

张鹏, 颜碧, 贾晓昱, 等. 精准温度处理对鲜切莲藕褐变、生理和品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(16): 347-354. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110097

ZHANG Peng, YAN Bi, JIA Xiaoyu, et al. Effects of Precise Temperature Treatment on the Browning, Physiological and Quality of Fresh Cut Lotus Root[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(16): 347-354. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110097

· 贮运保鲜 ·

精准温度处理对鲜切莲藕褐变、 生理和品质的影响

张 鹏^{1,2}, 颜 碧², 贾晓昱^{1,2}, 李江阔^{1,2,*}

(1.天津市农业科学院农产品保鲜与加工技术研究所, 天津 300384;

2.国家农产品保鲜工程技术研究中心(天津), 农业农村部农产品贮藏保鲜重点实验室, 天津市农产品采后生理与贮藏保鲜重点实验室, 天津 300384)

摘要: 为了明确精准温度处理对防褐变剂处理后鲜切莲藕褐变、生理和品质的调控作用, 采用防褐变剂(质量分数 1.0% 无水柠檬酸+0.1% 抗坏血酸钙+0.2% L-天门冬氨酸)处理鲜切莲藕, 在相温(-0.5 ± 0.1) $^{\circ}\text{C}$ 、冰温(-0.5 ± 0.3) $^{\circ}\text{C}$ 和冷藏(4 ± 1) $^{\circ}\text{C}$ 的条件下贮藏, 研究不同精准温度对鲜切莲藕表观色泽、褐变底物与相关酶活性、生理指标和营养品质的影响。结果表明, 贮藏 6 d 时, 精准温度(相温、冰温)处理可以延缓 L^* 的降低、 a^* 和褐变度的增加, 抑制总酚的下降和褐变相关酶多酚氧化酶和过氧化物酶活性, 其中相温贮藏维持鲜切莲藕原有色泽最佳。在贮藏过程中, 精准温度(相温、冰温)处理能够抑制鲜切莲藕呼吸强度、乙烯生成速率、相对电导率和丙二醛含量上升, 同时延缓鲜切莲藕还原糖的升高和 V_C 含量的下降。通过 SPSS 综合评分显示, 相温组综合得分最高, 主成分分析显示, 相温组与多酚氧化酶、相对电导率、褐变度、丙二醛、 a^* 的相关性较低。因此, 相温贮藏更好地延缓鲜切莲藕贮藏期间褐变的发生并维持其品质。

关键词: 鲜切莲藕, 褐变, 品质, 相温, 冰温, 冷藏

中图分类号: TS255.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)16-0347-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110097



本文网刊:

Effects of Precise Temperature Treatment on the Browning, Physiological and Quality of Fresh Cut Lotus Root

ZHANG Peng^{1,2}, YAN Bi², JIA Xiaoyu^{1,2}, LI Jiangkuo^{1,2,*}

(1. Institute of Agricultural Products Preservation and Processing Technology,
Tianjin Academy of Agricultural Sciences, Tianjin 300384, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Postharvest Physiology and Storage of Agricultural Products, Key Laboratory of Storage of Agricultural Products, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Engineering and Technology Research Center for Preservation of Agricultural Products (Tianjin), Tianjin 300384, China)

Abstract: In order to determine the effect of phase temperature storage on the quality of fresh cut lotus root after anti browning agents treatment. Fresh cut lotus roots were treated with anti browning agent (mass fraction of 1.0% anhydrous citric acid+0.1% calcium ascorbate+0.2% L-aspartic acid) and stored at phase temperature (-0.5 ± 0.1) $^{\circ}\text{C}$, ice temperature (-0.5 ± 0.3) $^{\circ}\text{C}$ and cold storage (4 ± 1) $^{\circ}\text{C}$. The effects of different precise temperature on apparent color, browning substrate and related enzyme activities, physiological indices and nutrient quality of fresh cut lotus root were studied. The results showed that precise temperature (phase temperature and ice temperature) could delay the decrease of L^* , the increase of a^* and browning degree, inhibit the decrease of total phenol and the activities of polyphenol oxidase and peroxidase when

收稿日期: 2021-11-10

基金项目: 甘肃重大科技项目(21ZD4NA016); 兵团科技攻关项目(2019AB024)。

作者简介: 张鹏(1981-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 果蔬贮运保鲜, E-mail: zhangpeng811202@163.com。

* 通信作者: 李江阔(1974-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品安全与果蔬贮运保鲜新技术, E-mail: lijkuo@sina.com。

stored for 6 d, and the phase temperature storage was the best to maintain the original color of fresh-cut lotus root. In the storage process, the precise temperature (phase temperature and ice temperature) treatment could inhibit the increase of respiratory intensity, ethylene production rate, relative conductivity and malondialdehyde content, while delaying the increase of reducing sugar and the decrease of V_C content in fresh cut lotus root. The comprehensive score of SPSS showed that the comprehensive score of phase temperature group was the highest. Principal component analysis showed that the correlation between phase temperature treatment group and polyphenol oxidase, relative conductivity, browning rate, malondialdehyde and a^* was lower. Therefore, phase temperature storage could delay the browning and maintain the quality of fresh cut lotus root.

Key words: fresh cut lotus root; browning; quality; phase temperature; ice temperature; cold storage

莲藕(*Nelumbo nucifera* Gaertn.), 简称莲, 别名莲菜、荷藕等, 是我国种植面积最广泛的水生蔬菜, 主要产于长江三角洲、洞庭湖、珠江三角洲一带^[1]。莲藕营养丰富, 组织脆嫩, 肉质洁白、口感脆甜^[2-3], 具有较好的营养价值和药用价值, 深受消费者喜欢^[4]。近年来, 随着消费者生活方式的改变, 鲜切莲藕作为新型加工蔬菜受到越来越多的关注^[5]。褐变是鲜切莲藕在贮藏过程中存在的主要问题。褐变不仅影响着鲜切莲藕的外观, 还会降低自身的营养价值, 造成抗氧化成分的流失, 严重影响其商品价值, 阻碍了鲜切莲藕产业的发展^[6]。因此减少或抑制褐变对保持鲜切莲藕品质至关重要。

目前, 抑制鲜切莲藕褐变的化学方法有柠檬酸、半胱氨酸、抗坏血酸、天冬氨酸、涂膜等^[7-14] 化学方法。化学防褐变剂虽然对果蔬褐变具有较好的抑制效果, 但单一的防褐变剂处理无法满足市场上鲜切果蔬供货期以及品质的要求, 通常需要冷藏环境相辅助。温度是生物体生理生化反应进行的重要条件, 采后果蔬易受温度的影响发生褐变、腐烂变质, 低温可抑制果蔬腐烂, 降低果蔬营养成分的损耗, 延长贮藏期。研究表明: 适宜的温度可抑制果蔬的褐变, 维持果蔬较好的品质, 4℃贮藏鲜切紫甘薯可显著地抑制褐变($P<0.05$), 10℃贮藏槟榔果仁褐变程度最轻, 5℃贮藏红毛丹可保持较好的品质^[15-17]。冰温贮藏^[18]是指在果蔬在0℃以下至生物结冰点以上温度区间贮藏, 而相温贮藏是冰温贮藏技术进一步拓展与提升, 是根据果实膜质与膜蛋白在发生相变临界的协同温度下进行果实精准低温贮藏, 通过温度的精准控制, 使果实生理代谢维持在较低水平, 进而得到保鲜的目的。目前, 相温贮藏对柿和百合保鲜均有应用, 可以显著抑制果实的衰老和褐变, 抑制营养成分的损失^[19-20]。为了延长鲜切莲藕的鲜销供货期、提高流通的品质, 急需更有效的鲜切莲藕褐变控制方法来解决鲜切莲藕销售期短的产业难题。

本文以防褐变剂(1.0%无水柠檬酸+0.1%抗坏血酸钙+0.2%L-天门冬氨酸)处理后的鲜切莲藕为研究对象, 以常规4℃冷藏为对照, 研究不同精准温度(相温、冰温)处理对鲜切莲藕褐变的调控、生理和品质的影响, 为鲜切莲藕防褐变保鲜技术提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

莲藕 采购于天津市米兰生鲜超市, 2020年9月购买, 选择大小均匀、无病虫害、无机械损伤的莲藕作为试验材料; 蓄冷剂(规格: 16.8 cm×8 cm×2 cm) 迪塞尔商贸公司; 甲醇、氢氧化钠、草酸、EDTA、偏磷酸醋酸、硫酸、钼酸铵、三氯乙酸、硫代巴比妥酸、福林酚、碳酸钠 均采购于天津市江天化工有限公司。

冷库、精准温控箱(规格: 595 cm×400 cm×250 cm, 壁厚 30 cm) 国家农产品保鲜工程技术研究中心(天津); BCD-403 型冰箱 合肥美的电冰箱有限公司; Sigma3-30K 型高速离心机 德国 Sigma 公司; Check Piont II 型便携式残氧仪 丹麦 Dansensor 公司; F-900 型便携式乙烯分析仪 美国 Felix 仪器公司; CM-700 d 型色差仪 日本柯尼卡美能达; DDS-307A 型电导率仪 上海仪电科学仪器股份有限公司; Synergy H1 型多功能微孔板检测仪 美国 Biotek Instrument 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 鲜切莲藕的制备与分组 选品质均一的鲜切莲藕清洗田间泥土并去皮, 然后使用锋利的不锈钢刀沿着鲜切莲藕的横截面切成 5 mm 厚的切片(直径约 8 mm), 用 25℃蒸馏水浸泡, 放置于 4℃的冰箱中预冷 15 min, 取出后控干其表面水分, 用前期筛选出的防褐变剂(质量分数 1.0% 无水柠檬酸+0.1% 抗坏血酸钙+0.2% L-天门冬氨酸溶液)浸泡 3 min, 取出鲜切莲藕片沥干水分, 放置于实验碗中, 置于以下 3 种环境下贮藏。相温组: 将装有鲜切莲藕的实验碗放置于精准温控箱, 在碗四周铺满蓄冷剂, 蓄冷剂为 32 个, 环境温度为(-0.5±0.1)℃; 冰温组: 将装有鲜切莲藕的实验碗放置于精准温控箱, 环境温度为(-0.5±0.3)℃; 冷藏组: 将装有鲜切莲藕的实验碗放置于冰箱, 环境温度为(4±1)℃。隔 2 d 测定一次指标, 每 4 碗为 1 次重复, 每个处理设置 3 次重复。

1.2.2 测定指标及方法

1.2.2.1 色泽的测定 L^* 由大到小表示亮度从白到黑渐变, a^* 由正向负分别表示颜色由红向绿。采用色差仪测定鲜切莲藕表观色泽 L^* 、 a^* , 每个处理选取

8 片鲜切莲藕, 每片鲜切莲藕在正反面各取 1 点进行测定。

1.2.2.2 褐变度的测定 参考李翠红等^[21]的方法测定鲜切莲藕的褐变度。称取 2 g 鲜切莲藕, 放置于研钵中研磨, 倒入离心管中, 加入 3 mL 体积分数 95% 的乙醇, 放置于 4 ℃ 下预冷 6 h, 在 4 ℃ 下以 10000 r/min 离心 20 min, 收集上清液, 在 410 nm 下测量吸光度。

1.2.2.3 总酚含量 采用 FoLin-Ciocalteu 法^[22]测定鲜切莲藕中的总酚含量。称取 2 g 研磨后的鲜切莲藕, 加入 25 mL 75% 的甲醇溶液于离心管中, 密封水浴(55 ℃)浸提 3 h, 10000 r/min 离心 10 min, 取上清液 0.5 mL, 加入 FoLin-Ciocalteu 试剂 1、5 mL 去离子水混匀, 再加入 3 mL 质量分数为 20% 的 Na₂CO₃ 溶液, 常温下静置 2 h 后在波长 765 nm 下测定吸光度。

1.2.2.4 多酚氧化酶(PPO)和过氧化物酶(POD)活性的测定 称取 5.0 g 莲藕组织样品, 置于研钵中, 加入 5.0 mL 提取缓冲液, 冰浴条件下研磨成匀浆, 于 4 ℃、10000 r/min 离心 30 min, 收集上清液即为酶提取液, 参考曹建康等^[23]方法测定 PPO 和 POD 活性。

1.2.2.5 呼吸强度和乙烯生成速率的计算 将 3 片鲜切莲藕放入固定容器中密闭 2 h, 采用残氧仪测定容器内的 CO₂ 含量, 采用便携式乙烯分析仪测定乙烯含量, 参照刘成红^[24]的方法计算呼吸强度和乙烯生成速率的计算方法。

1.2.2.6 丙二醛(MDA)含量的测定 采用硫代巴比妥酸法^[25]测定鲜切莲藕中的 MDA 含量。称取 2 g 研磨后的鲜切莲藕, 加 20 mL 质量分数为 10% C₂HCl₃O₂ 溶液, 研磨至匀浆, 10000 r/min 下离心 10 min, 取上清液 3 mL, 加入 3 mL 质量分数为 0.6% 硫代巴比妥酸溶液, 沸水浴 15 min 后迅速冷却离心, 取上清液测定在 450、532、600 nm 下测定吸光度。

1.2.2.7 相对电导率的计算 每个处理取 3 片莲藕, 每片莲藕用 1 cm 直径的打孔器切取中间部位大小一致的薄片 3 个, 用蒸馏水冲洗 2 次后置小锥形瓶中, 加 40 mL 蒸馏水, 立即测其电导率 P₀, 放置 3 h 后测其电导率 P₁, 然后煮沸 10 min 以杀死植物组织, 冷却至室温加水至原始刻度并在室温下平衡 10 min, 测其电导率 P₂, 重复 3 次, 取其平均值。相对电导率的计算方法见式(1)。

$$\text{相对电导率}(\%) = \frac{P_1 - P_0}{P_2} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

1.2.2.8 还原糖含量的测定 采用 3,5-二硝基水杨酸法^[23]测定鲜切莲藕中的还原糖含量。称取 2 g 鲜切莲藕, 加入 50 mL 蒸馏水, 于 70 ℃ 水浴 30 min 进行提取, 之后 4000 r/min 离心 10 min, 取上清液 25 mL 定容至 50 mL, 取 2.0 mL 和 1.5 mL 3,5-二硝基水杨酸法, 摇匀后在沸水浴 5 min, 立即冷却后用蒸馏水补至 25 mL, 在 540 nm 下测量吸光度。

1.2.2.9 维生素 C(V_C)含量的测定 采用钼蓝比色

法测定^[26]测定 V_C 含量。称取 20 g 研磨后的鲜切莲藕, 加入草酸-EDTA 溶液, 加入 100 mL 容量瓶定容过滤, 取 10 mL 滤液, 加入 1 mL HPO₃-CH₃COOH 溶液、2 mL 5% H₂SO₄ 溶液, 4 mL 钼酸铵溶液后定容至 50 mL, 静置 15 min 后在 705 nm 下测定吸光度。

1.3 数据处理

采用 Excel 2010 软件对数据进行统计分析作图, SPSS19.0 软件进行综合评分, DPS 软件对所测平均值进行 LSD 法差异显著性分析($P < 0.05$, 为差异显著), SIMCA 软件进行主成分分析(PCA)检验其相关性。

2 结果与分析

2.1 精准温度处理对防褐变剂处理后鲜切莲藕表观色泽、褐变底物及相关酶活性的影响

2.1.1 精准温度处理对防褐变剂处理后鲜切莲藕表型的影响 鲜切莲藕在贮藏过程中容易发生表观颜色的转变, 不同处理鲜切莲藕贮藏期间的表型变化见图 1。由图 1 可见, 贮藏 0~4 d 期间, 各处理间鲜切莲藕表观差异较小, 无明显变化; 在贮藏 6 d 时, 相温组的鲜切莲藕表观颜色未发生明显的变化, 冰温组出现微泛红, 冷藏组鲜切莲藕出现明显泛红和微褐, 表明相温贮藏可较好地维持鲜切莲藕的色泽, 延缓褐变和转红的发生。

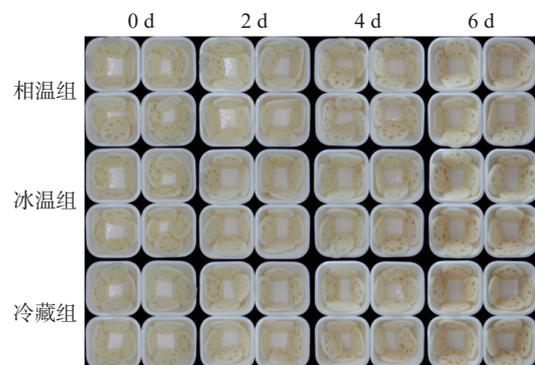


图 1 不同处理对鲜切莲藕表型的影响

Fig.1 Effect of different treatments on phenotype of fresh cut lotus root

2.1.2 精准温度处理对防褐变剂处理后鲜切莲藕色泽和褐变度的影响 L^* 、 a^* 能够评价鲜切莲藕表观色泽的转变^[27], 而褐变度是衡量鲜切莲藕褐变的关键指标, 褐变度越大, 鲜切莲藕的褐变程度越大。不同处理鲜切莲藕贮藏期间色泽和褐变度的变化见表 1。由表 1 可见, 鲜切莲藕 L^* 呈现逐渐降低的趋势, 在整个贮藏期间, 各处理鲜切莲藕 L^* 由大到小次序为相温>冰温>冷藏, a^* 由大到小次序冷藏>冰温>相温; 贮藏 6 d 时, 相温组 L^* 高出冷藏组 4.306% 和冰温组 2.204%, 相温组 a^* 低于冷藏组 21.138% 和冰温组 7.860%。由表 1 还可看出, 鲜切莲藕的褐变度随着贮藏时间的延长而逐渐上升, 贮藏 6 d 前, 各处理间差异较小, 差异不显著($P > 0.05$), 贮藏 6 d 时, 相温、

表1 不同处理对鲜切莲藕色泽和褐变度的影响

Table 1 Effect of different treatments on surface color and browning degree of fresh cut lotus root

指标	处理	贮藏时间(d)			
		0 d	2 d	4 d	6 d
L^*	相温	61.046±3.132 ^a	58.987±2.108 ^a	54.979±4.645 ^a	53.805±1.090 ^a
	冰温	61.046±3.132 ^a	58.028±3.493 ^a	54.217±2.480 ^a	52.619±0.968 ^{ab}
	冷藏	61.046±3.132 ^a	57.590±3.941 ^a	53.156±4.084 ^a	51.488±0.906 ^b
a^*	相温	1.016±0.237 ^a	1.391±0.246 ^a	1.642±0.381 ^a	1.899±0.412 ^a
	冰温	1.016±0.237 ^a	1.556±0.365 ^a	1.770±0.294 ^a	2.061±0.344 ^a
	冷藏	1.016±0.237 ^a	1.594±0.386 ^a	2.072±0.410 ^a	2.408±0.340 ^a
褐变度	相温	0.172±0.025 ^a	0.176±0.073 ^a	0.220±0.042 ^a	0.252±0.062 ^a
	冰温	0.172±0.025 ^a	0.192±0.057 ^a	0.242±0.021 ^a	0.324±0.048 ^{ab}
	冷藏	0.172±0.025 ^a	0.204±0.028 ^a	0.256±0.061 ^a	0.384±0.066 ^a

注:不同小写字母表示每一列每个指标具有显著性差异($P<0.05$)。

冰温、冷藏组鲜切莲藕褐变度分别为0.252、0.324、0.384,相温组的褐变度与冷藏组差异显著($P<0.05$),与冰温组差异不显著($P>0.05$)。综上可知,相温贮藏可以有效延缓 L^* 的升高和 a^* 的降低,抑制褐变度的增加,减缓鲜切莲藕的褐变。

2.1.3 精准温度处理对防褐变剂处理后鲜切莲藕总酚、PPO和POD的影响 酚类物质是鲜切莲藕发生酶促褐变的重要底物,PPO可将酚类底物氧化为醌,醌的聚合形成有色物质,导致褐变的发生,过氧化物酶是与衰老有关的酶, H_2O_2 存在时,POD催化氧化类黄酮和酚类物质,并聚合形成褐色物质。不同处理鲜切莲藕贮藏期间总酚含量、PPO和POD活性变化见表2。由表2可看出,鲜切莲藕总酚含量呈现逐渐降低的趋势,贮藏4和6d时,相温组总酚质量分数分别为2.797、2.063 $mg \cdot 100 g^{-1}$,高于冰温(2.545、1.997 $mg \cdot 100 g^{-1}$)和冷藏组(2.256、1.749 $mg \cdot 100 g^{-1}$),相温组可能是通过维持鲜切莲藕的酚类物质,减少其氧化为醌,进而抑制褐变^[28]。鲜切莲藕的PPO活性逐渐增加,贮藏6d时,相温、冰温和冷藏组PPO活性分别为1.067、1.267、1.467 U/g,可见冷藏的PPO活性最强,高于其他两个处理,褐变最严重,相温组的PPO活性最低,褐变较轻,说明该处理可较好地抑

制PPO酶活性,进而延缓褐变进程。不同处理的POD活性均逐渐上升,贮藏6d时相温、冰温、冷藏组POD活性分别为0.476、0.482、0.501 U/g,相温组POD活性显著高于冷藏组($P<0.05$),与冰温组差异不显著($P>0.05$),这与郑梦林等^[28]研究发现,低温可较好地抑制鲜切莲藕PPO、POD、苯丙氨酸裂解酶(PAL)活性,抑制其褐变的结果相一致。综上可知,相温贮藏抑制鲜切莲藕总酚含量的降低和PPO活性的升高,保持较低的POD活性,进而延缓褐变的发生。

2.2 精准温度处理对防褐变剂处理后鲜切莲藕生理指标的影响

2.2.1 精准温度处理对防褐变剂处理后鲜切莲藕呼吸强度和乙烯生成速率的影响 呼吸强度和乙烯生成速率是鲜切莲藕的两个重要生理指标。不同处理鲜切莲藕贮藏期间呼吸强度和乙烯生成速率变化见图2。如图2所示,0d时鲜切莲藕呼吸强度为64.396 $mg \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$,贮藏6d时冷藏组鲜切莲藕呼吸强度升高至104.856 $mg \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$,均高于相温(94.742 $mg \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$)和冰温组(95.647 $mg \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$),处理间差异显著($P<0.05$);在整个贮藏期间,相温组呼吸强度始终低于冰温组,这表明鲜切后莲藕仍进行

表2 不同处理对鲜切莲藕总酚含量及PPO、POD活性的影响

Table 2 Effects of different treatments on total phenol content and PPO, POD activities of fresh cut lotus root

指标	处理	贮藏时间(d)			
		0 d	2 d	4 d	6 d
总酚($mg \cdot 100g^{-1}$)	相温	3.478±0.010 ^{AA}	3.357±0.045 ^{AA}	2.797±0.120 ^{AB}	2.063±0.094 ^{AC}
	冰温	3.478±0.010 ^{AA}	3.285±0.058 ^{AB}	2.545±0.099 ^{BC}	1.997±0.045 ^{AD}
	冷藏	3.478±0.010 ^{AA}	3.237±0.079 ^{AB}	2.256±0.028 ^{CC}	1.749±0.091 ^{BD}
PPO活性(U/g)	相温	0.667±0.115 ^{AB}	0.733±0.115 ^{AB}	0.867±0.115 ^{AB}	1.067±0.115 ^{BA}
	冰温	0.667±0.115 ^{AC}	0.867±0.115 ^{ACB}	0.933±0.115 ^{AB}	1.267±0.115 ^{AB}
	冷藏	0.667±0.115 ^{AC}	0.933±0.115 ^{AB}	1.133±0.115 ^{AB}	1.467±0.115 ^{AA}
POD活性(U/g)	相温	0.385±0.001 ^{AC}	0.445±0.020 ^{AB}	0.469±0.015 ^{AB}	0.476±0.005 ^{BA}
	冰温	0.385±0.001 ^{AB}	0.464±0.020 ^{AA}	0.477±0.005 ^{AB}	0.482±0.012 ^{AB}
	冷藏	0.385±0.001 ^{AB}	0.486±0.044 ^{AA}	0.496±0.016 ^{AA}	0.501±0.012 ^{AA}

注:不同小写字母表示每一列每个指标的显著性差异($P<0.05$);不同大写字母表示每一行的显著性差异($P<0.05$)。

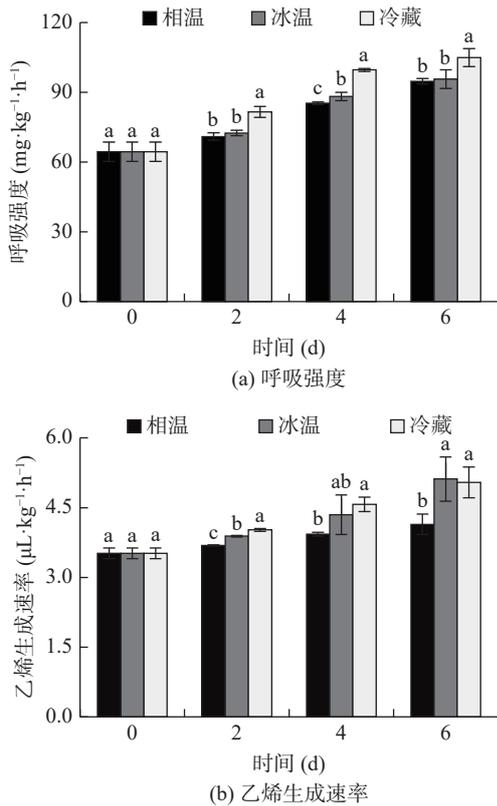


图 2 不同处理对鲜切莲藕呼吸强度和乙烯生成速率的影响

Fig.2 Effects of different treatments on respiration rate and ethylene production rate of fresh cut lotus root

注: 不同小写字母表示同一贮藏时间不同处理的显著性差异 ($P < 0.05$); 图 3~图 4 同。

着旺盛的呼吸代谢^[29-30], 相温组通过抑制呼吸强度进而延长保鲜期。随着贮藏时间的延长, 鲜切莲藕乙烯生成速率也逐渐上升, 相温、冰温和冷藏组乙烯生成速率由 0 d 时的 $3.518 \mu\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 分别升高至贮藏 6 d 时的 4.142 、 5.116 、 $5.042 \mu\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, 在整个贮藏期间各处理乙烯生成速率由大至小的次序为冷藏>冰温>相温, 这表明相温组通过保持较低乙烯生成速率进而延缓鲜切果蔬的成熟衰老进程。康丹丹等^[20]探讨了相温贮藏对兰州百合品质的调控作用, 研究表明相温贮藏环境内温度波动较小, 误差温度为 $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$, 有效抑制了百合的呼吸强度和乙烯生成速率, 延长了百合的休眠期, 本文的研究结果表明相温贮藏同样可以抑制鲜切莲藕的呼吸强度和乙烯生成速率, 进而抑制鲜切莲藕的生理代谢。

2.2.2 精准温度处理对防褐变剂处理后鲜切莲藕 MDA 和相对电导率的影响 MDA 含量是评价果实衰老的重要指标之一, 也是脂膜过氧化作用的主要产物之一, 其含量的增加是脂膜过氧化加强、膜受伤而加剧衰老的表现, 其含量高低可以反映细胞膜脂过氧化的程度, 相对电导率是反映组织细胞膜透性的重要指标, 细胞膜相对电导率越高, 说明细胞膜透性越大, 膜损伤的程度也越大。不同处理鲜切莲藕贮藏期间 MDA 和相对电导率变化见图 3。由图 3 可知, 随着贮藏时间的延长, 鲜切莲藕的丙二醛含量呈现上升的

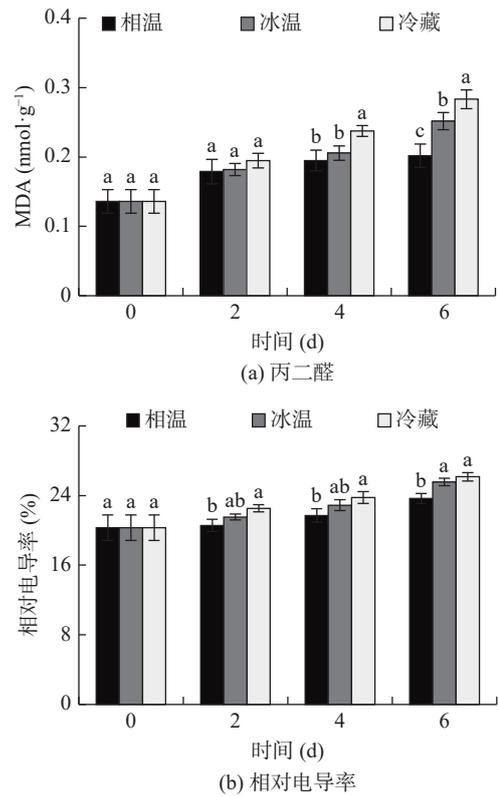


图 3 不同处理对鲜切莲藕丙二醛含量和相对电导率的影响

Fig.3 Effects of different treatments on MDA content and relative conductivity of fresh cut lotus root

趋势, 相温、冰温和冷藏组 MDA 摩尔质量浓度由 0 d 时的 $0.136 \text{ mmol}\cdot\text{g}^{-1}$ 分别升高至贮藏 6 d 时的 0.202 、 0.252 、 $0.283 \text{ mmol}\cdot\text{g}^{-1}$, 冷藏组的 MDA 含量显著高于冰温和相温组 ($P < 0.05$), 这可能时由于贮藏后期冷藏组鲜切莲藕脂膜过氧化程度高、膜受伤程度严重进而导致 MDA 增加^[14]。随着贮藏时间的延长, 鲜切莲藕相对电导率逐渐升高, 贮藏 6 d 时相温、冰温、冷藏组相对电导率分别为 23.664% 、 25.550% 、 26.153% , 其中相温组显著低于冰温和冷藏组 ($P < 0.05$)。综上所述可知, 相温贮藏能够抑制鲜切莲藕 MDA 和相对电导率的增加, 减少膜的损伤, 保护膜完整性。

2.3 精准温度处理对防褐变剂处理后鲜切莲藕营养品质的影响

还原糖是鲜切莲藕最重要的营养指标之一, 由淀粉分解得来, 是生命活动提供能量的重要底物, V_C 是衡量鲜切莲藕营养的重要指标之一。不同处理鲜切莲藕贮藏期间还原糖和 V_C 含量变化见图 2。由图 4 可知, 随着贮藏时间的延长, 各处理组鲜切莲藕还原糖含量逐渐上升, 可能与鲜切莲藕贮藏期间因生理作用消耗的还原糖低于总糖分解的还原糖含量有关^[28-29]。0 d 时鲜切莲藕还原糖质量分数为 0.295% , 贮藏 6 d 时, 相温、冰温和冷藏组还原糖质量分数分别为 0.599% 、 0.619% 、 0.676% , 还原糖质量分数由小至大的次序为相温<冰温<冷藏, 说明相温可抑制淀粉分解, 具有较少的还原糖含量。0 d 时鲜切莲藕的 V_C 质量分数为 $54.538 \text{ mg}\cdot\text{100g}^{-1}$, 随着贮藏时间

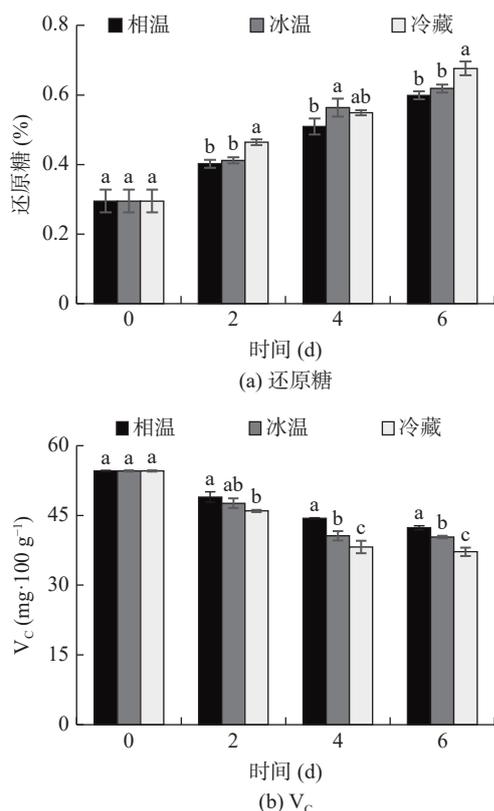


图4 不同处理对鲜切莲藕还原糖含量和V_C含量的影响
Fig.4 Effects of different treatments on reducing sugar content and V_C content of fresh cut lotus root

的延长,各处理的V_C含量逐渐减少,其中相温组V_C含量减少速率最低,贮藏6d时,V_C含量达到最低值,相温、冰温、冷藏组V_C质量分数分别为42.324、40.344、37.175 mg·100g⁻¹。综上所述,相温贮藏能够抑制鲜切莲藕还原糖的增加并较好地维持鲜切莲藕的V_C含量。

2.4 PCA法综合评价鲜切莲藕品质

利用贮藏期鲜切莲藕测定的L*、a*、褐变度、还原糖、V_C、MDA、相对电导率、呼吸强度、乙烯生成速率、总酚、PPO、POD作为不同纬度作PCA分析,自动拟合出两个主成分,主成分特征值及贡献率见表3。由表3可以看出,用主成分分析法可以提取

出2个主成分,包含的信息量占总信息量的97.022%,且可以充分反映原始数据的主要信息。

表3 主成分特征值及贡献率
Table 3 Eigenvalues and contribution rate of principal components

特征值	贡献率(%)	累计贡献率(%)
11.273	93.945	93.945
0.369	3.077	97.022

以每个因子得分FAC1、FAC2所对应的特征值为权数,与该因子得分相乘可得主成分得分,又根据主成分得分计算相关性综合得分,本文称之为F,计算公式为F=(F1×93.945+F2×3.077)/97.022,由此计算出贮藏期间3个处理与鲜切莲藕品质指标综合相关性的相对程度,主成分得分表见表4。由表4可以得出,综合得分越高,说明该种处理方式所得的鲜切莲藕品质越好,排名越高;反之则越低。在贮藏期间,综合得分相温>冰温>冷藏。综上所述,相温贮藏可较好地维持鲜切莲藕原有品质,延缓褐变发生。

2.5 基于多元化变量统计分析法相温贮藏对防褐变剂处理后鲜切莲藕褐变指标的影响

本文尝试使用主成分分析(PCA)、正交偏小二乘判别分析(OPLS-DA),以更全面的方式分析鲜切莲藕理化指标与不同处理间的关系,以探索其间的相对变异性。

主成分分析(PCA)是利用降维的思想通过正交变换相关性的变量转换成一组不相关的变量,转换后的变量称为主成分。利用测得的鲜切莲藕L*、a*、褐变度、MDA、相对电导率、总酚、PPO、POD指标作为不同维度进行PCA分析,自动拟合出两个主成分,不同处理的PCA得分图与载荷图见图5。如图5所示,第一主成分与第二主成分贡献率分别为93.7%、3.82%,累计贡献率97.52%,基本代表所有信息。可看出0d与其他贮藏时间在空间位置的距离较远,分布在第四象限。贮藏2d时,3个处理间分布在第一象限,距离较近,表明处理间差异较小。贮藏4d和6d时,3个处理间分布在第二象限和第三象限,3个

表4 主成分得分表

Table 4 Score table of principal components

处理组	FC1	FC2	F1	F2	F	F平均	排名
相温	1.28087	0.95078	4.300557982	0.577554831	4.182484961	1.035443212	1
	0.61838	1.95078	2.076228692	1.185008533	2.047964129		
	-0.0597	2.95078	-0.200444473	1.792462235	-0.137240519		
	-0.62366	3.95078	-2.093956445	2.399915937	-1.951435724		
冰温	1.28087	4.95078	4.300557982	3.007369638	4.259545217	0.129346322	2
	0.34981	5.95078	1.174497168	3.61482334	1.251890786		
	-0.44529	6.95078	-1.495074023	4.222277042	-1.313751341		
	-1.17915	7.95078	-3.959030147	4.829730744	-3.680299372		
冷藏	1.28087	8.95078	4.300557982	5.437184446	4.336605473	-0.79194921	3
	0.0561	9.95078	0.188357369	6.044638148	0.374086131		
	-0.88293	10.95078	-2.96446295	6.65209185	-2.659479141		
	-1.67615	11.95078	-5.627721987	7.259545552	-5.219009301		

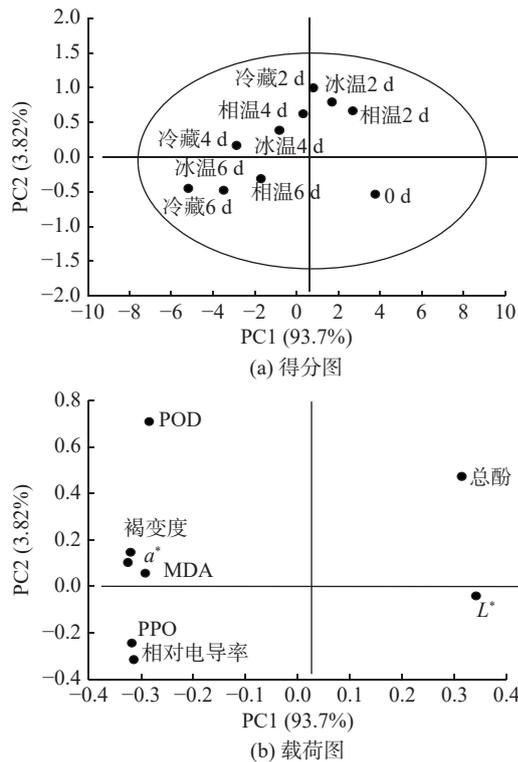


图 5 不同处理的 PCA 得分图与载荷图

Fig.5 Score scatter plot and loading scatter plot of different treatments by PCA

处理空间位置的距离较远, 处理间差异较显著。鲜切莲藕指标的载荷图, 与得分图结合起来在相同位置, 该处理与这些指标相关性越强, 否则越弱。由图 5 可以看出, 贮藏 4 d 时各处理对应载荷图在第二象限, 冷藏组与鲜切莲藕的褐变度、MDA、 a^* 相关性较高, 贮藏 6 d 时各处理对应载荷图在第三象限, 冷藏组与 PPO、相对电导率的相关性较高, 而相温组与这些指标相关性较低。

3 结论

采用“精准温控箱+蓄冷剂+普通冷库”形成的相温环境下鲜切莲藕在贮藏 6 d 时 a^* 和褐变度分别为 1.899、0.252, 均低于其他处理组, 与初值相比相温组未出现明显变化, 而冰温组出现微泛红, 冷藏组出现明显泛红和微褐。同时相温组在贮藏期间有效抑制总酚的降低和 PPO、POD 的升高, 抑制鲜切莲藕的呼吸强度和乙烯生成速率, 延缓 MDA 和相对电导率的增加, 减缓还原糖的升高和 V_C 含量的降低。通过 SPSS 综合评分显示, 相温组综合得分最高, 鲜切莲藕的褐变程度最弱。但相温环境需要良好的冷藏条件, 对硬件要求较高, 适用于有规模的工厂化保鲜处理。另外, 本文仅从褐变角度研究了相温组对鲜切莲藕防褐变效果的影响, 没有从微生物角度进行全面考虑, 以后相温组对鲜切莲藕贮藏过程中微生物多样性的影响是值得进一步研究的方向。

参考文献

[1] GAO H, CHAI H K, CHENG N, et al. Effects of 24-epibrassinolide on enzymatic browning and antioxidant activity of fresh-cut

lotus root slices[J]. *Food Chemistry*, 2017, 217: 45–51.

[2] 钟巧玲, 郜海燕, 陈杭君, 等. 鲜切莲藕保鲜技术研究进展[J]. *浙江农业科学*, 2017, 58(6): 1024–1028. [ZHONG Q L, GAO H Y, CHEN H J, et al. Research progress of fresh cut lotus root preservation technology[J]. *Zhejiang Agricultural Science*, 2017, 58(6): 1024–1028.]

[3] SUN Y, ZHANG W, ZENG T, et al. Hydrogen sulfide inhibits enzymatic browning of fresh-cut lotus root slices by regulating phenolic metabolism[J]. *Food Chemistry*, 2015, 177(15): 376–381.

[4] 李正一, 连成杰, 孙杰, 等. 莲藕不同部位多糖的理化特征与抗氧化活性研究[J]. *食品科学技术学报*, 2016, 34(4): 18–25. [LI Z Y, LIAN C J, SUN J, et al. Study on physicochemical characteristics and antioxidant activities of polysaccharides from different parts of lotus root[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2016, 34(4): 18–25.]

[5] 张春洁, Gouda M H B, 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. [ZHANG Chunjie, GOUDA M H B, WANG Junhao, et al. Effects of sodium alginate and natural chemical composite coating on quality of fresh-cut lotus root during storage[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 37(1): 175–184.]

[6] ALI S, KHAN A S, ANJUM M A, et al. Aloe vera gel coating delays post-cut surface browning and maintains quality of cold stored lotus (*Nelumbo Nucifera* Gaertn.) root slices[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 256: 108612.

[7] 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. [WANG Qiucheng, LÜ Fen, GAO Ying, et al. Effect of citric acid on enzymatic browning of fresh cut lotus root[J]. *Chinese Food Additive*, 2016(8): 166–171.]

[8] BO W A, DA L A, DT A, et al. Effects of simultaneous ultrasonic and cysteine treatment on antibrowning and physicochemical quality of fresh-cut lotus roots during cold storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 168: 111294.

[9] GOUDA M H B, ZHANG C, PENG S, et al. Combination of sodium alginate-based coating with L-cysteine and citric acid extends the shelf-life of fresh-cut lotus root slices by inhibiting browning and microbial growth[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 175: 111502.

[10] GAO J, LUO Y, TURNER E, et al. Mild concentration of ethanol in combination with ascorbic acid inhibits browning and maintains quality of fresh-cut lotus root[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2017, 128: 169–177.

[11] 焦小华, 王艳颖, 金峰, 等. 抗坏血酸对鲜切莲藕品质的影响[J]. *现代园艺*, 2020, 43(19): 34–35, 37. [JIAO Xiaohua, WANG Yanying, JIN Feng, et al. Effect of ascorbic acid on quality of fresh cut lotus root[J]. *Modern Horticulture*, 2020, 43(19): 34–35, 37.]

[12] 刘箕萋. 天冬氨酸抑制鲜切马铃薯褐变的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019: 10–37. [LIU JIJI. Study on aspartic acid inhibiting browning of fresh cut potato[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2019: 10–37.]

[13] LARA G R, UEMURA K, KHALID N, et al. Layer-by-Lay-

- er electrostatic deposition of edible coatings for enhancing the storage stability of fresh-cut lotus root (*Nelumbo nucifera*) [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2020, 13: 722–726.
- [14] XING Y, LI X, XU Q, et al. Effects of chitosan-based coating and modified atmosphere packaging (MAP) on browning and shelf life of fresh-cut lotus root (*Nelumbo nucifera* Gaerth) [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2010, 11(4): 684–689.
- [15] 冯程程, 于筠, 王春玲. 不同贮藏温度下鲜切紫甘薯褐变相关因素研究 [J]. *食品工业科技*, 2020, 41(6): 244–249. [FENG Chengcheng, YU Yun, WANG Chunling. Study on browning related factors of fresh cut purple sweet potato under different storage temperatures [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(6): 244–249.]
- [16] 郭宇婷, 刘帅民, 宋汉良, 等. 贮藏温度对槟榔果仁褐变的影响 [J]. *食品工业*, 2019, 40(7): 63–65. [GUO Yuting, LIU Shuaimin, SONG Hanliang, et al. Effect of storage temperature on browning of areca nut [J]. *Food Industry*, 2019, 40(7): 63–65.]
- [17] 林玉钦, 邓浩, 冯建成, 等. 贮藏温度对“保研-7号”红毛丹果皮褐变及果肉品质的影响 [J]. *保鲜与加工*, 2020, 20(2): 46–51. [LIN Yuqin, DENG Hao, FENG Jiancheng, et al. Effects of storage temperature on peel browning and flesh quality of “Baoyan-7” rambutan [J]. *Preservation and Processing*, 2020, 20(2): 46–51.]
- [18] 李齐, 张鹏, 刘景超, 等. 灰度关联法分析冰温贮藏对鲜枸杞品质的影响 [J]. *包装工程*, 2021, 42(5): 55–64. [LI Qi, ZHANG Peng, LIU Jingchao, et al. Effects of controlled freezing point Storage on quality of fresh *lycium barbarum* analyzed by gray correlation method [J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(5): 55–64.]
- [19] 张鹏, 李天元, 李江阔. 贮藏微环境气体调控对精准相温贮藏后阳丰甜柿货架品质的影响 [J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(10): 116–123. [ZHANG Peng, LI Tianyuan, LI Jiangkuo. Effect of storage microenvironment gas regulation on shelf quality of yangfeng sweet persimmon after precision phase temperature storage [J]. *Food and Fermentation Industry*, 2017, 43(10): 116–123.]
- [20] 康丹丹, 张鹏, 李江阔, 等. 相温贮藏对采后兰州百合冷藏期间品质的影响 [J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(24): 175–181. [KANG Dandan, ZHANG Peng, LI Jiangkuo, et al. Effect of relative temperature storage on quality of lanzhou lily during cold storage [J]. *Food and Fermentation Industry*, 2020, 46(24): 175–181.]
- [21] 李翠红, 冯毓琴, 魏丽娟, 等. 保鲜剂对百合鳞片常温贮藏期间品质及抗氧化活性的影响 [J]. *农产品质量与安全*, 2018, 93(3): 89–93. [LI Cuihong, FENG Yuqin, WEI Lijuan, et al. Effects of preservatives on quality and antioxidant activity of lily scales during normal temperature storage [J]. *Quality and Safety of Agricultural Products*, 2018, 93(3): 89–93.]
- [22] MIN T, XIE J, ZHENG M, et al. The effect of different temperatures on browning incidence and phenol compound metabolism in fresh-cut Lotus (*Nelumbonucifera* G.) root [J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2017, 123(1): 69–76.
- [23] 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: 59–62, 101–103. [CAO Jiankang, JIANG Weibo, ZHAO Yumei. *Experimental guidance of postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables* [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 59–62, 101–103.]
- [24] 刘成红. 1-MCP 结合真空包装双重处理对柿果贮藏保鲜效果影响的研究 [D]. 天津: 天津科技大学, 2008: 18–19. [LIU C H. Effect of 1-MCP combined with vacuum packaging on persimmon fruit preservation [D]. Tianjin: Tianjin, 2008: 18–19.]
- [25] 郝再彬. 植物生理实验 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 106–107. [HAO Zaibin. *Plant physiology experiment* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004: 106–107.]
- [26] 李军. 钼蓝比色法测定还原型维生素 C [J]. *食品科学*, 2000, 21(8): 42–45. [LI Jun. Determination of reduced vitamin C by molybdenum blue colorimetry [J]. *Food Science*, 2000, 21(8): 42–45. University of Science and Technology, 2008: 18–19.]
- [27] WANG D, CHEN L K, MA Y, et al. Effect of UV-C treatment on the quality of fresh-cut lotus (*Nelumbo nucifera* Gaerth) root [J]. *Food chemistry*, 2018, 278: 659–664.
- [28] 黄彭, 丁捷, 胡晓敏, 等. 鲜切果蔬物理防褐保鲜的研究进展 [J]. *园艺学报*, 2021, 48(6): 1217–1232. [HUANG Peng, DING Jie, HU Xiaomin, et al. Advances in fresh-cut fruit and vegetables based on physical anti-browning technology [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2021, 48(6): 1217–1232.]
- [29] 郑梦林. 不同贮藏条件对鲜切莲藕褐变影响及 PAL、PPO 和 POD 的表达调控 [D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2016: 12–37. [ZHENG Menglin. Effects of Different storage conditions on browning of fresh cut lotus root and expression regulation of PAL, PPO and POD [D]. Wuhan: Wuhan University of Light Industry, 2016: 12–37.]
- [30] 许金蓉. 莲藕采前及采后的生理生化研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2004: 7–8. [XU Jinrong. *Physiological and biochemical studies on lotus root before and after harvest* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2004: 7–8.]