

鲜切荸荠变色机理 及控制方法研究进展

滕永欣,孔梦洁,陈旋,胡婉峰*,徐晓云,潘思轶

(华中农业大学食品科学技术学院/环境食品学教育部重点实验室,湖北武汉 430070)

摘要:荸荠经鲜切加工后,受到机械损伤胁迫,自身抗逆机制诱发一系列生理生化异常变化,导致鲜切荸荠发生变色,货架期缩短,限制了鲜切荸荠产业的快速发展。目前,鲜切荸荠的变色控制方法主要集中在复合保鲜剂的使用上,也存在少量其他控制方法如热加工处理、气调处理、涂膜处理等。本文针对导致鲜切荸荠变色的原因,整理出全面的鲜切荸荠变色机理,并综述目前主要使用的鲜切荸荠变色控制方法及其效果。

关键词:鲜切荸荠,变色底物,变色相关酶,变色控制方法,保鲜剂保鲜技术

Research Progress on the Mechanism and Control of Discoloration in Fresh-cut Chinese Water Chestnut

TENG Yong-xin, KONG Meng-jie, CHEN Xuan, HU Wan-feng*, XU Xiao-yun, PAN Si-yi

(College of Food Science and Technology/MOE Key Laboratory of Environment

Correlative Dietology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: After the fresh-cut processing, Chinese water chestnut is under mechanical pressure and its self-resistance mechanism induces a series of physiological and biochemical changes, resulting in discoloration and shelf life shortening, which limits the rapid development of the Chinese water chestnut industry. Currently, discoloration control methods of fresh-cut Chinese water chestnut are mainly focused on the use of composite preserver, and there are also a few other methods such as thermal processing treatment, modified atmosphere treatment, and coating treatment. This paper analyzes the causes of fresh-cut Chinese water chestnut browning, sorts out the comprehensive mechanism of fresh-cut Chinese water chestnut discoloration, and summarizes the main discoloration control methods used at present.

Key words: fresh-cut Chinese water chestnut; discoloration substrate; discoloration-related enzymes; discoloration control method; fresh-keeping agent preservation technology

中图分类号:TS255.1

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2019)02-0321-05

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2019.02.056

引文格式:滕永欣,孔梦洁,陈旋,等.鲜切荸荠变色机理及控制方法研究进展[J].食品工业科技,2019,40(2):321-325.

荸荠(*Eleocharis tuberosa*)也称马蹄、菩荠、乌芋、水栗等^[1],是我国湖北、广西、江浙等地区的特产水生蔬菜^[2]。鲜切荸荠本身作为蔬菜具有新鲜蔬菜的特点,而且其质脆、甘甜、可生食等品质,使得鲜切荸荠具有类似果品的食用特点,这些优良的特征,使得该产品有广阔的发展前景^[3]。荸荠经鲜切处理后,受到严重的机械损伤,由于其自身抗逆生理反应,其呼吸代谢速度更快,酶活性更高而集中表现为鲜切荸荠产品在货架期间发生变色,品质大大下降,同时由于荸荠生长具有季节性和地域性,严重影响了鲜切荸荠产业的发展。因此在运输和贮藏期间,如何有效

地控制鲜切荸荠变色并达到保鲜效果,成为困扰鲜切荸荠产业快速发展的瓶颈以及科研人员的研究热点。目前,鲜切荸荠的变色控制方法以各类保鲜剂浸泡涂抹法为主流^[4],如抗坏血酸^[3]、双氧水^[5]、乙醇^[6]等抗氧化抑制酶活的保鲜剂,也有热处理、气调处理、涂膜处理等其他方法,其中保鲜剂的使用效果较显著。本文就鲜切荸荠的变色原理及控制方法的研究现状作一综述。

1 鲜切荸荠变色机理

1.1 变色相关底物

鲜切果蔬的变色现象主要分为以下几类:褐变、

收稿日期:2018-04-23

作者简介:滕永欣(1997-),男,硕士研究生,研究方向:食品科学,E-mail:Tengyongxin1997@163.com。

*通讯作者:胡婉峰(1983-),女,博士,副教授,研究方向:食品科学,E-mail:wanfenghu@mail.hzau.edu.cn。

基金项目:湖北特色水生蔬菜高效生产与深加工技术研究(2017ABA153);中央高校基本科研业务费专项资金资助(2662018JC018)。

黄化、白变以及脱绿等^[7],研究表明鲜切荸荠的变色以褐变与黄化为主,两者的关系为,鲜切荸荠通过苯丙烷途径等首先发生黄化生成黄酮多酚类物质,为褐变提供底物。酶促褐变的重要底物是多酚类化合物,如苹果褐变的主要底物为绿原酸、儿茶素、表儿茶素和根皮苷等^[8],南果梨褐变的主要底物为绿原酸等^[9]。在刘洪丽等^[10]研究中,采用 HPLC 方法分离测定出鲜切荸荠在贮藏期间的多酚类化合物种类及其含量变化,检测出的多酚类化合物包括儿茶素、没食子酸、对羟基苯甲酸、绿原酸、芦丁,且对照组中对羟基苯甲酸、芦丁、没食子酸、绿原酸的含量随着鲜切荸荠贮藏时间延长显著降低,说明芦丁、绿原酸、对羟基苯甲酸、没食子酸可能为鲜切荸荠发生变色的相关底物。

有学者在研究过程中认为鲜切荸荠的变色是以黄化现象为主,而非多酚类物质的酶促褐变。潘永贵等^[11]通过扫描发现鲜切荸荠中黄色物质的甲醇提取液,于 200~400 nm 范围内表现出三个较为明显的吸收峰,吸收峰波长与多数黄酮类物质的吸收峰波长相吻合,由此推测出鲜切荸荠变色相关底物主要为黄酮类物质。李长乐等^[12]研究表明,随着贮藏时间延长,鲜切荸荠表面黄化速度大大加快,与此现象相对应,鲜切荸荠表面黄酮类物质含量快速上升。而随着贮藏末期鲜切荸荠表面出现变色,黄酮类物质呈现轻微下降趋势。在进一步的深入研究中,潘永贵等^[13-14]研究发现鲜切荸荠表面的黄化物质主要为柚皮素、圣草酚等黄酮类物质。

1.2 变色相关酶及其作用机理

1.2.1 黄化物质合成 苯丙氨酸解氨酶(PAL),在植物体中主要有参与植物抗病、抗虫害、抗逆境等抗性发挥的作用,鲜切荸荠在机械切割受到损伤后自身诱导产生植保素,促使 PAL 活性增大^[15]。根据潘永

贵等^[11,16]对鲜切荸荠黄化物质分离鉴定表明,鲜切荸荠表层黄化组织的主要成分是柚皮素和圣草酚。该两种物质能转化产生槲皮素、杨梅黄酮、芹菜素、木犀草素等物质,均为泛黄物质。黄酮类化合物主要通过次生代谢途径生成,其中 PAL 是次生代谢途径中苯丙烷代谢途径的主要相关酶,连接苯丙烷类代谢和初级代谢,催化苯丙氨酸生成肉桂酸,进而生成黄酮类物质等次生代谢产物^[17]。查尔酮异构酶(CHI)是植物体合成黄酮类物质的关键酶之一,是柚皮素和圣草酚直接相关酶。CHI 是位于类黄酮代谢途径第二个限速酶,在植物体内合成查尔酮后,通过 CHI 的催化,可以进一步转化生成二氢黄酮类化合物,如柚皮素^[13]。类黄酮 3'-羟化酶(F3'H)作为生成类黄酮类化合物的核心关键酶,位于黄酮生物合成途径重要的分支上,F3'H 酶可催化柚皮素进一步发生反应生成圣草酚^[14]。图 1 为鲜切荸荠参与黄化的代谢途径分析。

1.2.2 酶促褐变 酶促褐变是多酚氧化酶(PPO)在氧存在下催化多酚类物质氧化生成醌类物质,醌类物质进一步发生聚合反应,生成褐色色素,从外观上体现为鲜切表面褐变^[18]。PPO 与总多酚类化合物是引起褐变的主要原因。根据刘洪丽等^[10]研究,采用 HPLC 方法分离鉴定出鲜切荸荠在贮藏过程中的多酚种类及含量变化,从底物角度探究变色机理。检测出的 PPO 酚类底物包括没食子酸、儿茶素、对羟基苯甲酸、绿原酸、芦丁,且对照组中对羟基苯甲酸、芦丁、绿原酸、没食子酸的含量随着鲜切荸荠贮藏时间延长显著降低,说明 PPO 催化了这些多酚类化合物的氧化,导致褐变。许多研究发现过氧化物酶(POD)也参与多酚类化合物的氧化以及褐色色素的形成,在彭丽桃等^[5]研究中,在鲜切荸荠贮藏期内过氧化物酶活性变化剧烈,也是导致鲜切荸荠褐变相

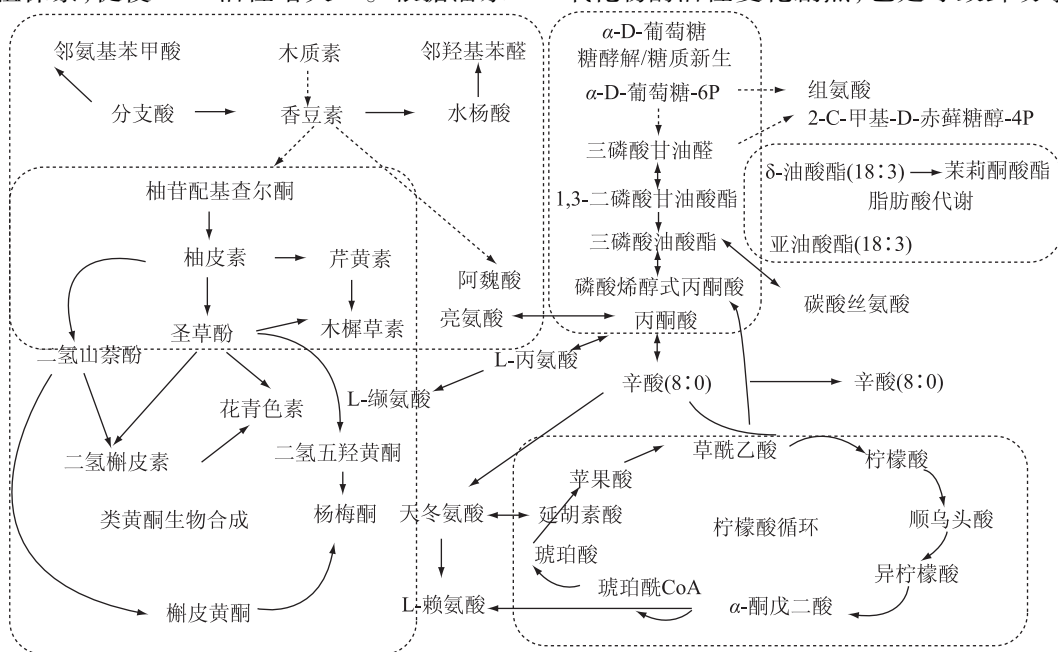


图 1 鲜切荸荠参与黄化的代谢途径^[13]

Fig.1 Fresh-cut Chinese water chestnut involved in yellow metabolic pathway

关酶之一。

1.3 微生物代谢加速变色

微生物代谢加速变色,潘永贵等^[11]研究从鲜切荸荠中分离得到五种微生物,研究表明地霉属真菌、葡萄球菌属以及链球菌属细菌会导致鲜切荸荠黄化进程加速,实验中鲜切荸荠无菌处理组依旧发生黄化,这表明鲜切荸荠黄化的决定性因素并不是微生物的生长,但其在一定程度上加快了组织黄化的发生。潘永贵推测主要是微生物生长代谢某些产物刺激了荸荠次生代谢途径,从而导致黄化物质的加速生成。胡丽云^[19]研究不同种类微生物对荔枝渣中多酚类物质转化能力的强弱,结果显示雅致放射毛霉能使荔枝渣中的结合酚下降 11.2%,枯草芽孢杆菌枯草亚可降解 8.46% 的结合酚,由此说明微生物能够影响果蔬酚类物质的含量变化,从而影响变色。目前,微生物与鲜切荸荠变色的相关研究较少,其详细机理有待进一步研究探讨。

2 鲜切荸荠变色控制方法

目前,鲜切荸荠的变色控制方法以各类保鲜剂浸泡涂抹法为主,主要有双氧水、乙醇、抗坏血酸等抗氧化抑制酶活的保鲜剂;也有热处理、气调处理、涂膜处理等其他方法。以下从化学控制方法和物理控制方法两个方面出发,探讨现有的各种鲜切荸荠变色控制方法以及其取得的效果。

2.1 化学控制方法

2.1.1 保鲜剂保鲜技术 保鲜剂浸泡涂抹处理作为果蔬保鲜中的常用手段,主要从抑制变色相关酶活和底物保护两个角度出发进行保鲜剂的选择。

其中保鲜剂涉及变色相关酶活的研究例如:彭丽桃等^[5]采用双氧水作为保鲜剂,研究其变色抑制效果,对新采的荸荠鲜切后,用不同浓度的 H_2O_2 浸泡处理后储存于 4℃,监测酚类物质代谢相关酶活性以及多酚类物质含量变化,研究结果表明 H_2O_2 处理可抑制荸荠表面变色,降低 PPO、POD 和 PAL 活性,且抑制效果随 H_2O_2 的浓度增加而增强。姜悦等^[6]研究不同浓度的乙醇浸泡处理对鲜切荸荠变色及其相关酶活的影响状况,研究结果发现:在贮藏期间,不同浓度乙醇处理均不同程度地抑制了鲜切荸荠表面色度 L^* 值的下降速度以及 b^* 值和 c^* 值的上升速度,与这一实验结果相对应的,鲜切荸荠组织内柚皮素和圣草酚含量的增加均随乙醇浓度增大而减缓。同时,鲜切荸荠内查尔酮异构酶、PAL 和类黄酮 3'-羟化酶的酶活性变化趋势均随乙醇浓度增加而逐渐减缓。总之,用不同浓度乙醇对控制鲜切荸荠组织黄化均有一定效果。其中,低浓度乙醇处理在短期内作用效果显著($p < 0.05$),而高浓度乙醇作用维持时间较长且效果显著($p < 0.05$)。蒋跃明等^[20]研究柠檬酸对鲜切荸荠 PPO 酶活性的影响,低浓度柠檬酸刺激 PPO 酶活性,但在 0.1 mol/L 或更高浓度时明显抑制活性。在体外抑制 PPO 活性的基础上,将鲜切荸荠浸入 0.1 mol/L 柠檬酸的溶液中,放入托盘中塑料薄膜,然后在 4℃ 保存,评估表面色度变化等指标,结果表明用 0.1 mol/L 柠檬酸处理显著延长了保质

期,抑制了鲜切荸荠变色和病变。刘洪丽等^[10]对比不同保鲜剂的保鲜效果,分别用 100 mg/L 亚硫酸钠,1% ascorbic acid(V_C) 和 30% 乙醇浸泡处理鲜切荸荠。研究结果表明,经过 30% 浓度乙醇处理后,鲜切荸荠的呼吸强度、褐变程度、与酶促褐变相关的 PAL 酶活性的变化趋势均受到在一定程度上的抑制,并且酶促褐变底物多酚类物质的浓度有所降低,效果显著于另外两组,说明乙醇是鲜切荸荠的一种良好保鲜剂。

以上研究均是从抑制变色相关酶活性的角度出发,其中彭丽桃采用的双氧水和蒋跃明采用的柠檬酸能有效抑制酶促褐变的多酚氧化酶活性,而后两者使用的乙醇则是能有效抑制合成黄化途径中的相关酶活性,从而达到减缓变色的效果。以下学者的研究中所使用的保鲜剂同样存在抑制变色的效果,而这些抑制剂主要从氧化还原^[21]或相似物质竞争性^[22]对底物保护的角度出发。例如:童刚平等^[18]采用正交试验的方法,优选抑制鲜切荸荠变色的最佳抑制剂的组合,对鲜切荸荠变色抑制剂组合进行了筛选,实验结果显示,0.2% 异抗坏血酸 + 0.05% N-甲酰-L-半胱氨酸 + 1.0% 柠檬酸是抑制变色的最佳抑制剂组合,与对照组(蒸馏水)相比,该组合有较为明显的抑制效果。陆胜民等^[23]同样选择了多种不同变色抑制剂,测试不同抑制剂处理后鲜切荸荠的各项指标,实验结果显示 0.3 mmol/L 的 4-己基间苯二酚变色抑制效果最好,其次是 3.0 mmol/L 的 N-乙酰基-L-半胱氨酸。黄雪松等^[3]以减缓鲜切荸荠变色并延长其货架期为目的,采用 $L_9(3^4)$ 正交表筛选不同抑制剂,比较葡萄糖酸内酯、柠檬酸和乳酸等食用酸对褐变的影响,研究结果表明: V_C 是较好的护色剂,葡萄糖酸内酯兼具抑制褐变护色和改善产品风味的作用,鲜切荸荠在 2~4℃ 冰箱中可以存放 10 d 以上。王媛^[24]采用相同的方法,对 L-半胱氨酸、柠檬酸、 V_C 等进行了筛选,最终研制出最优护色剂 0.2% L-cys + 0.6% CA + 0.6% V_C ,该处理下的鲜切荸荠可在 4℃ 保存 12 d。邓靖等^[25]发现与碱式次氯酸镁共同存放,对鲜切荸荠有良好的护色效果。对于鲜切荸荠的变色控制,综合采用这些处理手段,可以有效延迟鲜切荸荠变色,并使其具有较长的货架期。

2.1.2 乙醛熏蒸 乙醛是一种天然的植物代谢次生物,国外许多研究表明通过外源乙醛的处理能够对果蔬的品质保持有显著的影响^[26-28]。邓丽莉等^[29]以采摘后的荸荠为处理对象,用不同体积分数的乙醛熏蒸处理 4 h,然后将处理完毕的荸荠于阴凉干燥通风处放置 2 d 后鲜切处理,研究结果表明:不同浓度的乙醛熏蒸处理,均能有效延缓鲜切荸荠贮藏期间褐变的发生和色泽的改变,其中 0.1% 和 0.5% 浓度的乙醛抑制果实褐变的效果较为明显。有不少学者将乙醛熏蒸技术应用于其他果蔬进行研究,如朱萍等^[30]研究发现鲜切菠萝采用 2.5 mL/kg、30% 的乙醛熏蒸 5 h,其色泽保持鲜黄有光泽,而未处理组的色泽为浅黄褐色至黄褐色无光泽,经熏蒸后,各项品质明显优于未经乙醛熏蒸的菠萝;曾凯芳等^[31]研究发

现采摘后的草莓果实立即用 0.5% 的乙醛蒸汽熏蒸 1 h, 可以增进草莓着色与鲜红保持。结合国内外的研究结果发现, 乙醛熏蒸对鲜切荸荠的护色有显著效果, 同时乙醛作为天然植物次生代谢物, 更容易为消费者所接受, 具有良好的发展前景。

2.2 物理控制方法

2.2.1 热处理 热处理是一种操作便捷、绿色环保的处理方法。彭丽桃等^[32]研究鲜切荸荠褐变受到热处理的抑制情况, 将鲜切荸荠浸泡于沸水中 30 s, 于 4 °C 冷藏冰箱中贮存 12 d。研究结果表明, 沸水热处理对褐变相关的 PPO、PAL、POD 酶活性的变化有明显抑制效果, 存在一定抑制鲜切荸荠褐变的作用。田维娜等^[33]采取中心复合旋转试验设计的研究方法, 研究不同温度的热处理以及不同时间的热处理对鲜切荸荠褐变程度的变化情况, 探究结果显示, 热处理温度以及热处理时间和不同贮藏时期的交互作用对鲜切荸荠在贮藏期间褐变程度的变化抑制显著。在热处理时间为 20~22 min, 热处理温度为 52~55 °C 的最优处理条件下, 鲜切荸荠可在 4 °C 贮藏 3 d 不发生变色。宋慕波等^[34]研究 100 °C 热处理 1 min 与 55 °C 热处理 5 min 两种热处理对鲜切荸荠褐变的抑制效果, 结果表明前者处理效果更佳。较高温度的热处理能够迅速钝化鲜切荸荠变色的相关酶, 从而有效地抑制其变色, 但由于温度升高会引发荸荠品质变化。因此, 在如何平衡热加工钝化酶活性和鲜切荸荠品质变化是主要的研究问题。

2.2.2 气调处理 气调处理是一种物理处理手段, 让鲜切荸荠处于纯氮的环境中隔绝氧气^[35], 使得酚类底物无法被氧化, 例如: 尤艳丽等^[36]以纯氮空间放置为处理手段, 研究了纯 N₂ 处理对鲜切荸荠褐变抑制及品质保持的效果, 将鲜切荸荠置于纯氮气空间不同时长后, 在 4 °C 冷藏冰箱中贮存。在鲜切荸荠贮藏期内, 观测其表面色度的变化, 实验结果表明, 在纯氮气空间中处理 2 h 的样品组表面褐变显著减少, 保持了风味等品质。许多研究表明气调处理可以有效地抑制果蔬变色, 如朱锐等^[37]研究鲜切茭白气调包装气体, 结果发现冷藏至第 6 d 时, CO₂ 气调包装鲜切茭白的褐变度显著低于真空包装; 周翠英等^[38]研究了气调包装对翠冠梨保鲜的影响, 结果表明, 7.0% O₂ 和 0.5% CO₂ 的气体组成能使翠冠梨贮藏 120 d, 贮藏效果表明, 气调包装能减少翠冠梨的褐变, 延长贮藏期; 范雨航等^[39]研究气调处理对柠檬贮藏品质的影响, 结果发现 O₂、CO₂ 浓度为 5%~7%、6%~9% 时品质保鲜效果最佳。针对不同的果蔬, 所适用的气体比例与处理方式均有所不同, 目前鲜切荸荠的有效气调处理研究报道较少, 纯氮气空间气调处理对其变色控制有一定效果。

2.2.3 涂膜处理 涂膜处理技术是一种鲜切果蔬保鲜方法, 该方法选取纯天然、无毒害原料, 如大分子多糖蛋白类、脂类物质等作为被膜剂, 采用浸泡、涂抹、喷洒等方法涂于鲜切果蔬表面, 形成一层透明的薄被膜^[40]。这层被膜对鲜切果蔬起到隔离保护作用, 可抑制水分蒸发和气体交换, 同时存在一定抑菌

功效。例如: 彭勇等^[41]采用涂膜处理技术, 将海藻酸钠和壳聚糖两种被膜剂, 涂抹于鲜切荸荠表面, 形成薄被膜。在贮藏期内, 对鲜切荸荠进行各项生理指标的测定, 实验结果显示, 两种涂膜处理均起到抑制鲜切荸荠褐变的效果, 延缓了类黄酮物质含量的增加, 对比两者效果, 海藻酸钠涂膜处理在抑制鲜切荸荠褐变的效果上略差与壳聚糖。彭丽桃等^[42]采用不同浓度的壳聚糖涂膜处理, 同样在贮藏期间检测各项褐变相关指标, 检测结果表明, 壳聚糖涂膜处理对鲜切荸荠的 POD、PAL、PPO 酶活性有明显抑制作用, 能够延缓切片的褐变, 保持其食用品质, 壳聚糖涂膜的浓度在 0.5%~2% 范围内, 其对鲜切荸荠的褐变抑制效果随浓度的增加而增强。

3 结论与展望

与传统果蔬制品相比, 鲜切荸荠食用更加便捷、营养可口, 即可作为果品生食, 亦可与其他食物加工烹饪熟食, 因此作为水生蔬菜的鲜切荸荠具有广阔的发展前景。而鲜切荸荠在贮运过程中易发生变色而引起其食用品质下降的问题, 极大程度地制约了鲜切荸荠的发展。根据现有的研究结果可以总结出, 鲜切荸荠变色的主要成因是自身通过苯丙烷途径等合成黄化物质、多酚类化合物酶促褐变以及某些微生物可能加速变色。

目前, 鲜切荸荠的主要变色控制方法集中于使用保鲜剂浸泡涂抹, 所使用的保鲜剂主要有抑制变色相关酶 PPO、POD、PAL 等酶活性的双氧水、乙醇、柠檬酸等。针对保鲜剂的选择, 应从变色相关底物的保护以及抑制变色相关酶活两个角度出发寻找, 同时考虑两者, 致力研究出高效、安全、绿色的保鲜剂。其他领域的控制方法有热加工、气调处理、涂膜处理、乙醛熏蒸等, 但这方面的研究较少。气调处理、热处理加工等其他控制方法具有操作便捷、成本低廉、绿色环保等特点, 其应用的前景相当可观。但这些方法同样也存在其弊端, 如热处理温度过高会影响果实品质, 过低则无法达到抑制效果等, 因此对于以上方法有必要进行深入的研究和大量的试验来支撑其抑制鲜切荸荠变色的效果以及阐明作用机理。

参考文献

- [1] 王薇. 荸荠的保健功能及加工利用[J]. 食品与药品, 2005, 7(4A): 45-48.
- [2] 蔡健. 荸荠的营养保健和加工利用[J]. 中国食物与营养, 2005(2): 40-42.
- [3] 黄雪松, 焦建, 杨爱华. 几种加工处理对鲜切荸荠褐变的影响[J]. 食品科技, 2006, 31(7): 255-258.
- [4] 王蓉蓉, 汪振炯. 鲜切荸荠的护色工艺研究[J]. 食品科技, 2015(10): 339-344.
- [5] Peng L, Yang S, Li Q, et al. Hydrogen peroxide treatments inhibit the browning of fresh-cut Chinese water chestnut[J]. Postharvest Biology & Technology, 2008, 47(2): 260-266.
- [6] 姜悦, 何凤平, 钟慧玲, 等. 乙醇处理对鲜切荸荠黄化及相关酶的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(10).

- [7] 何凤平, 潘永贵. 鲜切果蔬变色及其控制技术研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2015(7): 2420-2426.
- [8] 李美利. 苹果汁中多酚氧化褐变及其产物理化特性研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2014.
- [9] 马岩松, 车芙蓉, 张平, 等. 南果梨多酚氧化酶最适作用酶促褐变底物的分析确定[J]. 食品科学, 2000, 21(1): 11-13.
- [10] 刘洪丽. 鲜切茼蒿、荸荠抗褐变剂筛选及其机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- [11] 潘永贵. 鲜切荸荠/莲藕特异性变色机理及其控制研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2006.
- [12] 李长乐, 潘永贵. 鲜切荸荠表面黄化过程中黄酮类物质和抗氧化活性变化研究[J/OL]. 食品科学: 1-9[2018-03-30].
- [13] Li Y X, Pan Y G, He F P, et al. Pathway analysis and metabolites identification by metabolomics of etiolation substrate from fresh-cut Chinese water chestnut (*Eleocharis tuberosa*) [J]. Molecules, 2016, 21(12): 1648.
- [14] Pan Y G, Li Y X, Yuan M Q. Isolation, purification and identification of etiolation substrate from fresh-cut Chinese water chestnut (*Eleocharis tuberosa*) [J]. Food Chemistry, 2015, 186: 119-122.
- [15] 马杰, 胡文忠, 毕阳, 等. 鲜切果蔬苯丙烷代谢的研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(15): 391-393.
- [16] 何凤平, 潘永贵, 李艺筱. 同时测定鲜切荸荠黄化组织中柚皮素和圣草酚的高效液相色谱条件探究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(13): 271-275.
- [17] 崔建东, Li Yan, 牟德华. 苯丙氨酸解氨酶(PAL)的研究进展[J]. 食品工业科技, 2008, 29(7): 306-308.
- [18] 童刚平. 鲜切荸荠酶促褐变及褐变控制研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2005.
- [19] 胡丽云. 荔枝果肉多酚在贮藏褐变和微生物转化过程中的变化规律研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2016.
- [20] Jiang Y, Pen L, Li J. Use of citric acid for shelf life and quality maintenance of fresh-cut Chinese water chestnut [J]. Journal of Food Engineering, 2004, 63(3): 325-328.
- [21] 王婷, 付丽媛, 董琳玲, 等. 氧化性杀菌剂对鲜切马蹄护色和杀菌效果的研究[J]. 长江蔬菜, 2014(4): 74-77.
- [22] Zhou D, Li L, Wu Y, et al. Salicylic acid inhibits enzymatic browning of fresh-cut Chinese chestnut (*Castanea mollissima*) by competitively inhibiting polyphenol oxidase [J]. Food Chemistry, 2015, 171: 19-25.
- [23] Shengmin L U, Tong G, Long Y, et al. Partial purification and characterization of polyphenol oxidase from fresh-cut Chinese water chestnut [J]. Journal of Food Biochemistry, 2006, 30(2): 123-137.
- [24] 王媛. 复合护色处理对鲜切荸荠褐变的抑制[J]. 食品安全导刊, 2013(4): 76-78.
- [25] 邓靖, 王建辉, 李文, 等. 碱式次氯酸镁对鲜切荸荠护色保鲜效果研究[J]. 包装工程, 2016(5): 20-23.
- [26] Pesis E, Avissar I. The post-harvest quality of orange fruits as affected by pre-storage treatments with acetaldehyde vapour or anaerobic conditions [J]. Journal of Pomology & Horticultural Science, 1989, 64(1): 107-113.
- [27] Morris J R, Cawthon D L, Buescher R W. Effects of acetaldehyde on postharvest quality of mechanically harvested strawberries for processing [J]. Journal - American Society for Horticultural Science (USA), 1979, 104(2): 262-264.
- [28] Avissar I, Pesis E. The control of postharvest decay in table grapes using acetaldehyde vapours [J]. Annals of Applied Biology, 2010, 118(1): 229-237.
- [29] 邓丽莉, 明建, 田维娜, 等. 乙醛熏蒸处理对鲜切荸荠品质变化的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(2): 233-236.
- [30] 朱萍, 潘永贵, 梁大伟, 等. 响应面法优化乙醛熏蒸鲜切菠萝工艺条件[J]. 食品科学, 2011, 32(24): 36-40.
- [31] 曾凯芳, 姜微波, 任卫华, 等. 乙醛熏蒸处理对草莓贮藏品质的影响[J]. 中国食品学报, 2003, 3(4): 33-36.
- [32] Peng L, Jiang Y. Effects of heat treatment on the quality of fresh-cut Chinese water chestnut [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2004, 39(2): 143-148.
- [33] 田维娜, 明建, 曾凯芳. 采用响应曲面法研究热处理对鲜切荸荠色泽的影响[J]. 食品科学, 2009, 30(8): 291-296.
- [34] 宋慕波, 帅良, 陈振林, 等. 热处理对抑制鲜切马蹄褐变效果的研究[J]. 食品科技, 2017(5): 36-40.
- [35] You Y, Jiang Y, Sun J, et al. Effects of short-term anoxia treatment on browning of fresh-cut Chinese water chestnut in relation to antioxidant activity [J]. Food Chemistry, 2012, 132(3): 1191-1196.
- [36] You Y L, Jiang Y M, Song L L, et al. Browning inhibition and shelf life extension of fresh-cut Chinese water chestnut by short N_2 treatments [J]. Acta Horticulturae, 2006, 712(712): 671-676.
- [37] 朱锐, 周文芳, 肖青青, 等. 鲜切茼蒿的气调保鲜工艺优化[J]. 食品工业, 2018, 39(5): 162-165.
- [38] 周翠英, 周建俭, 汤瑾, 等. 翠冠梨气调保鲜试验研究[J]. 食品工业, 2015, 36(5): 67-69.
- [39] 范雨航, 李少华, 许青莲, 等. 气调保鲜对采后柠檬贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(5): 324-328.
- [40] 段丹萍, 鲁丽莎, 王海宏, 等. 果蔬涂膜保鲜技术研究现状与应用前景[J]. 保鲜与加工, 2009, 9(6): 1-6.
- [41] 彭勇, 李云飞. 壳聚糖和海藻酸钠涂膜对鲜切荸荠褐变、腐烂和品质的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(17): 334-337.
- [42] 彭丽桃, 蒋跃明, 杨书珍, 等. 壳聚糖被膜对鲜切荸荠褐变的抑制[J]. 植物生理学报, 2002, 38(6): 554-556.