

主成分分析 γ -氨基丁酸-壳聚糖涂膜对人参果贮藏品质的影响

梁金甜, 曾丽萍*, 赵文汇, 潘艳南, 熊雪淇, 王晓华

(1.红河学院 化学与资源工程学院, 云南 蒙自 661199; 2.昆明咚咚食品有限公司, 昆明 603205)

摘要: **目的** 探究 γ -氨基丁酸 (GABA)-壳聚糖涂膜对人参果的保鲜效果。**方法** 将人参果在 12 °C 下贮藏 28 d, 研究 10 mmol/L GABA-壳聚糖涂膜处理对人参果贮藏期间营养品质和生理生化指标的影响。**结果** 与对照组相比, 采用 GABA-壳聚糖涂膜处理能显著提高人参果的感官品质, 抑制其呼吸作用, 降低质量损失率, 降低 PPO 和 POD 酶活性, 维持可溶性固形物和可滴定酸含量, 减缓 MDA 的积累, 同时有效保持较高的 Vc 和总黄酮含量, 从而延缓果实软化及品质劣变进程。通过主成分分析 (PCA) 提取出 2 个主成分, 累计方差贡献率为 86.86%, 较好地描述了人参果贮藏期间品质的变化。此外, 经 PCA 分析发现, 贮藏 28 d 时处理组的果实品质与贮藏 14~21 d 时对照组的果实品质较为接近, 进一步证实 GABA-壳聚糖处理有助于人参果贮藏品质的稳定。**结论** 采用 GABA-壳聚糖涂膜处理能够延缓人参果采后软化、褐变及衰老进程, 从而提高果实的贮藏期。

关键词: γ -氨基丁酸; 涂膜; 人参果; 主成分分析

中图分类号: TS205 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2024)01-0165-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.01.019

Principal Component Analysis of Effects of γ -aminobutyric Acid-chitosan Coating on Storage Quality of Pepino Fruits

LIANG Jintan, ZENG Liping*, ZHAO Wenhui, PAN Yannan, XIONG Xueqi, WANG Xiaohua

(1. School of Chemistry and Resources Engineering, Honghe University, Yunnan Mengzi 661199, China;
2. Kunming Dongdong Food Co., Ltd., Kunming 603205, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the preservation performance of γ -aminobutyric acid (GABA)-chitosan coating on pepino fruits. The pepino fruits were stored at 12 °C for 28 d. The effects of 10 mmol/L GABA-chitosan coating treatment on the nutritional quality and physiological and biochemical parameters of pepino fruits during storage were investigated. Compared with the control group, GABA-chitosan coating treatment significantly improved the sensory quality of pepino fruits, inhibited their respiration, reduced weight loss, PPO and POD enzyme activities, maintained soluble solids and titratable acid contents, and slowed down MDA accumulation, while effectively maintaining high Vc and total flavonoid contents, thus delaying fruit softening and quality deterioration. Two principal components were extracted by principal component analysis (PCA), with a cumulative variance contribution of 86.86%, which could better explain the quality changes of pepino fruits during storage. In addition, PCA analysis revealed that the 28 d treatment group was closer to the 14-21 d control group, further confirming that the GABA-chitosan treatment contributed to the stabilization of the storage quality of pepino fruits. In conclusion, GABA-chitosan coating treatment can delay the

收稿日期: 2023-03-27

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金 (2023J1113); 云南省大学生创新训练计划一般项目 (CX2022134)

*通信作者

postharvest softening, browning and senescence of pepino fruits, thus improving the storage life of the fruits.

KEY WORDS: γ -aminobutyric acid; coating; pepino fruit; principal component analysis

人参果 (*Solanum muricatum*) 又称香瓜茄、艳果等, 是茄科 (Solanaceae) 茄属 (*Solanum*) 的多年生草本植物^[1]。人参果起源于南美洲安第斯山脉, 经过引种驯化, 从 20 世纪 80 年代才开始在我国云南、甘肃等地大面积种植, 商业化种植起步相对较晚^[2]。人参果具有皮薄肉厚、清香多汁、热量低等特点。此外, 人参果富含营养和多种活性成分, 如维生素、矿物质、抗氧化物质等。人参果在美容养颜、利尿、降血糖、抗菌消炎, 以及预防高血压、肥胖病、冠心病、癌症等方面具有积极作用, 被誉为“生命之火”“防癌之王”, 是一种经济价值高的绿色保健水果^[3]。人参果在贮藏时极易腐烂, 其表皮易干燥起裂纹, 容易出现黑心、风味变差等问题, 严重影响其商品价值, 导致人参果的贮藏期较短。

γ -氨基丁酸 (γ -aminobutyric acid, GABA) 作为一种公认安全 (Generally recognized as safe, GRAS) 的化合物, 是植物性食物中的必需营养素, 它广泛存在于动物、植物和细菌中^[4]。作为一种重要的内源性植物信号因子, GABA 通过调节光合作用、呼吸作用、激素水平, 以及提高抗氧化防御系统等途径, 有助于植物细胞抵抗生物和非生物胁迫^[5]。Gao 等^[6]使用 GABA 溶液浸泡鲜切苹果, 可以有效抑制其褐变, 增强抗氧化酶活性。Fan 等^[7]采用 GABA 处理橄榄, 可以降低质量损失率, 抑制总叶绿素和总固形物含量的降低, 保持较高的可溶性糖和单宁含量。与其他保鲜技术相比, GABA 具有安全、健康、环保等优势, 已广泛应用于苹果^[8]、双孢蘑菇^[9]等果蔬贮藏保鲜中。壳聚糖是一种无毒的食用涂膜, 具有良好的成膜性、渗透性和抗菌性能, 被广泛用于水果和蔬菜采后保鲜^[10]。以壳聚糖为基材, 添加有机酸、生长调节剂或天然提取物等保鲜剂进行复合涂膜, 已被广泛应用于奶油苹果^[11]、蓝莓^[12]等果蔬的贮藏保鲜。

目前, 将 GABA-壳聚糖应用于人参果贮藏保鲜的报道较少。文中测定了贮藏期间人参果的相关指标, 并结合主成分分析 (PCA) 方法进行多变量降维处理, 对各项指标进行相关性分析, 探究 GABA-壳聚糖处理对人参果采后品质的影响, 以期为人参果采后贮藏保鲜技术的研究开发提供理论依据。

1 实验

1.1 材料与试剂

主要材料: 人参果, 购于蒙自市生鲜果蔬批发市场, 品种为“圆果一号”, 挑选大小相近、果型端正、无病虫害、无机械伤及成熟度一致的人参果。

主要试剂: γ -氨基丁酸, 食品级, 山东省阳成生物科技有限公司; 壳聚糖, 食品级, 河南华悦化工产品有限公司; 二氯甲烷、乙醇 (95%)、硫酸、氢氧化钠、3,5-二硝基水杨酸、盐酸、甲醇、福林酚、冰乙酸、乙酸钠、邻苯二酚、三氯乙酸、铁氰化钾、愈创木酚、过氧化氢等, 均为分析纯, 国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

主要仪器与设备: AR1140 型数显电子天平, 梅特勒-托利多仪器有限公司; HWS26 型电热恒温水浴锅, 上海一恒科技有限公司; SY-1022 型果蔬呼吸测定仪, 石家庄世亚科技有限公司; TA. new plus 型质构仪, 上海瑞芬国际贸易有限公司; TGL200M 型台式冷冻离心机, 湖南湘立科技仪器有限公司; BC/BD-200HEP 型冰箱, 青岛海尔特种电冰柜有限公司; METASH 紫外-可见分光光度计, 上海元析仪器有限公司; LB90A 型糖度计, 广州市铭睿电子科技有限公司。

1.3 样品前处理方法

为了筛选适宜人参果保鲜的 GABA 浓度, 在实验前期通过人参果感官指标筛选了 GABA 浓度 (0、5、10、15 mmol/L) (数据未给出), 确定 GABA 的最佳浓度为 10 mmol/L, 并用于后续保鲜实验。将符合要求的样品置于 12 °C 冰箱中预冷 12 h, 在预冷后将样品随机分成 2 组。以不做任何处理为对照组, 将 10 mmol/L GABA 溶解于质量分数为 1% 的壳聚糖膜液中, 浸泡 5 min, 取出自然晾干, 作为处理组。随后将人参果分装于聚乙烯塑料盒内, 并置于 12 °C 下贮藏, 每盒质量为 (350±15)g, 各处理设置 3 个平行实验, 每隔 7 d 测定样品的各项感官指标和理化指标。

1.4 指标测定

1.4.1 感官评价

按照 GB/T 1629.1—2012《感官分析 选拔、培训与管理评价员一般导则 第 1 部分 优选评价员》对食品专业学生进行培训, 挑选出 12 名学生对人参果进行感官评价。分别从感官属性 (颜色、外观、气味、味道、质地和总体接受度) 评价贮藏 14 d 和 28 d 的人参果的品质, 以 5 为最佳, 3 为可接受, 1 为最差, 对感官评价结果进行量化分析。

1.4.2 质量损失率

准确称取样品的初始质量和取样终点质量, 计算公式: 质量损失率 = (初始质量 - 取样终点质量) / 初

始质量*100%。

1.4.3 硬度

采用 TA. new plus 质构仪进行测试,选择 TA/2 探头,测试速度为 1.5 mm/s,测试距离为 5 mm。每组随机抽取 3 个人参果,轻轻剥下果皮,并测定果肉的硬度。注意取样点间隔大于 5 mm,每个果平行测试 6 次,取平均值。

1.4.4 呼吸强度

采用果蔬呼吸测定仪测定,平行测试 3 次,取平均值。

1.4.5 可溶性固形物含量

每组随机取 3 个人参果,经去皮榨汁后,取其滤液滴加到已调零校准后的糖度计上,平行测试 3 次,取平均值。

1.4.6 可滴定酸含量

参照文献[13]的方法并稍加修改。准确称取 5.00 g 样品,加入少量石英砂,研磨成匀浆,加入 100 mL 蒸馏水,充分混匀。经过滤后取 20 mL 上清液,滴入 3 滴酚酞,用已标定好的 0.1 mol/L NaOH 滴定。滴定至溶液初显粉色,且在 30 s 内不褪色为终点,记录消耗 NaOH 溶液的用量,重复测试 3 次。再用蒸馏水代替滤液进行滴定,作为空白对照。

1.4.7 维生素 C 含量

参照文献[13]的方法并稍加修改。采用紫外分光光度法进行测定。将 2.00 g 人参果加入 5 mL 体积分数为 1%的 HCl 中冰浴研磨,然后转移至棕色离心管中离心(10 000 r/min, 20 min, 4 °C),取 0.2 mL 上清液,加入 0.2 mL 体积分数为 10%的 HCl,用蒸馏水将其体积调节至 10 mL。于 243 nm 处测定其吸光值,利用标准曲线计算 Vc 的含量。

1.4.8 总黄酮含量

参照文献[14]的方法并稍加修改。将 1.00 g 人参果加入 5 mL 体积分数为 1%的 HCl-甲醇溶液中冰浴研磨,然后转移至棕色离心管中超声(40 °C, 30 min),取出后离心(5 000 r/min, 30 min, 4 °C)。取 2 mL 上清液,置于 10 mL 容量瓶中,先加 0.3 mL 质量分数为 5%的 NaNO₂ 溶液,摇匀后静置 6 min。再加入 0.3 mL 质量分数为 10%的 Al(NO₃)₃ 溶液,摇匀后静置 6 min。再加入 4 mL 质量分数为 4%的 NaOH 溶液,以及体积分数为 30%的乙醇溶液,并定容至 10 mL,摇匀后静置 15 min,于 510 nm 处测定其吸光度,利用标准曲线计算总黄酮的含量。

1.4.9 丙二醛含量

丙二醛(MDA)含量的测定采用南京建成生物工程研究所生产的商业检测试剂盒。

1.4.10 PPO 和 POD 的测定

参照文献[15]的方法并稍加修改。称取 5.00 g 人参果,加入 5 mL 0.01 mmol/L 的乙酸-乙酸钠缓冲溶液(pH 为 5.5,含质量分数 4%的 PVPP),冰浴研磨至匀浆,在 4 °C下提取 1 h,在 4 °C下离心(10 000 r/min) 30 min,收集上清液作为酶提取物,用于后续 PPO 和 POD 活性的测定。

吸取 0.1 mL 酶提取物、2 mL 0.1 mol/L 的乙酸-乙酸钠缓冲溶液(pH 为 5.5)和 0.5 mL 50 mmol/L 的邻苯二酚溶液。在 420 nm 处测定上述反应液的吸光度,共测定 3 min, PPO 的活性以每分钟吸光度变化 0.01 为 1 个酶活单位(U)。吸取 0.5 mL 酶提取物、3 mL 愈创木酚(2%)和 0.5 mL H₂O₂(500 mmol/L),在 470 nm 处测定上述反应液的吸光度,共测定 3 min, POD 的活性以每分钟吸光度变化 0.01 为 1 个酶活单位(U),结果表示为 U/(g·min)。

1.5 数据处理与分析

采用 SPSS 22.0 软件对数据进行显著性分析($P < 0.05$ 表示显著性差异, $P < 0.01$ 表示极显著性差异)、PCA 和相关性分析,采用 Origin 2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 GABA-壳聚糖涂膜对人参果感官特性的影响

感官特性对消费者评价果蔬品质及其购买行为具有重要意义^[16]。从图 1 可以看出,在贮藏至 14 d 时,处理组和对照组在颜色、外观、气味、味道、质地和总体接受度方面的得分均超过 3,且处理组的得分总体高于对照组的得分,说明经 GABA-壳聚糖处理后人参果色泽鲜艳、气味宜人、脆嫩多汁、酸甜可口;未经处理的果实气味得分较高,这可能是因人参果不断成熟,会散发出浓郁的香味。在贮藏至 28 d 时,处理组的各项感官指标得分仍超过 3,说明涂膜能够在抑制果实衰老的同时,还保留了人参果的感官特性^[17]。对照组人参果过于成熟,其表皮干燥、出现裂纹,果实质地软烂、风味变淡,散发出少量令人不愉快的酒精味,极大地影响了商品的价值。由此可见,经过 GABA-壳聚糖涂膜处理后,能够在贮藏过程中有效保持果实的特征感官品质。

2.2 GABA-壳聚糖涂膜对人参果质量损失率的影响

质量损失率是果蔬保鲜重要的品质指标之一,该指标可反映呼吸作用对植物中有机物的消耗程度,以及蒸腾作用促使植物组织失水的情况^[18]。从图 2 可以看出,随着贮藏时间的延长,人参果的质量损失率不

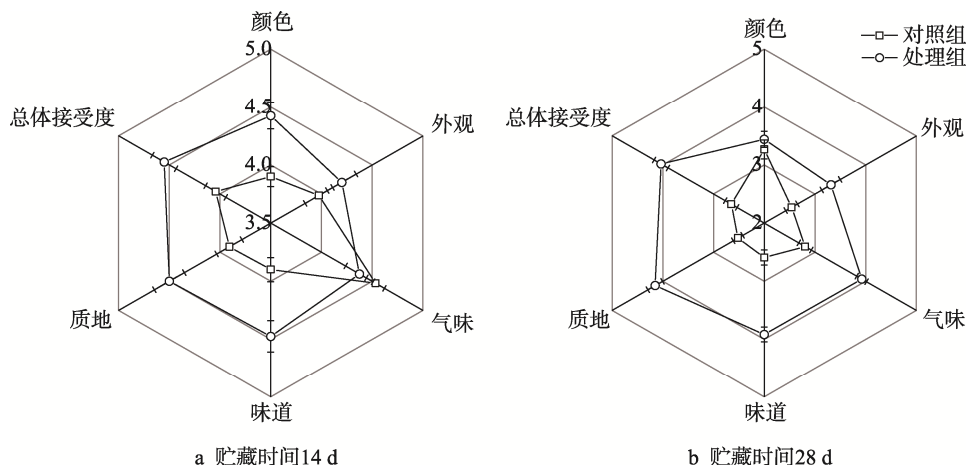


图1 GABA-壳聚糖涂膜对人参果感官评价的影响

Fig.1 Effect of GABA-chitosan coating on sensory evaluation of pepino fruits

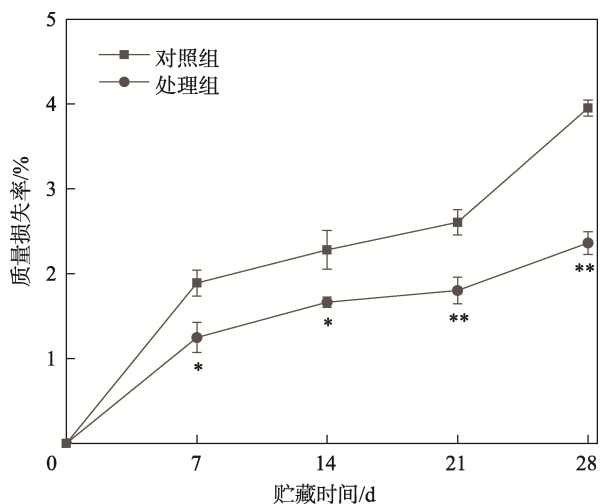


图2 GABA-壳聚糖涂膜对人参果质量损失率的影响

Fig.2 Effect of GABA-chitosan coating on weight loss of pepino fruits

断增大,且处理组的质量损失率显著低于对照组 ($P<0.05$)。在贮藏至 28 d 时,处理组果实的质量损失率仅为 2.36%,远低于对照组的 3.95%。处理组果实的质量损失率显著低于对照组,这一方面可能因人参果表面的壳聚糖起到了阻隔气体和水分的半透性屏障作用,降低了呼吸强度和水分损失,从而减缓了果实的脱水和皱缩^[19];另一方面可能因 GABA 作为小分子渗透调节物质,能够降低细胞渗透压,提高细胞保水性能,维持膜的完整性,并降低果实的代谢活性^[20],从而降低人参果的质量损失率。由此可见,采用 GABA-壳聚糖涂膜可显著抑制人参果的质量损失。

2.3 GABA-壳聚糖涂膜对人参果硬度的影响

在果实成熟和软化过程中,果实细胞壁中的果胶通常会逐渐降解,导致细胞壁结构的完整性被破坏,果实的薄壁组织被软化,果实的硬度下降^[21]。从图 3

可以看出,在贮藏期间人参果的硬度逐渐下降。此外,与对照组相比,处理组的果实硬度显著高于对照组果实的硬度 ($P<0.05$)。在贮藏至 28 d 时,处理组果实的硬度比对照组果实的硬度高 32.84%,说明 GABA-壳聚糖涂膜处理可以有效延缓人参果的软化和成熟过程。研究发现,适宜浓度的 GABA-壳聚糖涂膜处理可以延缓蓝莓^[22]果实的软化进程,并维持其较高的硬度。这进一步证实 GABA-壳聚糖涂膜在保持果实硬度方面具有积极作用。

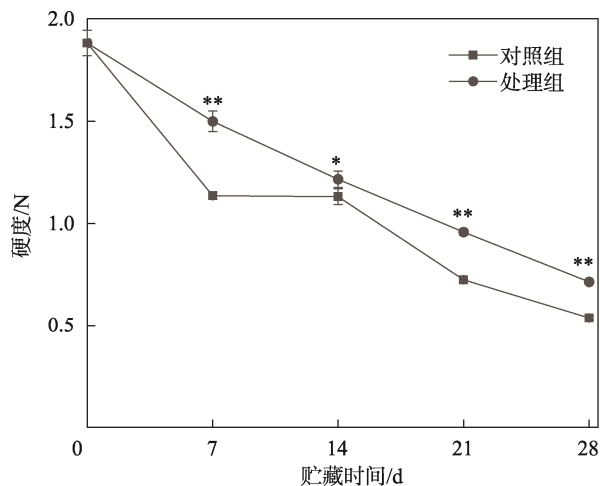


图3 GABA-壳聚糖涂膜对人参果硬度的影响

Fig.3 Effect of GABA-chitosan coating on firmness of pepino fruits

2.4 GABA-壳聚糖涂膜对人参果呼吸强度的影响

呼吸强度是决定新鲜果实采后品质和耐贮性的重要因素之一,呼吸强度越大,代谢越旺盛^[23]。从图 4 可以看出,在贮藏至 7 d 时,处理组的呼吸强度极显著低于对照组 ($P<0.01$)。这可能是因采用壳聚糖涂膜后封闭了果实的气孔,或者 GABA 小分子调节

了果实的生理代谢, 导致其呼吸强度显著低于对照组。在贮藏至 21~28 d 时, 人参果的呼吸强度缓慢上升, 且处理组果实的呼吸强度显著高于对照组 ($P<0.05$)。这可能是因 GABA-壳聚糖处理能够在贮藏初期有效减缓人参果的呼吸作用, 减少其体内营养物质的消耗, 抑制果实的成熟衰老进程^[22], 在处理后期可以促进人参果采后果实变黄, 提高其呼吸强度, 促进果实采后成熟。

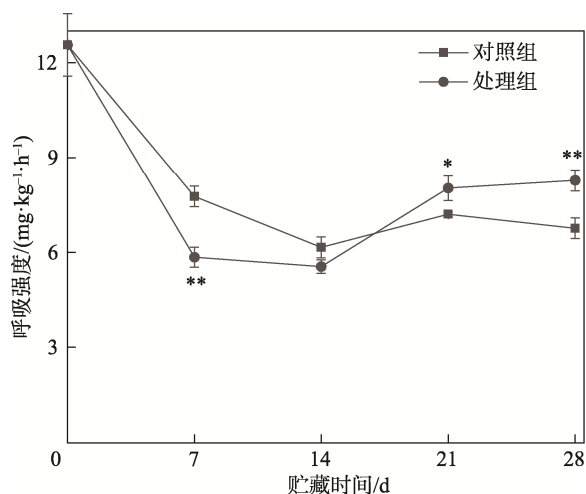


图 4 GABA-壳聚糖涂膜对人参果呼吸强度的影响
Fig.4 Effect of GABA-chitosan coating on respiratory intensity of pepino fruits

2.5 GABA-壳聚糖涂膜对人参果可溶性固形物和可滴定酸含量的影响

可溶性固形物和可滴定酸是果蔬贮藏过程中重要的品质和风味指标。一般来说, 果实在成熟过程中, 其可溶性固形物含量和糖含量会增加, 可滴定酸度和有机酸含量会降低^[24]。从图 5a、b 可以看出, 在贮藏 0~21 d 时, 各组人参果的固形物含量不断增大, 且处理组果实的固形物含量显著高于对照组 ($P<0.05$)。在贮藏 21~28 d 时, 各组果实的固形物含量开始略微下降。人参果的可滴定酸含量逐渐下降, 且在整个贮藏期间处理组果实的可滴定酸含量均高于对照组。在贮藏 21~28 d 时, 所有样品的可滴定酸含量的下降趋势明显, 且处理组显著高于对照组 ($P<0.05$)。研究发现, 在采后贮藏过程中, 外源 GABA 处理可使果实维持较高的固形物和可滴定酸含量, 改善果实的贮藏品质^[25]。这说明 GABA-壳聚糖涂膜处理可以有效抑制呼吸代谢, 加速水果中糖的积累, 同时降低有机酸的消耗速率, 延缓酸度的下降, 保持果实的质量和风味。

2.6 GABA-壳聚糖涂膜对人参果 Vc 和总黄酮含量的影响

Vc 和总黄酮是果蔬中重要的营养成分和活性物

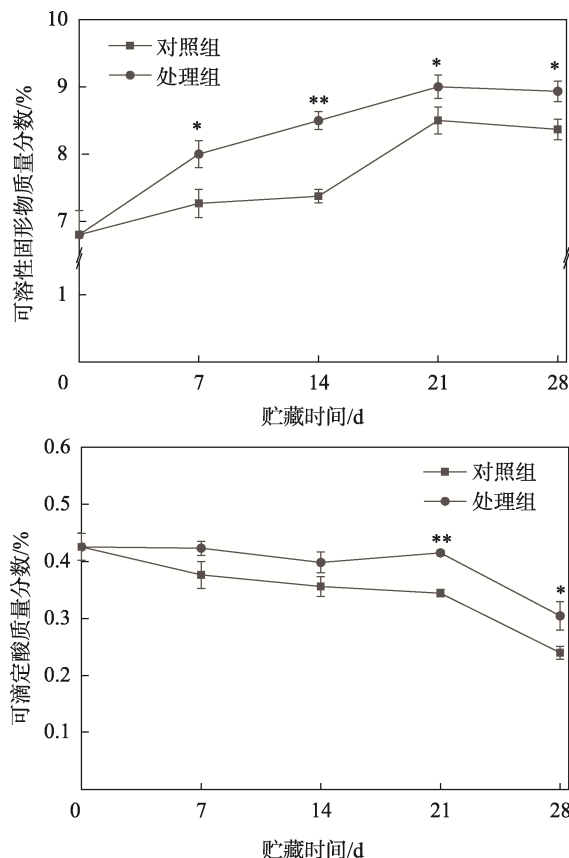


图 5 GABA-壳聚糖涂膜对人参果可溶性固形物含量 (a) 和可滴定酸含量 (b) 的影响
Fig.5 Effect of GABA-chitosan coating on soluble solid content (a) and titratable acid content (b) of pepino fruits

质, 可以减少活性氧损伤, 其含量可以反映采后人参果的生理状况^[26]。由图 6a 可以看出, 整个贮藏期内人参果中的 Vc 含量呈先上升后下降的趋势。在贮藏至 7 d 时, 对照组果实的 Vc 含量达到峰值 (显著高于处理组), 而后快速下降。随着贮藏时间的延长, 处理组果实的 Vc 含量缓慢上升, 在 21 d 时达到峰值, 而后快速下降。在贮藏 14~28 d 时, 处理组果实的 Vc 含量显著高于对照组 ($P<0.05$)。GABA-壳聚糖涂膜对人参果总黄酮含量的影响如图 6b 所示。在贮藏过程中, 人参果的总黄酮含量呈先上升后下降的趋势, 且处理组果实的总黄酮含量显著高于对照组 ($P<0.05$)。综上所述, GABA-壳聚糖涂膜处理能保持人参果中较高的 Vc 和总黄酮含量, 有利于提高果实品质, 减少氧化损伤, 延缓果实品质劣变进程。

2.7 GABA-壳聚糖涂膜对人参果 MDA 含量的影响

MDA 是植物遭受氧化胁迫时细胞膜脂质过氧化的产物, 常用于表征膜完整性, 响应采后氧化应激^[27]。由图 7 可以看出, 在贮藏期间各组人参果中的 MDA 含量逐渐增多。在整个贮藏期内, 对照组果实的 MDA

含量极显著高于处理组 ($P<0.01$), 且在贮藏末期对照组果实的 MDA 含量比处理组高 36.36%。通过 GABA-壳聚糖涂膜可维持人参果较低的 MDA 含量, 这可能与 GABA-壳聚糖能诱导抗氧化酶活性和非酶促抗氧化物质增加有关。由此可见, 采用 GABA-壳聚糖涂膜可有效降低膜脂过氧化对细胞的损伤, 延缓果实的衰老进程, 有助于延长人参果的采后品质。

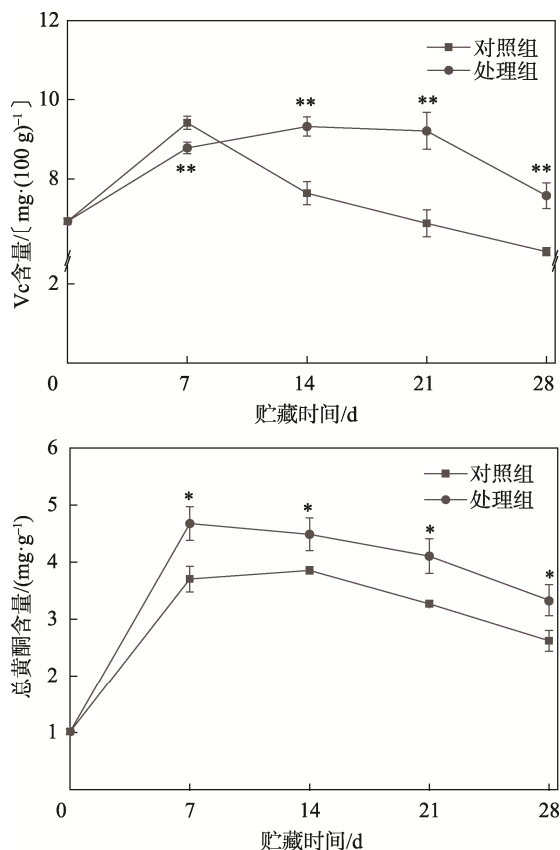


图6 GABA-壳聚糖涂膜对人参果

(a) 和总黄酮含量 (b) 的影响

Fig.6 Effect of GABA-chitosan coating on Vc content (a) and total flavonoid content (b) of pepino fruits

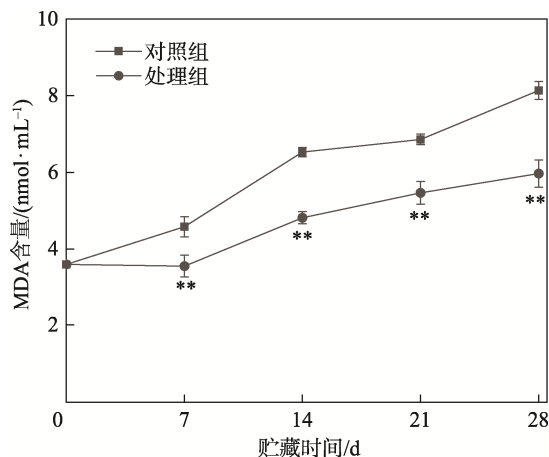


图7 GABA-壳聚糖涂膜对人参果 MDA 的影响

Fig.7 Effect of GABA-chitosan coating on MDA of pepino fruits

2.8 GABA-壳聚糖涂膜对人参果 PPO 和 POD 活性的影响

PPO 是促使果蔬在贮藏过程中发生酶促褐变反应的重要酶, 抑制 PPO 活性是抑制褐变的潜在策略^[28]。由图 8a 看出, 在整个贮藏期间, 人参果的 PPO 酶活性呈现先升高后逐渐降低的趋势, 在贮藏 14 d 时出现峰值。与对照组相比, 处理组果实的 PPO 酶活性显著低于对照组 ($P<0.01$)。在贮藏 28 d 时, 对照组果实的 PPO 活性是处理组的 1.77 倍。Shekari 等^[9]采用 GABA-壳聚糖处理双孢蘑菇, 可以抑制其 PPO 活性, 从而延缓褐变进程, 这与文中结论一致。POD 和 PPO 在酶促褐变过程中起着协同作用。由图 8b 看出, 在整个贮藏期间, 处理组果实的 POD 活性低于对照组, 且与对照组相比差异显著 ($P<0.01$)。在贮藏 28 d 时, 对照组果实的 POD 活性是处理组的 1.61 倍。由此可见, GABA-壳聚糖涂膜处理可有效抑制 PPO 和 POD 活性, 延缓酶促褐变进程。

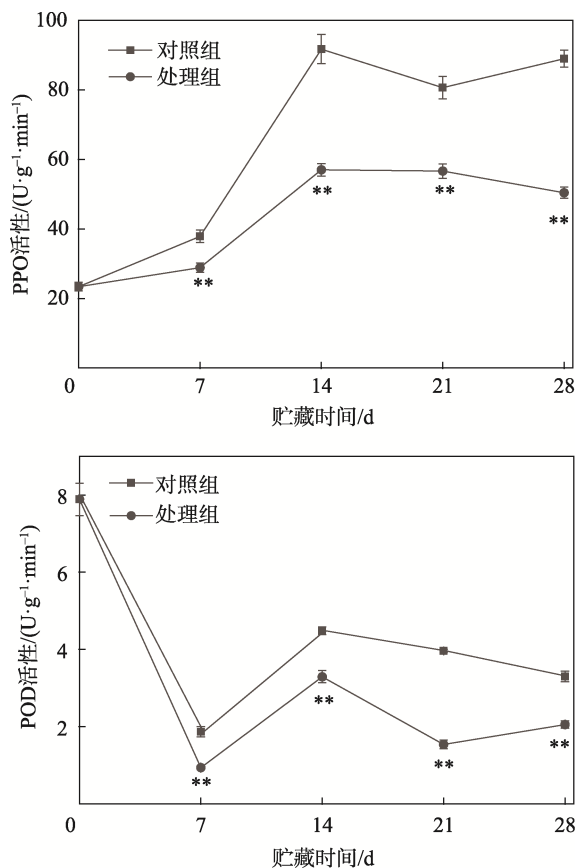


图8 GABA-壳聚糖涂膜对人参果

PPO (a) 和 POD 活性 (b) 的影响

Fig.8 Effect of GABA-chitosan coating on PPO (a) and POD activities (b) of pepino fruits

2.9 相关性分析与主成分分析

2.9.1 主成分分析

采用 PCA 评价 GABA-壳聚糖涂膜对人参果的保

鲜效果, 见表 1。PCA 将 10 个品质指标进行多变量降维处理, 选择特征值 ≥ 1 , 将累计方差贡献率较大的变量作为主要成分。通过提取主成分, 第 1 主成分 (PC1) 和第 2 主成分 (PC2) 的方差贡献率分别为 58.97%、27.89%, 累计方差贡献率为 86.86%, 说明主要的变异来自这 2 个主成分, 能综合反映各指标的整体变化情况。不同样品在 PCA 图上越接近, 表明它们的果实品质越相近, 结果如图 9 所示。在贮藏前, 所有样品位于第 3 象限, 随着贮藏时间的延长, 样品逐渐顺时针移动。贮藏 7 d 时对照组的果实品质与贮藏

表 1 主成分特征值和累积方差贡献率

Tab.1 Eigenvalues and cumulative contribution rates of the principal variances

主成分	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	5.90	58.97	58.97
2	2.79	27.89	86.86
3	0.59	5.94	92.80
4	0.35	3.52	96.32
5	0.19	1.90	98.21
6	0.09	0.90	99.11
7	0.04	0.39	99.50
8	0.02	0.21	99.71
9	0.02	0.18	99.89
10	0.01	0.11	100.00

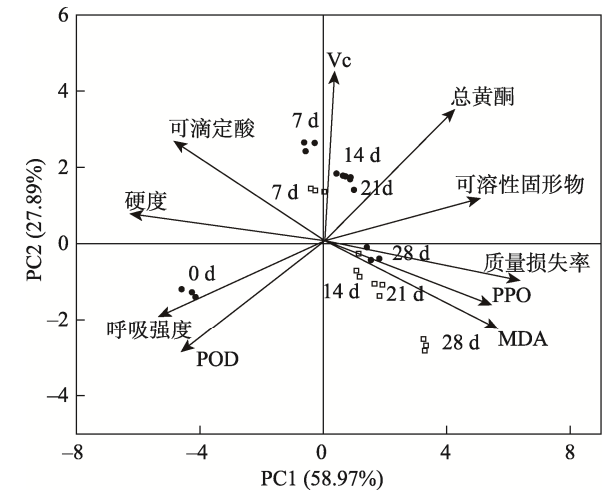


图 9 主成分分析
Fig.9 Principal component analysis diagram

14~21 d 时处理组的果实品质较为接近, 贮藏 14~21 d 的对照组和贮藏 28 d 的处理组位于第 4 象限, 且较为接近。虽然贮藏 28 d 的对照组位于第 4 象限, 但偏离其他样品, 表明 GABA-壳聚糖涂膜能延缓人参果品质劣变的进程。

2.9.2 相关性分析

为了探究贮藏期间人参果各品质指标之间的联系, 采用 Pearson 相关性分析, 结果如图 10 所示。贮藏时间与质量损失率、可溶性固形物含量、MDA 含量、PPO 活性呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与硬度、

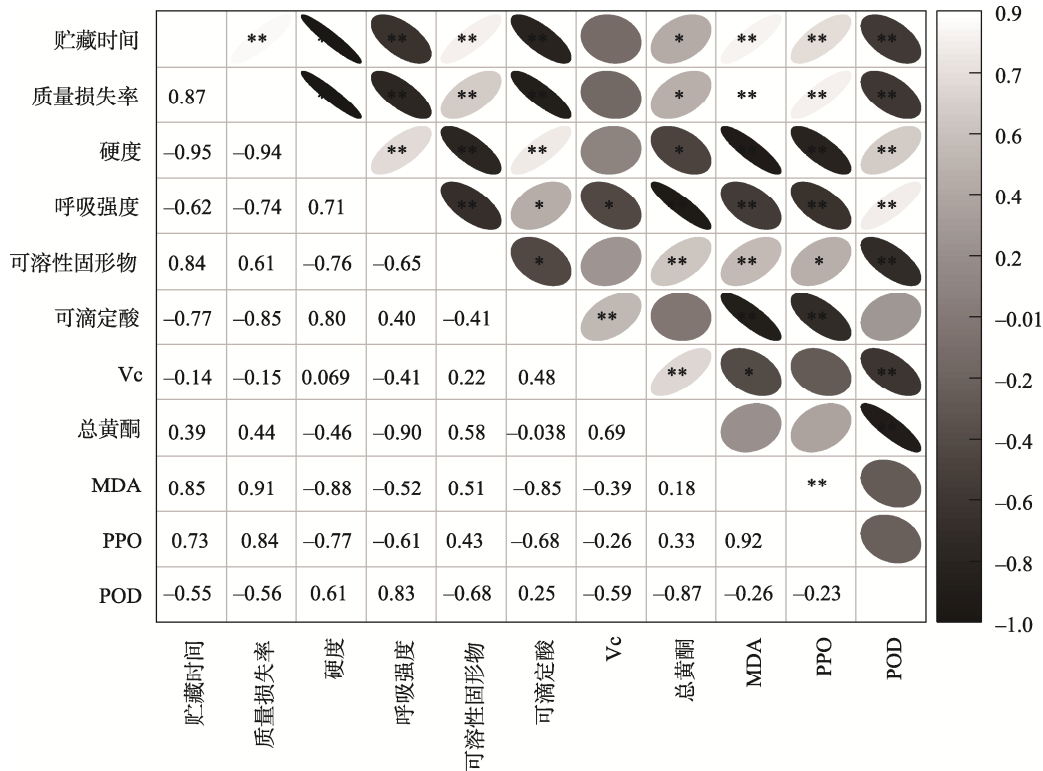


图 10 各指标间的相关性矩阵热图
Fig.10 Heat map of correlation matrix between indicators

呼吸强度、可滴定酸含量、POD 活性呈极显著负相关 ($P<0.01$), 说明在贮藏期间人参果的质量损失率、可溶性固形物含量、MDA 含量、PPO 活性、硬度、呼吸强度、可滴定酸含量、POD 活性等指标的变化均能反映保鲜效果。品质指标 Vc 与总黄酮呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与 POD 呈极显著负相关 ($P<0.01$)。随着贮藏时间的延长, 各种营养物质的含量均不同程度地损失, 膜脂过氧化程度加重, 这与实际情况基本符合。由此可见, GABA-壳聚糖涂膜可维持人参果的品质, 延长其贮藏期。

3 结论

人参果在采后的呼吸代谢旺盛, 易损伤褐变, 贮藏寿命较短。研究表明, 通过 GABA-壳聚糖涂膜处理可在新鲜水果表面形成保护屏障, 能更有效地降低人参果的质量损失率, 延缓人参果的质地软化进程, 保持总黄酮、Vc、TSS、TA 等含量, 保留人参果清香多汁、酸甜可口的风味, 较好地保持人参果的感官品质。此外, GABA-壳聚糖涂膜可以抑制相关酶活性 (PPO、POD), 延缓人参果的褐变和衰老进程, 在整个贮藏过程中保持果实较高的抗氧化活性, 调节人参果的采后生理代谢, 延长人参果的采后寿命。通过 PCA 提取出 2 个主成分, 其累计方差贡献率为 86.86%, 能较好地解释大部分信息。主成分和相关性分析结果表明, GABA-壳聚糖处理组与对照组相比存在显著差异, 在整个贮藏期内, GABA-壳聚糖处理能够显著减缓人参果的品质劣变进程。综上所述, GABA-壳聚糖处理有助于水果在整个贮藏过程中维持较好品质, 可作为一种环境友好的保鲜和延长贮藏期的方法, 但 GABA-壳聚糖处理的机理在应用前需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 赵鹤云, 殷国健, 张琼芬, 等. 云南人参果中营养成分研究与开发应用初探[J]. 食品研究与开发, 2000, 21(6): 32-33.
ZHAO H Y, YIN G J, ZHANG Q F, et al. Study on Nutritional Components in Yunnan Ginseng Fruit and Preliminary Exploration on Its Development and Application[J]. Food Research and Development, 2000, 21(6): 32-33.
- [2] 杨世鹏, 蒋晓婷, 许盼盼, 等. 人参果营养成分、采后生理及贮藏保鲜方式研究进展[J]. 西北农业学报, 2020, 29(10): 1447-1456.
YANG S P, JIANG X T, XU P P, et al. Advance of Nutrient Composition, Postharvest Physiology and Storage Methods of Pepino (*Solanum Muricatum*)[J]. Acta
- [3] ZHAO Y Q, ZUO J H, YUAN S Z, et al. UV-C Treatment Maintains the Sensory Quality, Antioxidant Activity and Flavor of Pepino Fruit during Postharvest Storage[J]. Foods, 2021, 10(12): 2964.
- [4] WANG Y C, GU W R, MENG Y, et al. γ -Aminobutyric Acid Imparts Partial Protection from Salt Stress Injury to Maize Seedlings by Improving Photosynthesis and Upregulating Osmoprotectants and Antioxidants[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 43609.
- [5] LI L, DOU N, ZHANG H, et al. The Versatile GABA in Plants[J]. Plant Signaling & Behavior, 2021, 16(3): 1862565.
- [6] GAO H Y, WU S Y, ZENG Q, et al. Effects of Exogenous γ -Aminobutyric Acid Treatment on Browning and Food-Borne Pathogens in Fresh-Cut Apples[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 146: 1-8.
- [7] FAN Z Q, LIN B, LIN H T, et al. γ -Aminobutyric Acid Treatment Reduces Chilling Injury and Improves Quality Maintenance of Cold-Stored Chinese Olive Fruit[J]. Food Chemistry: X, 2022, 13: 100208.
- [8] CHENG P D, YUE Q Y, ZHANG Y T, et al. Application of γ -Aminobutyric Acid (GABA) Improves Fruit Quality and Rootstock Drought Tolerance in Apple[J]. Journal of Plant Physiology, 2023, 280: 153890.
- [9] SHEKARI A, NAGHSHIBAND HASSANI R, SOLEIMANI AGHDAM M. Exogenous Application of GABA Retards Cap Browning in *Agaricus Bisporus* and Its Possible Mechanism[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 174: 111434.
- [10] XIN Y, CHEN F S, LAI S J, et al. Influence of Chitosan-Based Coatings on the Physicochemical Properties and Pectin Nanostructure of Chinese Cherry[J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 133: 64-71.
- [11] WANG L Y, PENG H H, LIU C Y, et al. Effect of Chitosan-Ascorbic Acid Composite Coating on Postharvest Quality of Custard Apple (*Annona Squamosa*)[J]. Process Biochemistry, 2023, 129: 76-85.
- [12] XING Y G, YANG S, XU Q L, et al. Effect of Chitosan/Nano-TiO₂ Composite Coating on the Postharvest Quality of Blueberry Fruit[J]. Coatings, 2021, 11(5): 512.
- [13] CHI H, SONG S X, LUO M, et al. Effect of PLA Nanocomposite Films Containing Bergamot Essential Oil, TiO₂ Nanoparticles, and Ag Nanoparticles on Shelf Life of Mangoes[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 249: 192-198.

- [14] CHEN W, XU Y, ZHANG L X, et al. Blackberry Subjected to *in Vitro* Gastrointestinal Digestion Affords Protection Against Ethyl Carbamate-Induced Cytotoxicity[J]. Food Chemistry, 2016, 212: 620-627.
- [15] WU Z H, DONG C H, WEI J, et al. A Transcriptional Study of the Effects of Nitric Oxide on Rachis Browning in Table Grapes Cv Thompson Seedless[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 175: 111471.
- [16] AKBAR A, ALI S, AHMAD M A, et al. Understanding the Antecedents of Organic Food Consumption in Pakistan: Moderating Role of Food Neophobia[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(20): 4043.
- [17] BHAN C, ASREY R, MEENA N K, et al. Guar Gum and Chitosan-Based Composite Edible Coating Extends the Shelf Life and Preserves the Bioactive Compounds in Stored Kinnow Fruits[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 222: 2922-2935.
- [18] 鲍程, 王春阳, 陈昊聪, 等. 主成分分析鲜切花椰菜于不同包装方式的品质[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(12): 97-103.
- BAO C, WANG C Y, CHEN H C, et al. Principal Component Analysis of Quality of Fresh-Cut Cauliflower in Different Packaging Methods[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(12): 97-103.
- [19] JIANG Y L, YU L, HU Y W, et al. The Preservation Performance of Chitosan Coating with Different Molecular Weight on Strawberry Using Electrostatic Spraying Technique[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 151: 278-285.
- [20] SOLEIMANI AGHDAM M, NADERI R, ALI ASKARI SARCHESHMEH M, et al. Amelioration of Postharvest Chilling Injury in Anthurium Cut Flowers by γ -Aminobutyric Acid (GABA) Treatments[J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 110: 70-76.
- [21] XU M, ZHOU W Q, GENG W J, et al. Transcriptome Analysis Insight into Ethylene Metabolism and Pectinase Activity of Apricot (*Prunus Armeniaca* L) Development and Ripening[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 13569.
- [22] 齐昭京, 夏秀英. 壳聚糖复合涂膜对蓝莓贮藏品质及抗氧化系统的影响[J]. 北方园艺, 2020(24): 97-106.
- QI Z J, XIA X Y. Effects of Chitosan Composite Coating on Storage Quality and Antioxidant System of Blueberry[J]. Northern Horticulture, 2020(24): 97-106.
- [23] SINHA A, JAWANDHA S K, GILL P P S, et al. Influence of Pre-Harvest Sprays of Calcium Nitrate on Storage and Quality Attributes of Plum Fruits[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(3): 1427-1437.
- [24] YANG H, KIM Y J, SHIN Y. Influence of Ripening Stage and Cultivar on Physicochemical Properties and Antioxidant Compositions of Aronia Grown in South Korea[J]. Foods, 2019, 8(12): 598.
- [25] SHANG H T, CAO S F, YANG Z F, et al. Effect of Exogenous γ -Aminobutyric Acid Treatment on Proline Accumulation and Chilling Injury in Peach Fruit after Long-Term Cold Storage[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(4): 1264-1268.
- [26] NASIRI M, BARZEGAR M, SAHARI M A, et al. Application of Tragacanth Gum Impregnated with *Satureja Khuzistanica* Essential Oil as a Natural Coating for Enhancement of Postharvest Quality and Shelf Life of Button Mushroom (*Agaricus Bisporus*)[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 106: 218-226.
- [27] TSIKAS D. Assessment of Lipid Peroxidation by Measuring Malondialdehyde (MDA) and Relatives in Biological Samples: Analytical and Biological Challenges[J]. Analytical Biochemistry, 2017, 524: 13-30.
- [28] XIONG Z Q, LIU W, ZHOU L, et al. Mushroom (*Agaricus Bisporus*) Polyphenoloxidase Inhibited by Apigenin: Multi-Spectroscopic Analyses and Computational Docking Simulation[J]. Food Chemistry, 2016, 203: 430-439.