、DPPH 自由基和 ABTS 自由基清除率、含水量, 研究不同处理对板栗理化指标的影响。[结果] 确定护色工艺条件为: 40 °C 护色剂中浸泡 60 min, 100 °C 护色剂中煮制 10 min; 护色剂配比为: 褪黑素浓度 0.5 mmol/L, 苹果酸质量分数 0.87%, 柠檬酸质量分数 1.08%; 确定的护色工艺可有效降低板栗褐变指数, 提高 L^* 值, 褐变抑制效果良好; 同时会使总酚含量、还原糖含量、抗坏血酸含量、DPPH 自由基和 ABTS 自由基清除率升高, 降低丙二醛含量, 含水量差异不明显。[结论] 采用的护色工艺可有效抑制板栗加工过程中的褐变。

关键词: 板栗; 褐变; 柠檬酸; 苹果酸; 褪黑素; 护色工艺; 理化指标

Optimization of browning control process in chestnut processing and analysis of its indicators

GAO Chunhui SU Yu LIU Shiyu XU Zhixiang

(College of Food Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract: [Objective] To address the browning issue during chestnut processing. [Methods] Taishan chestnuts were used as the raw materials. The color protection process conditions were determined through a single-factor experiment. Three factors-melatonin concentration, malic acid mass fraction, and citric acid mass fraction-were selected for a response surface optimization experiment to determine the optimal concentrations of the color protection agents. The effects of different treatments on the physicochemical properties of the chestnuts were assessed by measuring the total phenol content, reducing sugar content, ascorbic acid content, malondialdehyde content, DPPH and ABTS free radical scavenging rates, and water content. [Results] The optimal color protection process conditions were determined as follows: soaking in the color protection agent at 40 °C for 60 min, followed by boiling in the color protection agent at 100 °C for 10 min. The optimal concentrations of the color protection agents were: melatonin at 0.5 mmol/L, malic acid at 0.87%, and citric acid at 1.08%. The determined color protection process effectively reduced the browning index of the chestnuts, increased the L^* value, and demonstrated good browning inhibition. Additionally, the total phenol content, reducing sugar content, ascorbic acid content, and DPPH and ABTS free radical scavenging rates increased, while malondialdehyde content decreased. There was no significant difference in water content. [Conclusion] The adopted color protection process can effectively inhibit browning during chestnut processing.

Keywords: chestnut; browning; citric acid; malic acid; melatonin; color protectant; physical and chemical indicators

板栗 (*Castanea mollissima*), 又名栗子, 属壳斗科, 是一种特色坚果作物, 已有数千年的栽培历史^[1]。中国是世界上最大的板栗生产和出口国, 年产量约占世界总产量的 70%^[2]。板栗因其较高的营养价值与细腻的口感深受消费者喜爱。然而板栗在加工过程中极易发生褐变, 严重影响了板栗产品的感官品质, 极大地制约了板栗产业

的发展^[3]。目前, 常用的褐变抑制技术有辐照、微波、臭氧、包装、热处理、褐变抑制剂等^[4]。然而, 目前已有的护色手段仍存在问题, 如护色效果不理想、安全性有待进一步提高、操作复杂等。因此, 亟需寻找新型安全有效的护色方法减轻褐变对果蔬造成的损伤。

柠檬酸与苹果酸作为酸性改良剂被广泛用于抑制果

基金项目: 山东省乡村振兴科技创新提振行动计划项目 (编号: 2023TZXD075)

通信作者: 徐志祥 (1973—), 男, 山东农业大学教授, 博士。E-mail: zhixiangxu@sina.com

收稿日期: 2024-11-10 改回日期: 2025-01-06

蔬褐变。吉宁等^[5]研究发现,7%的柠檬酸溶液能抑制方竹褐变,提升方竹贮藏期间的品质。但单独使用酸化剂很难有效抑制褐变,酸经常与其他护色剂复配使用。许彬等^[6]研究发现,不同浓度的柠檬酸与苹果酸搭配均能抑制马铃薯褐变。Weller等^[7]指出尽管将杨桃切片浸入柠檬酸(5%)或抗坏血酸(0.25%或0.5%)溶液能在一定程度上减少褐变,但护色效果远不如柠檬酸+抗坏血酸联合处理显著。Li等^[8]发现,柠檬酸处理可抑制鲜切红薯的褐变相关酶活性和褐变产物的积累,同时可增强自由基清除能力,提高抗氧化性。此外,Huan等^[9]研究发现,将桃浸入48℃水处理10 min,可减少桃在冷藏期间的褐变,提高硬度保持率,并增强抗氧化活性。Rodriguez-Arzuaga等^[10]也发现了类似的结果,说明低温浸泡可在一定程度上提高果蔬的抗氧化活性,对抑制果蔬褐变具有积极的作用。

褪黑素(melatonin, MT)是一种色氨酸衍生的天然产物,几乎存在于所有生物体内^[11]。MT是增强植物抵抗生物和非生物胁迫的信号分子,还是一种强大的自由基清除剂,具有直接的抗氧化活性^[12]。外源MT已被作为一种有效的采后处理方法来改善果蔬贮藏期间品质变化,MT可以提高GABA生成途径活性及总酚积累,减少草莓果实采后腐烂并保持营养品质^[13];通过激活抗氧化系统延缓桃采后衰老并提高其耐寒性^[14];可以保持较高的内源性MT水平,提高抗坏血酸水平,延缓樱桃在贮藏期间的衰老与品质变化^[15]。然而,到目前为止,外源MT对加工过程中果蔬褐变抑制的研究还较少。

板栗的熟化方式包括煮制、蒸煮、烘烤等,板栗在熟化过程中会发生严重褐变,控制熟化过程中板栗褐变对保证板栗产品感官品质具有重要意义。因此,研究拟选用柠檬酸、苹果酸和MT作为护色剂,结合低温浸泡进行预处理,通过单因素与响应面优化试验确定护色工艺,并对板栗理化指标进行分析,研究护色处理工艺对板栗褐变的影响,以期为进一步开发新型护色技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

板栗:挑选新鲜、无虫眼、形态均匀、饱满完整的泰山板栗,泰安市栗欣源工贸有限公司;

褪黑素(MT):分析纯,北京索莱宝科技有限公司;

柠檬酸:分析纯,天津市凯通化学试剂有限公司;

苹果酸:分析纯,上海麦克林生化科技股份有限公司;

数显恒温水浴锅:HH-2型,国华电器有限公司;

色差计:CS-200型,杭州彩谱科技有限公司;

电子天平:AL104型,梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 板栗护色工艺 将泰山板栗放入75℃水中热烫2 min,人工去除板栗外壳和内衣。去皮后的板栗仁按 $m_{\text{板栗仁}}:V_{\text{护色液}}=1:3$ (g/mL)的料液比放入护色液中进行低温护色,然后按 $m_{\text{板栗仁}}:V_{\text{护色液}}=1:3$ (g/mL)转入100℃的护色液中煮制熟化,冷却包装。

1.2.2 单因素试验

(1) MT浓度对板栗褐变的影响:固定低温护色温度40℃、时间60 min;煮制熟化温度100℃、时间10 min。以褐变指数为评价指标,研究MT浓度(0, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 mmol/L)对板栗褐变的影响。

(2) 柠檬酸质量分数对板栗褐变的影响:固定低温护色温度40℃、时间60 min;煮制熟化温度100℃、时间10 min,研究柠檬酸质量分数(0, 0.3%, 0.6%, 0.9%, 1.2%, 1.5%)对板栗褐变的影响。

(3) 苹果酸质量分数对板栗褐变的影响:固定低温护色温度40℃、时间60 min;煮制熟化温度100℃、时间10 min,研究苹果酸质量分数(0, 0.3%, 0.6%, 0.9%, 1.2%, 1.5%)对板栗褐变的影响。

(4) 低温护色温度对板栗褐变的影响:以3种护色剂用量单因素试验为基础,固定低温护色时间60 min,煮制时间10 min,研究低温护色温度(25, 30, 35, 40, 45, 50℃)对板栗褐变的影响。

(5) 低温护色时间对板栗褐变的影响:以3种护色剂用量单因素试验为基础,固定低温护色温度40℃,煮制时间10 min,研究低温护色时间(0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 min)对板栗褐变的影响。

(6) 煮制时间对板栗褐变的影响:以3种护色剂用量单因素试验为基础,固定低温护色温度40℃、时间60 min,研究煮制时间(0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 min)对板栗褐变的影响。

1.2.3 响应面试验 以单因素试验所得结果为参考,根据Box-Behnken原理设计试验,以褐变指数为评价指标,选取MT浓度、苹果酸质量分数、柠檬酸质量分数3个因素,设计三因素三水平的响应面优化试验^[16]。

1.3 指标测定

1.3.1 褐变指数 参照祝竞芳等^[17]的方法。

1.3.2 褐变抑制评价 测定未做护色处理组(空白组)熟化板栗与护色处理组熟化板栗 L^* 值与褐变指数,对确定护色工艺的褐变抑制效果进行评价。

1.3.3 含水量 参照GB 5009.3—2016的方法。

1.3.4 总酚含量 参照黄欣莹^[18]的方法。

1.3.5 还原糖含量 参照杨俊慧等^[19]的方法。

1.3.6 抗坏血酸含量 参照曹建康等^[20]的方法。

1.3.7 丙二醛(MDA)含量 参照曹建康等^[20]的方法。

1.3.8 DPPH自由基清除率 参照Hatano等^[21]的方法稍作修改,将1.3.3得到的样品稀释4倍,取0.5 mL稀释后的样品与2.5 mL 0.2 mmol/L DPPH乙醇溶液混合。37℃避光反应30 min后,于517 nm处测定吸光度。

1.3.9 ABTS自由基清除率 参照Re等^[22]的方法稍作修改,等体积混合7.4 mmol/L ABTS自由基溶液和2.45 mmol/L $K_2S_2O_8$,避光反应12~16 h,使用前稀释使其在734 nm处吸光度为 0.70 ± 0.02 。将1.3.3得到的样品稀释4倍,取0.2 mL稀释后的样品与3.8 mL ABTS自由基工作液混合,反应30 min后,于734 nm处测定吸光度。

上述试验均是测定湿基条件下指标含量。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 软件整理与分析试验数据;采用 Design-Expert 8.0.6 软件分析响应面试验结果;使用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 MT 浓度对板栗褐变的影响 MT 是一种植物生长调节因子^[23],对果蔬的生长、成熟及采后品质变化具有重要作用。由图 1 可知,随着 MT 浓度的增大,板栗褐变指数呈现出先降低后增大的趋势,在 MT 浓度为 0.5 mmol/L 时,板栗褐变指数最小。MT 是一种具有直接抗氧化活性的自由基清除剂,可提高抗氧化物含量和抗氧化活性^[24],从而影响果蔬褐变。板栗褐变指数的降低表明 MT 在一定程度上对板栗褐变产生了影响,导致板栗褐变程度降低。因此,MT 浓度为 0.5 mmol/L 时,抑制褐变效果较好。

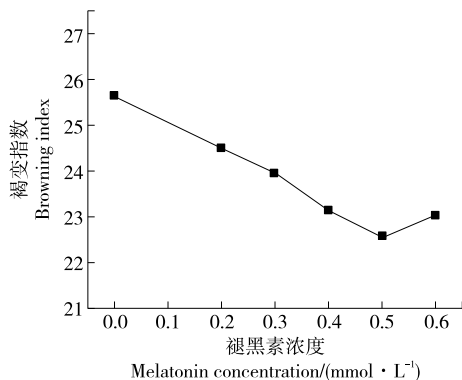


图 1 MT 浓度对板栗褐变指数的影响

Figure 1 Effect of different concentrations of MT on the browning index of chestnuts

2.1.2 柠檬酸质量分数对板栗褐变的影响 在果蔬加工中经常使用调酸的方法抑制果蔬褐变。柠檬酸的加入会调节板栗 pH 值,抑制酶促褐变,影响单宁类物质的水解和美拉德反应,抑制板栗褐变。

由图 2 可知,随着柠檬酸加入量的不断增大,板栗褐变指数不断降低,在柠檬酸质量分数为 1.2% 时,板栗褐变指数最小;随着柠檬酸质量分数的继续增大,褐变指数又稍有升高。这与张超等^[25]和吴胤霆等^[26]的研究结果相似,均表现为在达到最适柠檬酸浓度之后,褐变指数会随柠檬酸的添加再次增大。适量的柠檬酸可以有效维持总酚物质含量,延缓鲜切蔬菜和水果的褐变^[27]。但高浓度的柠檬酸有促进抗坏血酸损失速率增加的趋势,导致额外色素的形成^[28]。因此,柠檬酸质量分数为 1.2%,板栗褐变程度较小,护色效果较好。

2.1.3 苹果酸质量分数对板栗褐变的影响 由图 3 可知,随着苹果酸质量分数的增大,板栗褐变指数不断降低,在苹果酸质量分数为 0.9% 时,褐变指数较低;当苹果酸用量

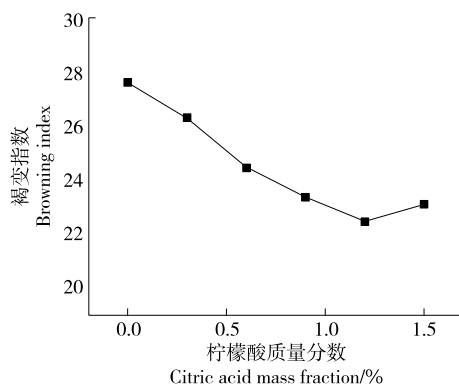


图 2 柠檬酸质量分数对板栗褐变指数的影响

Figure 2 Effect of citric acid mass fraction on the browning index of chestnuts

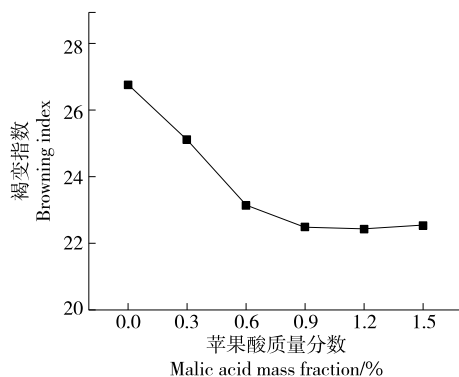


图 3 苹果酸质量分数对板栗褐变指数的影响

Figure 3 Effect of malic acid mass fraction on the browning index of chestnuts

再次增大时,板栗褐变指数受酸浓度影响较小,褐变指数变化不明显。苹果酸同柠檬酸的作用机理相似,都能抑制 O_2^- 的积累,延缓 H_2O_2 的减少^[29]。因此,选择苹果酸质量分数为 0.9% 进行后续试验。

2.1.4 低温护色温度对板栗褐变的影响 由图 4 可知,当低温护色温度由 25 °C 提高到 40 °C 时,板栗褐变指数不断降低,再次提高护色温度时,褐变不断加重。板栗内 PPO 酶最适温度为 30~40 °C^[30],而试验过程中,低温护色温度由 25 °C 提高到 40 °C 时测定的板栗褐变指数却在不断降低,可能是因为护色剂的浸入速度会随温度的升高而加快,护色剂充分浸入板栗内部,发挥作用,抑制褐变作用。柠檬酸与苹果酸作为有机酸,可降低 pH,抑制 PPO 与 POD 活性,且柠檬酸可与 PPO 酶的铜离子螯合^[29];MT 处理后 PPO 酶活性显著降低,Xiao 等^[31]和 Wei 等^[32]都证明了此结果,护色剂在低温浸泡阶段极大限制了酶促褐变的发生。但随着温度的不断提高,美拉德反应速率不断加快,当温度在 30~80 °C 时,温度每升高 10 °C,美拉德反应增快 3~5 倍,褐变反应持续加重^[33]。因此,选择 40 °C 为低温护色的最佳温度。

2.1.5 低温护色时间对板栗褐变的影响 由图 5 可知,

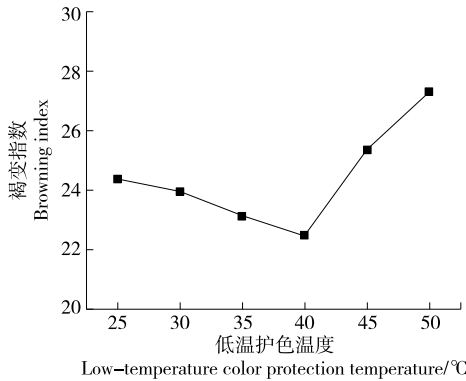


图4 低温护色温度对板栗褐变指数的影响

Figure 4 Effect of low-temperature color protection temperatures on the browning index of chestnuts

40℃低温护色时,随着护色时间延长,褐变指数不断降低,在低温护色时间增加至40 min后,褐变指数降低趋势变缓,在60 min时,褐变指数达到最小值。低温护色时间的延长会使护色剂充分进入板栗内部,扩大护色效果,此外低温浸泡已被证明可提高抗氧化性^[10],这可能是引起板栗褐变程度降低的原因。但随着护色时间的提高,可能导致护色剂在板栗内部达到饱和,或是抗氧化性降低,使褐变产物积累,褐变加深。因此,选择低温护色时间为60 min。

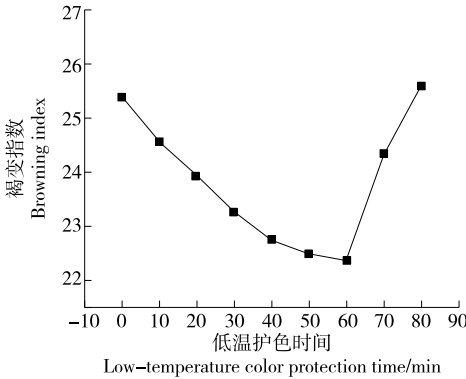


图5 低温护色时间对板栗褐变指数的影响

Figure 5 Effect of low-temperature color protection time on the browning index of chestnuts

2.1.6 高温煮制时间对板栗褐变的影响 在高温熟化过程中,板栗内褐变相关酶被钝化失活,因此高温条件的改变主要影响非酶褐变。由图6可知,板栗褐变指数随着煮制时间的延长而升高,在前15 min板栗褐变指数受煮制时间影响较大。这可能是由于在高温环境中,褐变底物充足且存在部分酶促褐变导致前15 min褐变速率更快。煮制时间的延长会加重板栗内部单宁类物质的氧化及美拉德反应,时间越长,美拉德反应越重,导致褐变指数持续升高。煮制时间越短,板栗褐变程度越小。在保证板栗完全熟化的基础上,板栗煮制时间选择10 min。

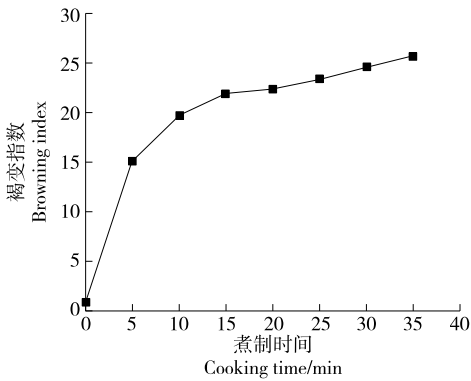


图6 煮制时间对板栗褐变指数的影响

Figure 6 Effect of cooking time on the browning index of chestnuts

2.2 响应面试验

2.2.1 响应面试验设计及结果 根据单因素试验结果,以褐变指数为响应值,采用Design-Expert 8.0.6软件中的Box-Behnken试验设计方案,在低温护色温度为40℃、时间为60 min,熟化温度为100℃、时间为10 min条件下,对MT浓度、柠檬酸质量分数、苹果酸质量分数进行三因素三水平的响应面试验,试验因素水平见表1,试验结果见表2。

表1 护色液配比优化 Box-Behnken 试验设计因素与水平
Table 1 Factors and levels of Box-Behnken experiment design for color protectant ratio optimization

水平	A MT 浓度/ (mmol·L ⁻¹)	B 苹果酸质量 分数/%	C 柠檬酸质量 分数/%
-1	0.40	0.60	0.90
0	0.50	0.90	1.20
1	0.60	1.20	1.50

采用Design-Expert 8.0.6软件对表2数据进行回归分析,得方程为

$$Y=54.420\ 24-116.964\ 88A+9.983\ 56B-14.609\ 95C-32.718\ 33AB+5.555\ 83AC-9.432\ 50BC+140.377\ 00A^2+9.460\ 22B^2+9.282\ 17C^2。$$
 (1)

由表3可知,模型 $P<0.05$,影响显著,说明该试验设计的效果和稳定性较好;失拟项 $P>0.05$,模型失拟项不显著,意味着回归方程对数据具有良好的拟合能力^[34],能够有效展示各因素与响应值之间的关联。

由图7可知,AB、BC等高线密集且趋向于椭圆,表示MT与苹果酸、苹果酸与柠檬酸之间交互作用显著;各因素影响程度依次为柠檬酸质量分数>苹果酸质量分数>MT浓度。

响应面优化试验可知,3个因素对板栗褐变的影响程度由高到低依次为:柠檬酸质量分数、苹果酸质量分数、MT浓度。苹果酸对板栗褐变有抑制作用的原因可能为:添加苹果酸后,板栗内部pH降低,前期抑制褐变相关酶

表2 响应面试验设计与结果

Table 2 Design and results of response surface experiment

试验号	A	B	C	Y褐变指数
1	-1	-1	0	23.43±0.32
2	1	-1	0	25.38±0.23
3	-1	1	0	24.97±0.26
4	1	1	0	22.99±0.14
5	-1	0	-1	23.56±0.14
6	1	0	-1	23.49±0.28
7	-1	0	1	24.53±0.33
8	1	0	1	25.13±0.21
9	0	-1	-1	22.44±0.49
10	0	1	-1	23.77±0.24
11	0	-1	1	25.18±0.31
12	0	1	1	23.11±0.55
13	0	0	0	22.28±0.31
14	0	0	0	22.33±0.22
15	0	0	0	22.49±0.29
16	0	0	0	21.49±0.09
17	0	0	0	21.11±0.32

表3 褐变指数回归模型的方差分析

Table 3 Analysis of variance of browning index regression models

系数项	平方和	自由度	均方	F值	P值
模型	25.77	9	2.86	13.01	0.001 4
A	0.03	1	0.03	0.15	0.714 2
B	0.32	1	0.32	1.45	0.267 4
C	2.75	1	2.75	12.51	0.009 5
AB	3.85	1	3.85	17.51	0.004 1
AC	0.11	1	0.11	0.50	0.500 4
BC	2.88	1	2.88	13.10	0.008 5
A ²	8.30	1	8.30	37.70	0.000 5
B ²	3.05	1	3.05	13.87	0.007 4
C ²	2.94	1	2.94	13.35	0.008 1
残差	1.54	7	0.22		
失拟项	0.07	3	0.03	0.07	0.974 4
纯误差	1.47	4	0.37		
总离差	27.32	16			

活性,同时在酸性条件下不利于美拉德反应的发生,单宁类物质也更易分解,导致苹果酸可在一定程度上抑制板栗褐变;柠檬酸与苹果酸的作用机理相似,但柠檬酸作为一种褐变抑制剂,并非仅由酸性发挥作用,Tsouvaltzi等^[35]的研究证实了用同样pH的柠檬酸与H₂SO₄处理马铃薯,柠檬酸的褐变抑制效果远高于H₂SO₄。同时,有文

献^[36]报道柠檬酸可提高果蔬的抗氧化活性,此外柠檬酸可作为螯合剂,与多酚氧化酶的铜辅基结合,因此导致柠檬酸的作用效果比苹果酸更显著。由响应面也可知,柠檬酸在护色剂中发挥主要作用。MT也会抑制板栗褐变,这可能是由于其在低温护色阶段促进了抗坏血酸—谷胱甘肽循环,提高了抗坏血酸等抗氧化物质含量,提高了板栗的抗氧化活性,抑制了板栗褐变相关酶活性。但前期低温护色阶段时间较短,因此,MT可能在高温加工过程中抑制非酶褐变,但其褐变抑制机理暂未明确。Cao等^[37]证明了MT处理会上调抗氧化基因的表达,增加贮藏前期的V_C含量,抑制褐变相关酶活性;MT处理使桃果保持较高的抗坏血酸水平^[14];此外,Li等^[38]研究发现MT会使与褐变有关的*GRI*、*GR2*、*DHAR*基因表达水平上升,降低活性氧与膜脂过氧化程度,在贮藏前期,V_C与V_E下降缓慢。MT可以作为一种有效褐变抑制剂用于保持果蔬品质。而且苹果酸与柠檬酸、MT与苹果酸存在交互作用,联合使用时效果更明显,3种护色剂复配使用可有效发挥作用,抑制褐变。但护色剂之间的交互作用机理暂未明确,接下来将进行深入研究。

2.2.2 最佳护色剂确定及验证实验 通过软件优化得到3种护色剂的最佳用量MT浓度0.5 mmol/L、苹果酸质量分数0.87%、柠檬酸质量分数1.08%,理论褐变指数为21.829 4。进行3次验证实验,得到板栗褐变指数为21.938 2,达到了理论值的99.5%。模型预测的理论值与预测值吻合较好,说明该响应面回归模型建立良好。

2.2.3 褐变抑制评价 研究^[39-41]表明,经熟化处理后,板栗会发生不同程度的褐变,导致L*值降低,褐变指数升高。由图8可知,熟化护色组板栗的L*值低于新鲜组且高于熟化空白组,褐变指数明显低于熟化空白组,说明板栗在熟化过程中不可避免地发生了褐变,在熟化过程中应用该护色工艺,会使L*升高,褐变指数减小,抑制褐变效果良好。

2.3 护色处理对板栗理化指标的影响

由图9(a)可知,新鲜组板栗总酚含量为1.019 mg/g,而熟化空白组为0.930 mg/g,熟化护色组为0.982 mg/g。熟化组板栗的总酚含量总低于新鲜组,且熟化护色组总酚含量高于熟化空白组。板栗在熟化过程中会经历酚类物质的自动氧化以及以酚类物质为底物的酶促褐变,这会导致酚类含量的降低。由于高温熟化条件的影响会使多酚氧化酶钝化失活,酶促褐变只在极短时间内发挥作用。试验研究的护色方法可能是因为抑制了两种以酚类为底物的褐变反应导致护色组总酚含量高于空白组。

由图9(b)可知,新鲜组板栗还原糖含量较低,为0.554%,熟化组板栗还原糖含量明显高于新鲜组,这是因为在高温熟化的过程中会促进板栗中的淀粉与蔗糖向还原糖转变,导致熟化后板栗还原糖含量显著升高。同时,在高温加工过程中,板栗内会发生美拉德反应,导致还原糖的消耗。与熟化空白组相比,熟化护色组还原糖含量

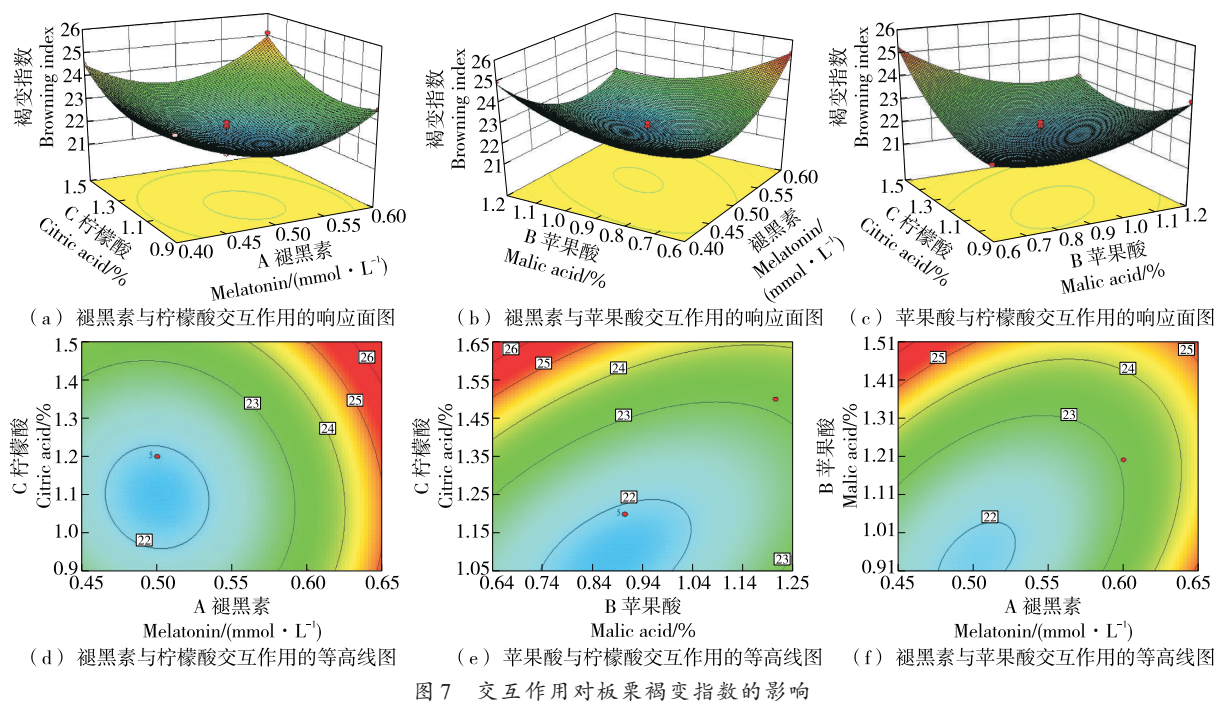
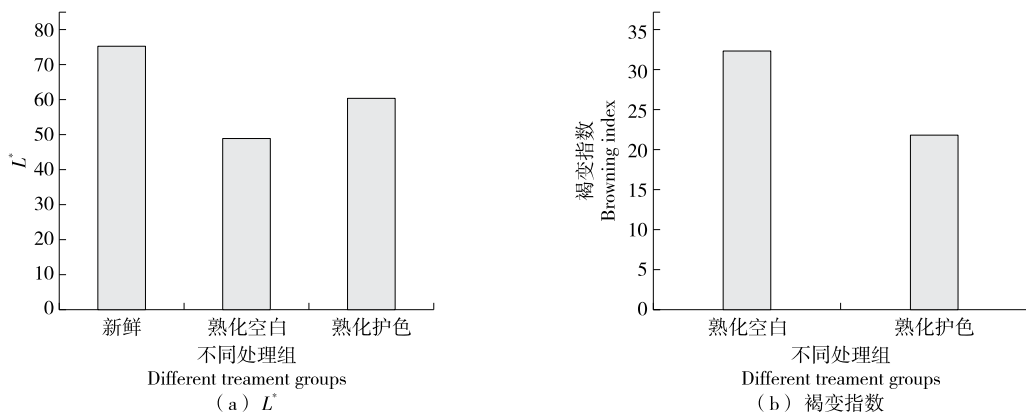


Figure 7 Effect of interaction on the browning index of chestnuts

图 8 不同处理组板栗 L^* 值与褐变指数Figure 8 L^* values and browning index of chestnuts in different treatment groups

提高了 53.34%。因此,护色处理可以有效减少还原糖的降低量。

由图 9(c)可知,新鲜板栗抗坏血酸含量最高,其次是熟化护色组,熟化空白组最少。抗坏血酸含量越高,抗氧化性越强。熟化护色组抗坏血酸含量高于熟化空白组,可能是由于护色剂的加入促进了内源抗坏血酸的产生,或是由于抑制了抗坏血酸的氧化降解。总之,护色处理可以有效延缓板栗抗坏血酸含量的下降,使其具有一定的抗氧化能力。

由图 9(d)和图 9(e)可知,与空白组相比,护色处理后板栗的 DPPH 自由基与 ABTS 自由基清除能力均有所提高。这与胡燕等^[11]和 Zhang 等^[42]的研究结果相似,胡燕

等^[11]发现适量的外源 MT 可提高鲜切山药的 DPPH 自由基和 ABTS 自由基清除能力,Zhang 等^[42]发现柠檬酸处理可提高抗氧化剂(总酚类物质和总黄酮)含量,保持番茄采后果实的贮藏品质。试验研究的护色处理对两种自由基清除能力的影响可能是由两种原因造成的:① 板栗内抗氧化物质含量变化;② 来源于外源褪黑素,褪黑素本身具有抗氧化性。总之,护色处理可在一定程度上提高 DPPH 自由基与 ABTS 自由基清除能力,提高抗氧化活性。

由图 9(d)可知,熟化空白组板栗 MDA 含量为新鲜板栗的 1.485 倍,熟化护色组 MDA 含量为新鲜板栗的 1.076 倍。护色剂加入后会显著提高自由基清除能力,减

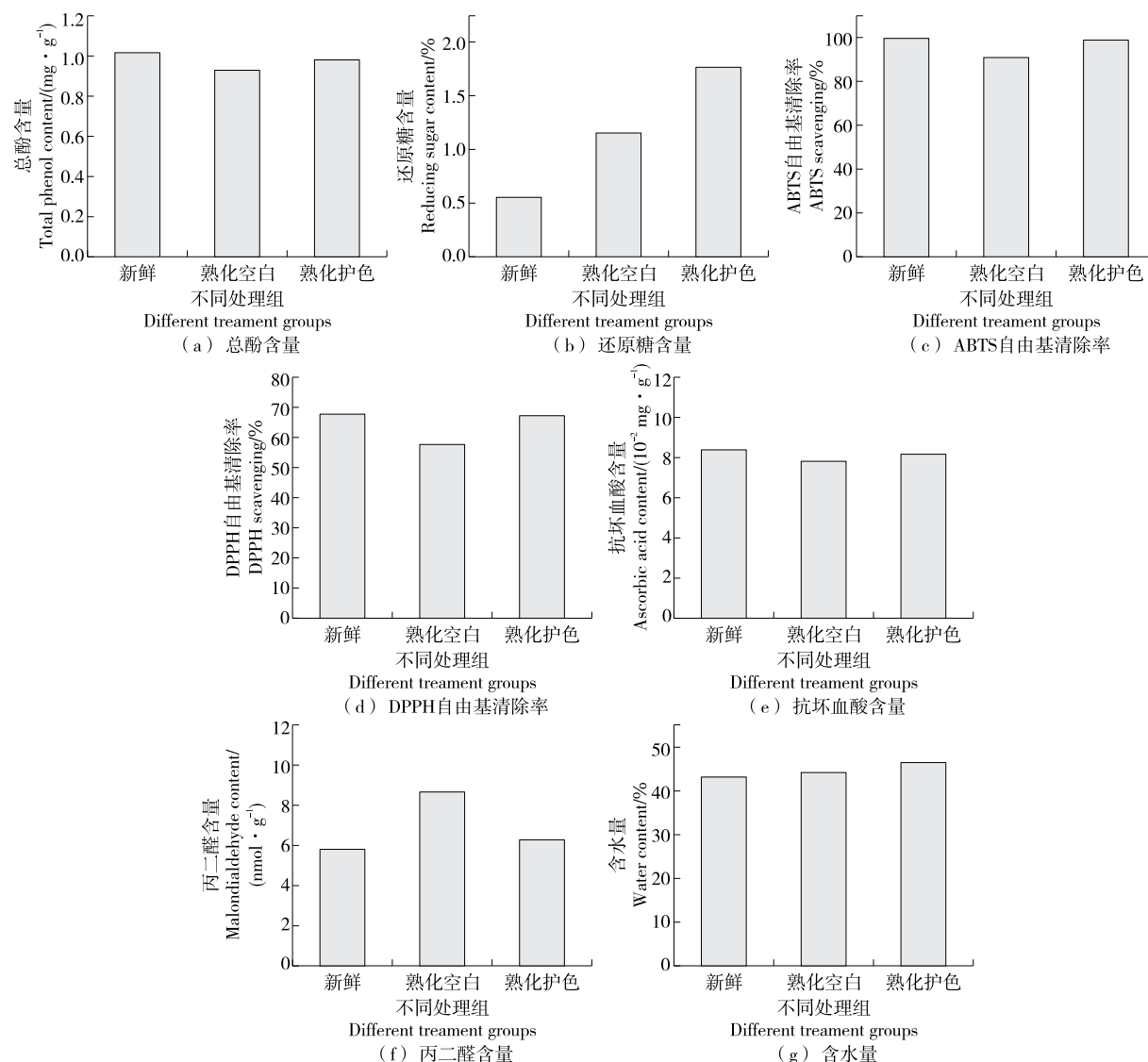


图9 不同处理对板栗理化指标的影响

Figure 9 Effect of different treatments on physicochemical indexes of chestnuts

少脂质过氧化物的产生,进而减少MDA的形成。由此可知,护色处理可以降低MDA含量的增长,减轻细胞膜膜脂过氧化造成的伤害。

含水量对果蔬褐变具有一定影响。由墨阳等^[43]认为板栗仁中水分含量降低有助于保护或释放更多的天然抗氧化物质,中和导致褐变的自由基,降低反应速率;而李范洙等^[44]则证明水分含量的适量升高会使人参的 L 值升高, a 值减小,色泽较好。当水分含量较高时,也会稀释反应物,抑制美拉德反应速率。由图9(g)可知,与空白组相比,护色工艺处理使板栗含水量由44.35%提高到46.71%,含水量变化差异不明显。

3 结论

研究对板栗加工过程中的褐变反应进行抑制控制,

并对其理化指标进行了分析。结果表明,护色剂最佳用量为:褪黑素浓度0.5 mmol/L、苹果酸质量分数0.87%、柠檬酸质量分数1.08%;板栗在40℃护色剂中浸泡60 min,100℃护色剂中煮制10 min,褐变指数较小,色泽较好,褐变抑制效果较好。与空白组相比,护色处理降低了褐变指数,升高了 L^* 值,同时总酚含量、还原糖含量、抗坏血酸含量、DPPH自由基和ABTS自由基清除能力也有所提高,丙二醛含量下降,提高了抗氧化水平,减轻了膜脂过氧化损伤,延缓了褐变作用。但护色剂之间的交互作用对褐变的影响暂未明确,后续可进一步研究。

参考文献

- [1] LI R, SHARMA A K, ZHU J C, et al. Nutritional biology of chestnuts: a perspective review[J]. Food Chemistry, 2022, 395:

- 133575.
- [2] BOUNOUS G, MARINONI D T. Chestnut: botany, horticulture, and utilization[J]. Horticultural Reviews, 2010, 31: 291-347.
- [3] CHEN Y, ZHU C C, ZHAO Y Q, et al. Transcriptomics integrated with changes in cell wall material of chestnut (*Castanea mollissima* blume) during storage provides a new insight into the "calcification" process[J]. Foods, 2022, 11(8): 1 136.
- [4] 王斌, 林薇, 袁晓. 鲜切果蔬褐变机理及防控技术研究进展[J/OL]. 食品科学. (2024-11-05) [2025-01-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20241105.1332.028.html>.
WANG B, LIN W, YUAN X. Research progress on the browning mechanism and prevention and technology of fresh-cut fruits and vegetables[J/OL]. Food Science. (2024-11-05) [2025-01-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20241105.1332.028.html>.
- [5] 吉宁, 张妮, 徐锦洋, 等. 不同浓度柠檬酸溶液浸泡处理对带壳方竹鲜笋采后贮藏品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(12): 43-49.
JI N, ZHANG N, XU J Y, et al. Effect of immersion treatment with different concentrations of citric acid solution on the storage quality of post-harvest shelled chimonabambusa quadrangularis fresh shoot[J]. Food Research and Development, 2024, 45(12): 43-49.
- [6] 许彬, 李慧星, 赵婷婷. 柠檬酸与五种褐变抑制剂的交互作用对马铃薯护色的影响[J]. 中国食品添加剂, 2015(3): 163-169.
XU B, LI H X, ZHAO T T, et al. Interactions between citric acid and five other inhibitors on fresh-cut surface browning of potatoes[J]. China Food Additives, 2015(3): 163-169.
- [7] WELLER A, SIMS C A, MATTHEWS R F, et al. Browning susceptibility and changes in composition during storage of carambola slices[J]. Journal of Food Science, 1997, 62(2): 256-260.
- [8] LI W, XIONG S G, LIU C H, et al. Citric acid treatment maintains fresh-cut sweet potatoes storage quality by reducing browning levels and increasing antioxidant capacity[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, 18(9): 7 480-7 494.
- [9] HUAN C, HAN S, JIANG L, et al. Postharvest hot air and hot water treatments affect the antioxidant system in peach fruit during refrigerated storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 126: 1-14.
- [10] RODRÍGUEZ-ARZUAGA M, RÍOS G, PIAGENTINI A M. Mild heat treatments before minimal processing reduce browning susceptibility and increase total phenolic content of low-chill apple cultivars[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(11): e14209.
- [11] 胡燕, 李长滨, 许美娟, 等. 褪黑素对鲜切山药酶促褐变的作用效果[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(2): 105-112.
HU Y, LI C B, XU M J, et al. Effect of melatonin on enzymatic browning of fresh cut yam[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2024, 50(2): 105-112.
- [12] LIU C H, ZHENG H H, SHENG K L, et al. Effects of melatonin treatment on the postharvest quality of strawberry fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 139: 47-55.
- [13] AGHDAM M S, FARD J R. Melatonin treatment attenuates postharvest decay and maintains nutritional quality of strawberry fruits (*Fragaria*×*anannasa* cv. Selva) by enhancing GABA shunt activity[J]. Food Chemistry, 2017, 221: 1 650-1 657.
- [14] GAO H, ZHANG Z K, CHAI H K, et al. Melatonin treatment delays postharvest senescence and regulates reactive oxygen species metabolism in peach fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 118: 103-110.
- [15] WANG F, ZHANG X P, YANG Q Z, et al. Exogenous melatonin delays postharvest fruit senescence and maintains the quality of sweet cherries[J]. Food Chemistry, 2019, 301: 125311.
- [16] CUI Y, LIU J X, HAN S H, et al. Chestnut lily beverage (CLB) processing using ultrasound-assisted nisin: microbiota inactivation and product quality[J]. Foods, 2022, 11(21): 3 344.
- [17] 祝竞芳, 汤静, 游万里, 等. 氯化钙处理对鲜切莴苣品质及 γ -氨基丁酸代谢的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(7): 174-181.
ZHU J F, TANG J, YOU W L, et al. Effect of calcium chloride on quality and γ -aminobutyric acid metabolism of fresh-cut lettuce[J]. Food Science, 2022, 43(7): 174-181.
- [18] 黄欣莹. 低温等离子体结合蜂蜜喷涂处理对鲜切苹果的品质调控研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022: 16.
HUANG X Y. Study on quality control of fresh-cut apples by cold plasma combined with honey coating treatment[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022: 16.
- [19] 杨俊慧, 郑岚, 马耀宏, 等. 马铃薯中还原糖不同测定方法的比较[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(6): 104-108.
YANG J H, ZHENG L, MA Y H, et al. Comparison of different determination of reducing sugar in potato[J]. Food Research and Development, 2011, 32(6): 104-108.
- [20] 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: 28-30.
CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Guidelines for postharvest physiological and biochemical experiments on fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 28-30.
- [21] HATANO T, KAGAWA H, YASUHARA T, et al. Two new flavonoids and other constituents in licorice root: their relative astringency and radical scavenging effects[J]. Chemical & Pharmaceutical Bulletin, 1988, 36(6): 2 090-2 097.
- [22] RE R, PELLEGRINI N, PROTEGGENTE A, et al. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay[J]. Free Radical Biology and Medicine, 1999, 26(9/10): 1 231-1 237.
- [23] 宁娜, 王懿, 王晓茜, 等. 褪黑素结合 PE 包装对葡萄果梗褐变调控的研究[J]. 北方园艺, 2024(17): 93-103.
NING N, WANG Y, WANG X Q, et al. Study on regulation of stem browning by melatonin combined with PE packaging in *Vitis vinifera* L.[J]. Northern Horticulture, 2024(17): 93-103.

- [24] 吕静祎, 邱艳霞, 白琳, 等. 褪黑素与柠檬酸联合处理对鲜切‘早酥’梨冷藏品质的影响(英文)[J/OL]. 食品工业科技. (2024-09-30) [2025-01-05]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024070015>.
- LV J Y, QIU Y X, BAI L, et al. Combined effects of melatonin and citric acid on preservation of fresh-cut 'Early Crisp' pears during cold storage[J/OL]. Science and Technology of Food Industry. (2024-09-30) [2025-01-05]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024070015>.
- [25] 张超, 程福慧, 梁峥, 等. 护色剂对干制玫瑰护色效果及芳香品质的影响[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(5): 205-214.
- ZHANG C, CHENG F H, LIANG Z, et al. Effects of color protectants on the color protection and aroma quality of dried roses[J]. China Food Additives, 2024, 35(5): 205-214.
- [26] 吴胤霆, 王洋, 付继梅, 等. 护色剂和贮藏温度对南酸枣糕非酶促褐变的影响[J]. 食品科技, 2022, 47(4): 40-47.
- WU Y T, WANG Y, FU J M, et al. Effects of color protectants and storage temperature on non enzymatic browning of choerospondias axillaris cake[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(4): 40-47.
- [27] HUANG H, JIAN Q J, JIANG Y M, et al. Enhanced chilling tolerance of banana fruit treated with malic acid prior to low-temperature storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 111: 209-213.
- [28] CLEGG K M. Citric acid and the browning of solutions containing ascorbic acid[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1966, 17(12): 546-549.
- [29] 魏洁茹, 贺小贤, 胡瑾. 马铃薯加工过程中褐变抑制剂的研 究[J]. 中国调味品, 2017, 42(1): 57-60.
- WEI J R, HE X X, HU J. Research on the browning inhibitors in the processing of potato[J]. China Condiment, 2017, 42(1): 57-60.
- [30] 曾婷婷, 张立彦, 芮汉明. 板栗的酶促褐变特性及灭酶预处理研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(10): 110-113.
- ZENG T T, ZHANG L Y, RUI H M. Study on enzymatic browning and blanching methods of chestnut[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(10): 110-113.
- [31] XIAO Y H, XIE J, WU C S, et al. Effects of melatonin treatment on browning alleviation of fresh-cut foods[J]. Journal of Food Biochemistry, 2021, 45: e13798.
- [32] WEI D L, YANG J L, XIANG Y, et al. Attenuation of postharvest browning in rambutan fruit by melatonin is associated with inhibition of phenolics oxidation and reinforcement of antioxidative process[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 905006.
- [33] 吴惠玲, 王志强, 韩春, 等. 影响美拉德反应的几种因素研究[J]. 现代食品科技, 2010, 26(5): 441-444, 440.
- WU H L, WANG Z Q, HAN C, et al. Factors affecting the Maillard reaction[J]. Modern Food Science and Technology, 2010, 26(5): 441-444, 440.
- [34] 姜龙, 霍秀娜, 李兴凯, 等. 生姜热泵干燥条件优化及产品品质研究[J]. 农产品加工, 2024(12): 32-39.
- JIANG L, HUO X N, LI X K, et al. Effects of different heat pump drying conditions on the quality of ginger[J]. Farm Products Processing, 2024(12): 32-39.
- [35] TSOUVALTZIS P, BRECHT J K. Inhibition of enzymatic browning of fresh-cut potato by immersion in citric acid is not solely due to pH reduction of the solution[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 41(2): e12829.
- [36] 郑丽静, 郑鄢燕, 李东立, 等. 复配保鲜剂处理对鲜切生菜的护色效果[J]. 农产品加工, 2024(17): 1-5.
- ZHENG L J, ZHENG Y Y, LI D L, et al. Effect of compound preservative treatment on color protection of fresh cut lettuce [J]. Academic Deriodical of Farm Products Processing, 2024 (17): 1-5.
- [37] CAO S F, SHAO J R, SHI L Y, et al. Melatonin increases chilling tolerance in postharvest peach fruit by alleviating oxidative damage[J]. Scientific Repors, 2018, 8: 806.
- [38] LI Y X, ZHANG L, ZHANG L, et al. Exogenous melatonin alleviates browning of fresh-cut sweetpotato by enhancing anti-oxidative process[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 297: 110937.
- [39] 周葵, 张雅媛, 黄会玲, 等. 不同熟化过程中板栗品质的变化研究[J]. 食品科技, 2019, 44(11): 103-108.
- ZHOU K, ZHANG Y Y, HUANG H L, et al. Study on the changes of quality of chestnut during different ripening process [J]. Food Science and Technology, 2019, 44(11): 103-108.
- [40] 綦菁华, 王芳, 庞美霞, 等. 影响熟化板栗褐变的因素研究[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(10): 103-106.
- QI J H, WANG F, PANG M X, et al. Factors affecting browning of cooked chestnut kernel[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2009, 24(10): 103-106.
- [41] 龚秀红. 板栗仁褐变因素及控制方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2003: 18-20.
- GONG X H. Chestnut kernel browning factors and control methods[D]. Beijing: China Agricultural University, 2003: 18-20.
- [42] ZHANG J, ZENG L, SUN H, et al. Using chitosan combined treatment with citric acid as edible coatings to delay postharvest ripening process and maintain tomato (*Solanum lycopersicon* Mill) quality[J]. Journal of Food and Nutrition Research, 2017, 5(3): 144-150.
- [43] 由墨阳, 李海芹, 程子天, 等. 板栗仁褐变机理及控制方法研究进展[J/OL]. 食品与发酵工业. (2024-12-12) [2025-01-05]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.041161>.
- YOU X Y, LI H Q, CHENG Z T, et al. Research progress on browning mechanism and control methods during processing of chestnut kernel[J/OL]. Food and Fermentation Industrie. (2024-12-12) [2025-01-05]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.041161>.
- [44] 李范洙, 金铁, 张先, 等. 物料含水量和机筒温度对双螺杆挤压人参制品褐变效果的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(20): 170-172.
- LI F Z, JIN T, ZHANG X, et al. Effects of water content and temperature on browning of ginseng products prepared by twin-screw extrusion[J]. Food Science, 2010, 31(20): 170-172.