

## 杀菌温度对莲藕汁色泽及化学成分的影响

姜慧雯<sup>1</sup>, 孙显显<sup>1</sup>, 李洁<sup>1,2,3\*</sup>, 严守雷<sup>1,2,3</sup>

(<sup>1</sup>华中农业大学食品科技学院 武汉 430070

<sup>2</sup>华中农业大学 环境食品学教育部重点实验室 武汉 430070

<sup>3</sup>湖北省水生蔬菜保鲜加工工程技术研究中心 武汉 430070)

**摘要** 采用不同的杀菌温度对莲藕汁进行处理,研究其对色泽及相关化学物质含量的影响,并对两者进行相关性分析,确定色泽变化与物质种类及含量变化之间的关系。结果表明:用 5 种杀菌温度处理莲藕汁后, $a^*$ 、 $b^*$ 、 $\Delta E$ 、 $A_{420nm}$  值均增大,还原糖及 5-羟甲基糠醛含量均升高,抗坏血酸、总酚、苏氨酸、丝氨酸、蛋氨酸、组氨酸和脯氨酸含量均降低。相比于 101、111 °C 和 121 °C 杀菌,81 °C 和 91 °C 杀菌对莲藕汁的颜色和化学物质影响较小。相关性分析表明:5-羟甲基糠醛、抗坏血酸和还原糖与色差  $\Delta E$  和褐变度  $A_{420nm}$  均呈极显著相关关系,其中 5-羟甲基糠醛与色差的相关性最强,系数达到 0.940,说明 5-羟甲基糠醛是引起莲藕汁杀菌前、后颜色变化的主要因素。

**关键词** 莲藕汁; 杀菌温度; 褐变; 主成分分析; 相关性分析

**文章编号** 1009-7848(2023)08-0219-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.08.023

莲藕(*Nelumbo nucifera* Gaertn.)是我国水生蔬菜中的支柱品种,也是湖北省广泛栽培的特色水生蔬菜之一<sup>[1]</sup>。近年来,随着市场对果蔬汁需求的增加及莲藕加工品类丰富的需要,莲藕汁加工日益兴起。莲藕汁中含有大量活性物质,如多酚、维生素等,营养价值高<sup>[2]</sup>,并且榨汁之后剩余的藕渣还可以用来生产藕粉<sup>[3]</sup>,实现莲藕资源的综合利用。

为保证莲藕汁的安全卫生,在严格把控原料和加工条件的基础上,还需通过杀菌技术来杀死莲藕汁中存在的微生物,从而延长保质期。不同杀菌温度对莲藕汁品质会造成不同的影响。传统莲藕汁多采用热杀菌、超高压杀菌<sup>[4]</sup>等。低温杀菌虽能够较好地保持莲藕汁色泽和营养,但会残存部分耐热的芽孢菌,可能造成食品的腐败变质。高温杀菌是一种较为彻底的杀菌方式,杀菌效率虽很高,但会导致莲藕汁色泽变深,营养成分损失等<sup>[5]</sup>。杀菌过程中,经热加工处理,多酚氧化酶(Polyphenol oxidase, PPO)因钝化而失去催化作用,发生的颜色变化多为非酶褐变<sup>[6]</sup>。非酶褐变主要分为以下 4 种:美拉德反应、焦糖化反应、抗坏血酸氧化

分解反应、多酚氧化缩合反应<sup>[7-10]</sup>。Paravisini 等<sup>[11]</sup>在研究苹果汁褐变时发现,还原糖在高温下经历了一系列复杂的转化,生成反应性羰基物质(Reactive carbonyl substances, RCS),这些 RCS 参与美拉德反应,导致苹果汁颜色褐变。橙汁经不同杀菌处理后色泽发生变化的主要影响因子是类胡萝卜素,其次抗坏血酸的氧化分解也是影响因素之一<sup>[12]</sup>。果蔬汁中的营养成分复杂,不同加工阶段、加工条件下导致褐变的机理可能不完全相同。小白杏果汁在热处理过程中发生的非酶褐变,70 °C 时主要是多酚的氧化聚合和美拉德反应,80 °C 时主要是抗坏血酸氧化分解<sup>[13]</sup>。

莲藕汁加工过程中,尤其是高温杀菌过程中会发生明显褐变。目前已有许多关于桃汁<sup>[14]</sup>、芦笋汁<sup>[15]</sup>、猕猴桃汁<sup>[16]</sup>等果蔬汁色泽与化学物质含量变化的研究,尚未见莲藕汁不同杀菌温度处理的相关报道。在前期预试验过程中发现经过不同温度杀菌处理后的莲藕汁在接种乳酸菌发酵后,颜色会有不同程度的变浅,其中 121 °C 杀菌接种后浅变现象更加明显。本试验研究不同杀菌温度(81, 91, 101, 111, 121 °C)对莲藕汁色泽、抗坏血酸、总酚、还原糖、5-羟甲基糠醛(5-HMF)以及游离氨基酸的影响,利用主成分分析及相关性分析找出莲藕汁颜色变化的主要影响因子。

收稿日期: 2022-08-26

基金项目: 湖北省技术创新专项(2017ABA071)

第一作者: 姜慧雯,女,硕士

通信作者: 李洁 E-mail: lijie1976@mail.hzau.edu.cn

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

莲藕, 采购于湖北省武汉市华中农业大学菜市场。

$\alpha$ -淀粉酶(20 000 U/g)、草酸、抗坏血酸、 $\text{NaHCO}_3$ 、无水乙醇、无水碳酸钠、没食子酸、福林试剂、葡萄糖、3,5-二硝基水杨酸、酒石酸钾钠、苯酚、结晶酚、亚铁氰化钾、乙酸锌、巴比妥酸、对甲苯胺、异丙醇、亚硫酸钠, 均为分析纯级, 购自国药集团化学试剂有限公司; 2,6-二氯酚靛酚, 为分析纯级, 购自西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司; 柠檬酸、抗坏血酸、 $\text{NaHSO}_3$  均为食品级, 购自上海维塔化学试剂有限公司。

### 1.2 仪器与设备

微量滴定管, 泰州市思齐教学仪器有限公司; KQ-600DB 型数控超声波清洗器, 昆山市超声仪器有限公司; HH-2 数显恒温水浴锅, 金坛区西城基铭实验仪器厂; JY502-电子天平, 上海精平电子仪器有限公司; 立式压力蒸汽灭菌锅, 上海博迅实业有限公司医疗设备厂; Sartorius 万分之一分析天平, 奥豪斯仪器(上海)有限公司; UV-1800 紫外-可见分光光度计, 岛津(上海)实验器材有限公司; 高速冷冻离心机, 赛默飞世尔科技(中国)有限公司; L-8900 全自动氨基酸分析仪, 日本日立公司; YS3010 型分光测色仪, 深圳市三恩时科技有限公司。

### 1.3 方法

1.3.1 莲藕汁的制备 选取新鲜、无腐烂、无褐变、大小适中的成熟莲藕, 用流动自来水将表面的泥沙等污物清洗干净后, 去除表皮, 切成 0.5 cm 均匀的莲藕片。按照莲藕:蒸馏水质量比为 1:3 的比例进行榨汁处理, 得到莲藕汁原汁。将莲藕汁原汁放入 70 °C 恒温水浴锅中加热 8 min 进行糊化, 以方便后续淀粉酶作用于淀粉中的糖苷链。糊化后加入 200 U/g (g 为莲藕汁样品质量) 的  $\alpha$ -淀粉酶酶解, 在 300 W 功率下超声辅助水解 4 min 后, 冷却至室温。在 100 °C 加热 10 min 进行灭酶后, 过 200 目滤布后离心, 得到莲藕汁。莲藕中富含淀粉和多糖等胶体物质, 榨汁后会出现汁液黏度高、产品混浊等问题, 加入  $\alpha$ -淀粉酶后, 淀粉水解成糊精、低聚糖等, 可达到降低黏度, 促进产品澄清的

目的<sup>[17-18]</sup>。莲藕汁分别经过不杀菌, 81, 91, 101, 111, 121 °C 加热 15 min 处理, 记为 CK、T-81、T-91、T-101、T-111、T-121 组。

1.3.2 色泽指标的测定 参考卢嘉懿等<sup>[19]</sup>的方法略作修改, 采用便携式色差仪测定莲藕汁的表观颜色。总色差  $\Delta E$  计算公式为:  $\Delta E = [(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2]^{1/2}$ , 其中  $L_0^*$ 、 $a_0^*$ 、 $b_0^*$  代表莲藕汁初始色差值, 即 CK 组莲藕汁的色差值。 $L^*$  为亮度, 数值越大代表样品色泽越亮;  $a^*$  为红度, 数值越大代表样品色泽偏红, 反之, 色泽偏绿;  $b^*$  值为黄度, 数值越大代表样品色泽偏黄, 反之, 色泽偏蓝; 总色差  $\Delta E$  反映莲藕汁样品的总体色泽的差异变化,  $\Delta E$  值越大, 代表色泽差异越明显, 一般来说,  $\Delta E > 2$  即可发生人类肉眼可见的颜色变化<sup>[20]</sup>。

褐变度的测定参考 Zerdin 等<sup>[21]</sup>的方法略作修改, 取适量不同温度杀菌下的莲藕汁样品, 在 10 000 r/min, 4 °C 条件下离心 15 min, 收集上清液。采用 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜进行过滤, 以蒸馏水做参照, 在波长 420 nm 处测定吸光值, 记为  $A_{420\text{nm}}$ 。

### 1.3.3 化学物质的测定

1.3.3.1 抗坏血酸(VC)含量的测定 抗坏血酸含量的测定采用 2,6-二氯酚靛酚法, 参考阮卫红等<sup>[22]</sup>的方法略作修改。

1.3.3.2 总酚(Total phenolic, TP)含量的测定 采用 Folin-Ciocalteu 法<sup>[23]</sup>, 以没食子酸为标准品绘制标准曲线。

1.3.3.3 还原糖(Reducing sugar, RS)含量的测定 参考 Baskan 等<sup>[24]</sup>的方法略作修改, 采用 3,5-二硝基水杨酸法进行还原糖含量的测定。

1.3.3.4 5-羟甲基糠醛(5-Hydroxymethyl furfural, 5-HMF)的测定

1) 标准曲线 配制 10  $\mu\text{g/mL}$  的 5-HMF 标准工作溶液, 依次吸取 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mL 到 5 个试管中, 均加水至 2 mL, 得到 0, 2.5, 5, 7.5, 10  $\mu\text{g/mL}$  的标准溶液, 加入 5 mL 对甲基苯胺和 1 mL 巴比妥酸溶液, 振摇混匀后, 在波长 550 nm 处测定吸光值。以 5-HMF 含量( $\mu\text{g}$ )为横坐标, 吸光度值为纵坐标绘制标准曲线。

2) 测定 准确吸取莲藕汁样品 10 mL, 加入少量蒸馏水溶解后, 移入 50 mL 容量瓶中, 用移液管分别加入 1.0 mL 亚铁氰化钾和乙酸锌溶液, 摇

匀后用水定容至刻度。静置 20 min 后,过滤得到待测样液。取两份待测液各 2 mL,放入 20 mL 具塞试管中,各加入 5 mL 对甲基苯胺,然后在其中一管中加入 1 mL 蒸馏水,作为空白溶液,另一管加入 1 mL 巴比妥酸溶液,混匀后迅速将溶液倒入比色皿中,在波长 550 nm 处测定吸光值并记录<sup>[25]</sup>。计算公式如下:

$$5\text{-HMF 含量}(\mu\text{g/mL}) = Y \times V_2 / (V_1 \times V_3)$$

式中, $Y$ ——由标准曲线计算得到的 5-HMF 含量 ( $\mu\text{g}$ ); $V_1$ ——待测样液的体积 (mL); $V_2$ ——待测样液的定容体积 (mL); $V_3$ ——测定时吸取样液的体积 (mL)。

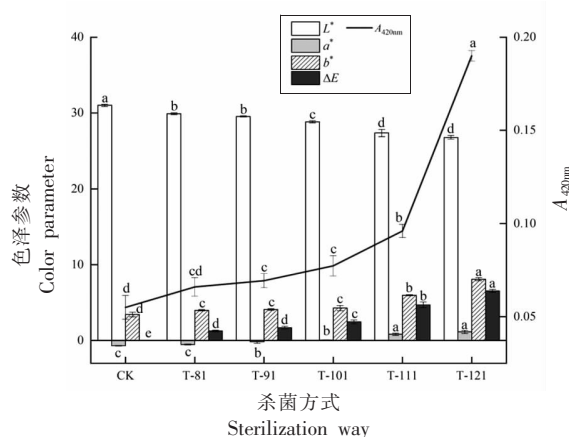
1.3.3.5 游离氨基酸 (Free amino acid, FAA) 组分的测定 参考 GB 5009.124-2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》中的方法进行测定,采用氨基酸自动分析仪检测含量<sup>[26]</sup>。

1.3.4 数据分析 试验过程中所有指标测定均重复测定 3 次,结果均为 3 次平行试验的平均值,以平均值 $\pm$ 标准差表示。采用 Excel 2013 和 SPSS 22.0 统计软件进行数据分析,Origin 2018 进行图表制作。

## 2 结果与分析

### 2.1 杀菌温度对莲藕汁色泽的影响

色泽是影响植物性食品商品品质和营养价值的重要因素之一<sup>[27]</sup>,色差值用来表征莲藕汁的表观色泽。杀菌温度对莲藕汁色泽的影响,如图 1 所示。经过不同杀菌温度处理后,莲藕汁的  $\Delta E$  和  $A_{420\text{nm}}$  值均有显著变化。 $L^*$  值代表莲藕汁的亮度,值越大,表示莲藕汁色泽越亮。不同杀菌温度处理后,莲藕汁的色泽均变暗,以 T-121 组的  $L^*$  值最小 ( $P < 0.05$ ),且与 T-111 组无显著差异 ( $P > 0.05$ ),即杀菌温度越高, $L^*$  值下降越明显,且温度高于 101 °C 时, $L^*$  值下降不明显。 $a^*$  值表示莲藕汁在红绿之间的变化程度, $b^*$  值表示样品的黄蓝程度,不同处理后莲藕汁颜色向红色、黄色靠近,褐变逐渐加深。 $L^*$  值不断下降, $a^*$  值和  $b^*$  值显著上升,造成总色差  $\Delta E$  值显著上升 ( $P < 0.05$ )。一般来说, $\Delta E > 2$  即可发生肉眼可见的颜色变化。T-81 和 T-91 组的  $\Delta E$  均小于 2, T-101, T-111 和 T-121 组的  $\Delta E$  均大于 2,且 T-121 组  $\Delta E$  最大,说明低于 100 °C



注:相同小写字母表示差异不显著 ( $P > 0.05$ );不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ );下图同。

图 1 杀菌温度对莲藕汁色泽参数的影响

Fig.1 Effects of sterilization temperatures on color parameters of lotus rhizome juice

的杀菌与高于 100 °C 的杀菌相比对莲藕汁的色泽影响较小,并且杀菌温度越高,色差变化越大。

在对莲藕汁的表观色度测定的基础上,同时测定了莲藕汁在不同杀菌温度下的褐变度  $A_{420\text{nm}}$ 。如图 1 所示, T-81 与 CK 组相比,  $A_{420\text{nm}}$  无显著变化 ( $P > 0.05$ )。其它杀菌温度处理后,莲藕汁的  $A_{420\text{nm}}$  均呈显著上升趋势 ( $P < 0.05$ )。T-111 组莲藕汁的  $A_{420\text{nm}}$  较 CK 组增加了 0.75 倍; T-121 组莲藕汁的  $A_{420\text{nm}}$  较 CK 组增加了 2.45 倍。综上, 121 °C 杀菌温度下,褐变度急剧上升,莲藕汁褐变严重,这与万鹏<sup>[28]</sup>得到的荔枝果汁在较高温度下处理 15 min 内褐变度迅速增大的研究结果一致。

### 2.2 杀菌温度对莲藕汁中还原糖、VC 和总酚含量的影响

还原糖不仅可以透过一系列聚合反应与氨基化合物反应形成深色物质,而且在处理温度高于其熔点且不存在氨基化合物的情况下会自行降解,导致褐变发生<sup>[29]</sup>。由图 2 可知,莲藕汁在经过不同杀菌温度处理后,还原糖含量均有所增加。其中 121 °C 处理使还原糖含量从 373.4  $\mu\text{g/mL}$  增加至 437.8  $\mu\text{g/mL}$ ,增加了 17.25%,这可能是由于在加热过程中,二糖、多糖水解产生的果糖和葡萄糖多于参与美拉德反应和焦糖化反应消耗的还原糖,导致还原糖含量上升。曹少谦等<sup>[30]</sup>、万鹏<sup>[28]</sup>的研究结果都与本试验类似。美拉德反应不断消耗还



原糖可能激发多糖或二糖的水解,如 Garza 等<sup>[31]</sup>对桃汁热处理过程的研究表明,蔗糖在热处理过程中不断降解。

VC 是莲藕汁中重要的营养物质之一,并且也是参与非酶褐变的底物之一。莲藕汁经过杀菌后,含量均具有显著性降低 ( $P < 0.05$ )。莲藕汁经历 81 °C 杀菌后,VC 含量有迅速下降的趋势,与 CK 组相比减少了 40.60%。T-91 组和 T-101 组的 VC 含量无显著差异 ( $P > 0.05$ ),T-121 组 VC 含量最低,较 CK 组减少了 77.90%,损失严重。这可能是由于 VC 在高温条件下,不断氧化分解生成含双羰基化合物,进一步与氨基化合物反应生成红色素或自身降解形成类黑精所致<sup>[32]</sup>。有研究发现橙汁杀菌过程中,VC 含量出现显著下降,主要是由于 VC 氧化分解后与游离氨基酸反应所致<sup>[33]</sup>,这与刘威<sup>[34]</sup>的研究结果一致。

莲藕汁经过热处理后,PPO 虽已失活,但酚类物质仍保持较高的化学反应活性,能够发生氧化反应,可能引起褐变。不同杀菌温度处理,总酚含量均显著下降 ( $P < 0.05$ )。由此可知,杀菌过程中总酚的氧化聚合可能参与了莲藕汁的褐变。T-111 和 T-121 组与 T-101 组相比,随着杀菌温度的升

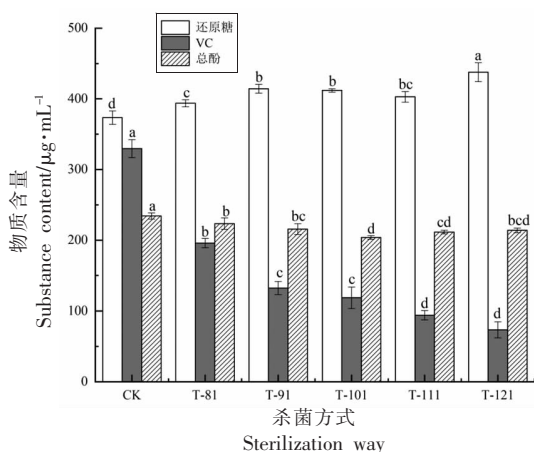


图2 杀菌温度对莲藕汁总酚、VC 和还原糖含量的影响  
Fig.2 Effects of sterilization temperatures on total phenol, VC and reducing sugar content in lotus rhizome juice

#### 2.4 杀菌温度对莲藕汁中游离氨基酸含量的影响

氨基酸是莲藕汁中参与非酶褐变的重要反应物之一,其氨基基团起到亲核试剂的作用,从而导致黑色素的形成<sup>[38]</sup>。莲藕汁中含有的氨基酸谱图

高,总酚含量具有上升的趋势,可能是因为莲藕汁中的多酚类物质通常是以与蛋白质等大分子物质结合状态存在的,高温杀菌后,大分子中的共价键如氢键发生断裂,导致大分子结构受到破坏,多酚物质与大分子分离,游离到莲藕汁中<sup>[35]</sup>。

#### 2.3 杀菌温度对莲藕汁中 5-羟甲基糠醛含量的影响

5-HMF 是已糖在酸性条件下的脱水分解产物,同时也是美拉德反应、抗坏血酸氧化分解反应的共同中间产物,可作为衡量莲藕汁褐变的重要指标之一<sup>[36]</sup>。新鲜和未经处理的果汁中几乎没有 5-HMF,然而由于加热,5-HMF 的含量往往会升高<sup>[37]</sup>。CK 组本身含有微量的 5-HMF,分析原因可能是莲藕汁的灭酶过程导致了微弱的非酶褐变的发生。由图 3 可知,T-81、T-91 和 T-101 组与 CK 组相比,5-HMF 的含量无显著变化 ( $P > 0.05$ ),这说明了温度低于 101 °C 的杀菌对莲藕汁褐变反应的贡献不大,非酶褐变的中间产物几乎不会产生。T-111 和 T-121 组与 CK 组相比,5-HMF 含量显著增加,并且 T-121 组与 T-111 组相比,增加显著 ( $P < 0.05$ ),说明温度越高,5-HMF 的含量越高。

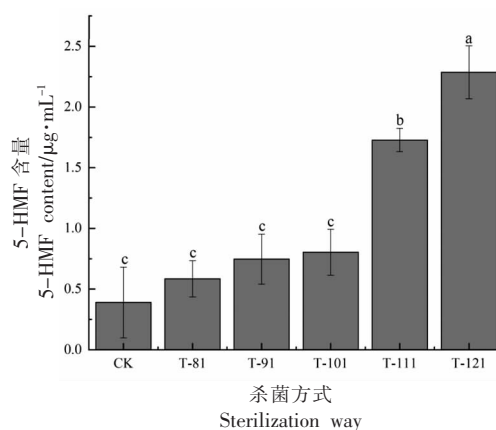


图3 杀菌温度下对莲藕汁 5-羟甲基糠醛含量的变化  
Fig.3 Effects of sterilization temperatures on 5-HMF content in lotus rhizome juice

如图 4 所示,共检测出 16 种氨基酸。表 1 是莲藕汁在不同温度杀菌下的游离氨基酸组分变化表。其中苏氨酸、丝氨酸、蛋氨酸、组氨酸和脯氨酸含量在不同杀菌温度下变化显著 ( $P < 0.05$ ),与 CK

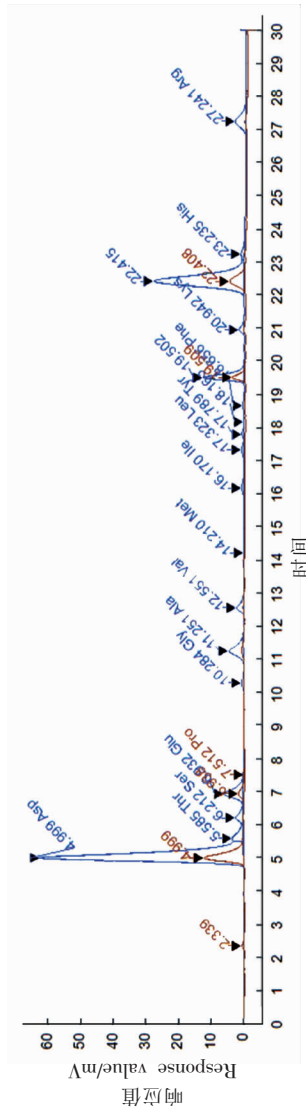


图 4 莲藕汁中游离氨基酸谱图  
Fig.4 Spectrum of free amino acids in lotus rhizome juice

表 1 莲藕汁在不同杀菌温度下游离氨基酸的含量 (mg/g)

	CK	T-81	T-91	T-101	T-111	T-121
天冬氨酸 (Asp)	1.2333 ± 0.0665 <sup>a</sup>	1.2400 ± 0.0356 <sup>a</sup>	1.1433 ± 0.0713 <sup>a</sup>	1.19330 ± 0.045 <sup>a</sup>	1.2100 ± 0.0082 <sup>a</sup>	1.2200 ± 0.0374 <sup>a</sup>
苏氨酸 (Thr)	0.0540 ± 0.0033 <sup>a</sup>	0.0453 ± 0.0021 <sup>b</sup>	0.0457 ± 0.0037 <sup>b</sup>	0.0450 ± 0.0016 <sup>b</sup>	0.0430 ± 0.0008 <sup>b</sup>	0.0440 ± 0.0022 <sup>b</sup>
丝氨酸 (Ser)	0.0320 ± 0.0029 <sup>a</sup>	0.0303 ± 0.0012 <sup>a</sup>	0.0257 ± 0.0012 <sup>b</sup>	0.0280 ± 0.0014 <sup>ab</sup>	0.0293 ± 0.0005 <sup>ab</sup>	0.0290 ± 0.0022 <sup>ab</sup>
谷氨酸 (Glu)	0.1200 ± 0.0082 <sup>a</sup>	0.1233 ± 0.0047 <sup>a</sup>	0.1133 ± 0.0125 <sup>a</sup>	0.1167 ± 0.0047 <sup>a</sup>	0.1200 ± 0.0000 <sup>a</sup>	0.1200 ± 0.0082 <sup>a</sup>
甘氨酸 (Gly)	0.0082 ± 0.0007 <sup>a</sup>	0.0081 ± 0.0004 <sup>a</sup>	0.0079 ± 0.0007 <sup>a</sup>	0.0079 ± 0.0004 <sup>a</sup>	0.0080 ± 0.0001 <sup>a</sup>	0.0084 ± 0.0004 <sup>a</sup>
丙氨酸 (Ala)	0.0703 ± 0.0031 <sup>a</sup>	0.0700 ± 0.0022 <sup>a</sup>	0.0647 ± 0.0046 <sup>a</sup>	0.0667 ± 0.0026 <sup>a</sup>	0.0673 ± 0.0009 <sup>a</sup>	0.0680 ± 0.0022 <sup>a</sup>
半胱氨酸 (Cys)	nd	nd	nd	nd	nd	nd
缬氨酸 (Val)	0.0347 ± 0.0021 <sup>a</sup>	0.0337 ± 0.0009 <sup>a</sup>	0.0317 ± 0.0024 <sup>a</sup>	0.0313 ± 0.0012 <sup>a</sup>	0.0317 ± 0.0019 <sup>a</sup>	0.0330 ± 0.0008 <sup>a</sup>
蛋氨酸 (Met)	0.0047 ± 0.0001 <sup>a</sup>	0.0042 ± 0.0002 <sup>ab</sup>	0.0045 ± 0.0002 <sup>a</sup>	0.0045 ± 0.0004 <sup>a</sup>	0.0030 ± 0.0000 <sup>c</sup>	0.0036 ± 0.0005 <sup>b</sup>
异亮氨酸 (Ile)	0.0203 ± 0.0017 <sup>a</sup>	0.0200 ± 0.0008 <sup>a</sup>	0.0180 ± 0.0016 <sup>a</sup>	0.0190 ± 0.0008 <sup>a</sup>	0.0197 ± 0.0005 <sup>a</sup>	0.0193 ± 0.0005 <sup>a</sup>
亮氨酸 (Leu)	0.0213 ± 0.0009 <sup>a</sup>	0.0220 ± 0.0001 <sup>a</sup>	0.0203 ± 0.0012 <sup>a</sup>	0.0213 ± 0.0009 <sup>a</sup>	0.0220 ± 0.0001 <sup>a</sup>	0.0217 ± 0.0005 <sup>a</sup>
酪氨酸 (Tyr)	0.0173 ± 0.0017 <sup>a</sup>	0.0173 ± 0.0005 <sup>a</sup>	0.0160 ± 0.0008 <sup>a</sup>	0.0170 ± 0.0008 <sup>a</sup>	0.0173 ± 0.0005 <sup>a</sup>	0.0177 ± 0.0005 <sup>a</sup>
苯丙氨酸 (Phe)	0.0140 ± 0.0008 <sup>a</sup>	0.0147 ± 0.0009 <sup>a</sup>	0.0130 ± 0.0008 <sup>a</sup>	0.0143 ± 0.0005 <sup>a</sup>	0.0143 ± 0.0005 <sup>a</sup>	0.0150 ± 0.0008 <sup>a</sup>
赖氨酸 (Lys)	0.0247 ± 0.0009 <sup>a</sup>	0.0257 ± 0.0009 <sup>a</sup>	0.0233 ± 0.0019 <sup>a</sup>	0.0243 ± 0.0009 <sup>a</sup>	0.0250 ± 0.0001 <sup>a</sup>	0.0250 ± 0.0008 <sup>a</sup>
组氨酸 (His)	0.0180 ± 0.0000 <sup>a</sup>	0.0170 ± 0.0008 <sup>ab</sup>	0.0153 ± 0.0012 <sup>b</sup>	0.0167 ± 0.0009 <sup>ab</sup>	0.0163 ± 0.0005 <sup>ab</sup>	0.0167 ± 0.0005 <sup>ab</sup>
精氨酸 (Arg)	0.1400 ± 0.0082 <sup>a</sup>	0.1433 ± 0.0047 <sup>a</sup>	0.1300 ± 0.0082 <sup>a</sup>	0.1367 ± 0.0047 <sup>a</sup>	0.1400 ± 0.0000 <sup>a</sup>	0.1367 ± 0.0047 <sup>a</sup>
脯氨酸 (Pro)	0.0113 ± 0.0005 <sup>a</sup>	0.0108 ± 0.0011 <sup>ab</sup>	0.0090 ± 0.0007 <sup>b</sup>	0.0108 ± 0.0001 <sup>ab</sup>	0.0103 ± 0.0005 <sup>ab</sup>	0.0108 ± 0.0011 <sup>ab</sup>

注：“nd”表示组分含量不在试验检测限内；表中同行数据上标字母不同表示差异显著 (P < 0.05)。

组相比,苏氨酸含量在杀菌处理后变化显著( $P < 0.05$ ),T-91组丝氨酸、组氨酸和脯氨酸含量变化显著( $P < 0.05$ ),T-111和T-121组蛋氨酸含量变化显著( $P < 0.05$ )。随着杀菌处理温度的升高,这5种氨基酸含量降低,T-121组的氨基酸含量最低。分析原因可能是:这5种氨基酸参与了莲藕汁中的非酶褐变反应,氨基酸不仅能和糖类发生美拉德反应,还能与5-HMF、VC氧化分解产物反应生成深色物质,其中脯氨酸的促进作用最显著<sup>[38]</sup>。Noda等<sup>[39]</sup>研究发现苏氨酸是参与美拉德反应的重要底物,这可能与其化学结构有关。

## 2.5 游离氨基酸的主成分分析

由于莲藕汁中的游离氨基酸组分种类较多,为找出主要参与反应的游离氨基酸种类,对16种游离氨基酸成分进行了主成分分析。主成分分析借助降维思想,将多个变量信息综合到少且重要的几个变量上<sup>[40]</sup>。提取特征值大于1的主成分,共得到3个主成分。由表2可知,这3个主成分对样本方差的累积贡献率达到了83.175%,可以反映莲藕汁中游离氨基酸变化的绝大部分信息。第1主成分PC1的贡献率达到了65.0%,第2主成分PC2的贡献率为11.5%,第3主成分PC3的贡献率为6.7%。第3主成分PC3贡献率偏低,可能只是对游离氨基酸变化的一个辅助解释,第1主成分PC1和第2主成分PC2占据了主要的贡献率,因此仅对主成分PC1、PC2的成分进行载荷分析,其结果如图5所示。

主成分的载荷值综合显示出不同杀菌温度处理下莲藕汁中游离氨基酸组分含量与某一主成分的影响,载荷值越大,则说明与该主成分关系越紧密。图5为16种游离氨基酸组分的主成分散点图,与第1主成分高度正相关的有天冬氨酸和丙氨酸;与第2主成分高度正相关的有苏氨酸、蛋氨酸和组氨酸。综上所述,天冬氨酸、丙氨酸、苏氨酸、蛋氨酸和组氨酸是莲藕汁游离氨基酸组分中的主要特征化合物。因此,将氨基酸的主要特征化合物和其它化学物质与莲藕汁中表示色泽的参数进行相关性分析,确定引起莲藕汁颜色变化的主要因子。

## 2.6 化学物质与色泽参数的相关性分析

对莲藕汁杀菌前、后的化学物质和色泽参数

表2 主成分特征值和累积变异百分比

Table 2 Principal component eigenvalues and cumulative variation percentage

主成分	特征值	贡献率/%	累积特征值	累积贡献率/%
1	10.4	65.0	10.4	65.0
2	1.8	11.5	12.2	76.5
3	1.1	6.7	13.3	83.2

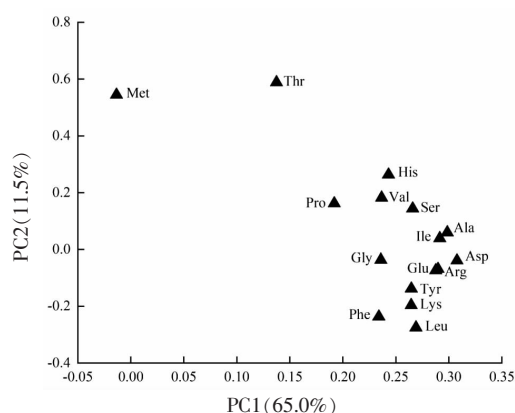


图5 16种游离氨基酸组分的主成分散点图

Fig.5 Principal component analysis biplot for 16 kinds of free amino acids

进行相关性分析,得到相关系数表。其结果如表3所示,数据的相关系数对应显著性大小,相关系数越大表示两变量间相关性越显著。由表3可知,大部分化学物质和色泽之间的相关系数绝对值大于0.3,表明各理化品质间都存在一定的相关性<sup>[41]</sup>。部分物质与色泽之间呈现极显著相关,5-HMF、VC和还原糖含量与色差 $\Delta E$ 和褐变度 $A_{420nm}$ 均呈极显著相关,总酚、苏氨酸和蛋氨酸含量与 $\Delta E$ 呈显著负相关。其中5-HMF与色差的相关性最强,系数达到了0.940。其次,VC、还原糖和色差的相关性系数分别为-0.815和0.763。5-HMF与苏氨酸显著相关,与VC、还原糖和蛋氨酸极显著相关,由此可见,5-HMF的产生主要与VC自身氧化分解,苏氨酸、蛋氨酸和还原糖发生的美拉德反应两种反应有关。结果表明,莲藕汁在杀菌前、后发生的颜色变化涉及的反应是很复杂的,其中非酶褐变的中间产物5-HMF具有最大贡献。5-HMF的产生主要与VC自身氧化分解,苏氨酸、蛋氨酸和还原糖发生的美拉德反应有关。多酚的自氧化反应

表 3 化学物质与色泽参数的相关性系数  
Table 3 Correlation coefficient between chemical substances and color parameters

	还原糖	VC	总酚	5-HMF	Asp	Thr	Ala	Met	His	L*	a*	b*	ΔE	褐变度 (A <sub>420nm</sub> )
还原糖	1													
VC	-0.832**	1												
总酚	-0.587*	0.784**	1											
5-HMF	0.674**	-0.711**	-0.463	1										
Asp	-0.354	0.206	0.125	0.116	1									
Thr	-0.678**	0.771**	0.653**	-0.498*	0.389	1								
Ala	-0.460	0.364	0.221	-0.022	0.966**	0.493*	1							
Met	-0.182	0.451	0.317	-0.617**	-0.045	0.409	0.075	1						
His	-0.473*	0.512*	0.327	-0.126	0.723**	0.609**	0.761**	0.159	1					
L*	-0.756**	0.864**	0.634**	-0.894**	0.030	0.644**	0.197	0.627**	0.237	1				
a*	0.740**	-0.814**	-0.550*	0.932**	-0.054	-0.598**	-0.215	-0.629**	-0.265	-0.943**	1			
b*	0.730**	-0.692**	-0.387	0.939**	0.049	-0.493*	-0.075	-0.493*	-0.127	-0.909**	0.916**	1		
ΔE	0.763**	-0.815**	-0.540*	0.940**	0.014	-0.582*	-0.146	-0.582*	-0.204	-0.981**	0.962**	0.968**	1	
褐变度(A <sub>420nm</sub> )	0.759**	-0.626**	-0.291	0.869**	0.078	-0.351	-0.041	-0.292	-0.076	-0.814**	0.840**	0.950**	0.900**	1

注：“\*”表示相关性在 P<0.05 上显著，“\*\*”表示相关性在 P<0.01 上显著。

对莲藕汁的颜色变化影响作用最小。

### 3 结论

本文采用不同杀菌温度处理研究其对莲藕汁色泽与化学物质含量的影响,发现 5 种杀菌温度对莲藕汁处理后 a\*、b\*、ΔE、A<sub>420nm</sub> 值均增大,还原糖及 5-HMF 含量均升高,L\*、抗坏血酸、总酚、苏氨酸、丝氨酸、蛋氨酸、组氨酸和脯氨酸含量均降低。相比于 101,111 °C 和 121 °C 杀菌,81 °C 和 91 °C 杀菌对莲藕汁的 ΔE 和 A<sub>420nm</sub> 的变化影响较小,5-HMF 无显著变化。在此基础上进行相关性分析发现,5-HMF 与色泽参

数的相关性最强,之后依次是 VC、还原糖、蛋氨酸和苏氨酸,可认为 5-HMF 对莲藕汁颜色变化影响最大,可能主要是由 VC 氧化分解产生,其次是美拉德反应,酚类物质的氧化分解影响较小可能是因为酚类物质具有较高的离解常数(pKa),而莲藕汁呈弱酸性,因此在莲藕汁中较难失去电子,减缓了酚类物质的氧化分解过程。综上所述,81 °C 和 91 °C 杀菌相比于 101,111 °C 和 121 °C 杀菌对莲藕汁的色泽及化学物质影响较小,其中引起莲藕汁杀菌前、后颜色变化的主要因子是 5-HMF,而 5-HMF 的产生主要与 VC 自身氧化分解,苏氨酸、蛋氨酸和还原糖发生美拉德反应两种反应有关。

## 参 考 文 献

- [1] 吴大志. 湖北省水生蔬菜再认识[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(8): 143-145.  
WU D Z. Recognition of aquatic vegetables in Hubei Province[J]. Hubei Agricultural Science, 2018, 57(8): 143-145.
- [2] 董英. 藕汁褐变反应及其控制[J]. 农业工程学报, 1994, 10(3): 143-147.  
DONG Y. Browning reaction of lotus root juice and its control[J]. Journal of Agricultural Engineering, 1994, 10(3): 143-147.
- [3] 林道. 莲藕汁饮料的加工[J]. 农村机械化, 1995, 5: 22.  
LIN D. Processing of lotus root juice beverage[J]. Rural Mechanization, 1995, 5: 22.
- [4] 周佳仪, 周子涵, 周锐, 等. 超高压生鲜莲藕汁加工技术研究[J]. 农产品加工, 2019(6): 52-55.  
ZHOU J Y, ZHOU Z H, ZHOU R, et al. Study on processing technology of ultra-high pressure fresh lotus root juice[J]. Agricultural Products Processing, 2019(6): 52-55.
- [5] 夏硕. 高温杀菌对预浸泡豆杆品质影响的研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2018.  
XIA S. Effect of high temperature sterilization on the quality of pre-soaked Bean Stalk[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2018.
- [6] 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.  
ZHU D H, XIA W S. Processing status and development of lotus root food[J]. Food Industry Technology, 2002, 23(8): 99-100.
- [7] EANTET R, CROGUENNEC T, SCHUCK P, et al. Handbook of food science and technology 1 (food alteration and food Quality)/Other Food Constituents [M]. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2016: 52-134.
- [8] HEITMANN M, ZANNINI E, ARENDT E. Impact of *Saccharomyces cerevisiae* metabolites produced during fermentation on bread quality parameters: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(7): 1152-1164.
- [9] TARANTO F, PASQUALONE A, MANGINI G, et al. Polyphenol oxidases in crops: Biochemical, physiological and genetic aspects[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2017, 18(2): 377.
- [10] YU A N, ZHOU Y Y, YANG Y N. Kinetics of browning and correlations between browning degree and pyrazine compounds in ascorbic acid/acidic amino acid model systems[J]. Food Chemistry, 2017, 221(15): 1678-1684.
- [11] PARAVISINI L, PETERSON D G. Role of reactive carbonyl species in non-enzymatic browning of apple juice during storage[J]. Food Chemistry, 2018, 245: 1010-1017.
- [12] 韩燕. 橙汁色泽及其在杀菌贮藏过程中变化的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2008.  
HAN Y. Study on orange juice color and its changes during sterilization and storage[D]. Chongqing: Southwest University, 2008.
- [13] 鲍若晗. 小白杏饮料的研制及加工和储藏过程中非酶褐变的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2012.  
BAO R H. Development of small white apricot beverage and study on non enzymatic browning during processing and storage [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2012.
- [14] IBARZ A, GARZA S, PAGAN J. Nonenzymatic browning of selected fruit juices affected by D-galacturonic acid [J]. International Journal of Food science & Technology, 2010, 43(5): 908-914.
- [15] 许志美. 植物乳杆菌发酵芦笋汁的研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2019.  
XU Z M. Study on asparagus juice fermented by *Lactobacillus plantarum*[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2019.
- [16] JAIN S K, KHURDIYA D S. Ascorbic acid content and non-enzymatic browning in stored Indian gooseberry juice as affected by sulphitation and storage[J]. J Food Sci Technol-Mysore, 2009, 46(5): 500-501.
- [17] 汪芳安, 王展, 赵芳芳, 等. 莲藕双歧因子功能饮料的研制[J]. 食品工业科技, 2004, 25(6): 98-99.  
WANG F A, WANG Z, ZHAO F F, et al. Development of lotus root bifidus factor functional beverage[J]. Food Industry Technology, 2004, 25(6): 98-99.
- [18] 许金蓉, 王清章, 周明全. 莲藕贮藏及其生理生化研究进展[J]. 氨基酸与生物资源, 2003, 25(2): 47-51.  
XU J R, WANG Q Z, ZHOU M Q. Advances in storage, physiology and biochemistry of lotus root[J].



- Amino Acids and Biological Resources, 2003, 25 (2): 47-51.
- [19] 卢嘉懿, 李汴生, 阮征. 乳酸菌发酵对梨汁的护色作用[J]. 现代食品科技, 2019, 35(3): 148-153.  
LU J Y, LI B S, RUAN Z. Effect of lactic acid bacteria fermentation on color protection of pear juice[J]. Modern Food Technology, 2019, 35(3): 148-153.
- [20] LEE H S, COATES G A. Effect of thermal pasteurization on Valencia orange juice color and pigments[J]. LWT-Food Science and Technology, 2003, 36(1): 153-156.
- [21] ZERDIN K, ROONEY M L, VERMUE J. The vitamin C content of orange juice packed in an oxygen scavenger material[J]. Food Chemistry, 2003, 82(3): 387-395.
- [22] 阮卫红, 毕金峰, 刘璇, 等. 桃汁热处理过程中非酶褐变动力学研究[J]. 食品科学, 2014, 35(1): 50-55.  
RUAN W H, BI J F, LIU X, et al. Study on non enzymatic browning kinetics of peach juice during heat treatment[J]. Food Science, 2014, 35(1): 50-55.
- [23] 周浓, 莫日坚, 闫协民, 等. 不同加工工艺对番石榴果粉品质的影响及其褐变的抑制[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(10): 129-134.  
ZHOU N, MO R J, YAN X M, et al. Effects of different processing technologies on the quality of guava fruit powder and its inhibition of browning[J]. Food and Fermentation Industry, 2019, 45(10): 129-134.
- [24] BAŞKAN K S, TÜTEM E, AKYÜZ E, et al. Spectrophotometric total reducing sugars assay based on cupric reduction[J]. Talanta, 2016, 147: 162-168.
- [25] 李良, 孟淑洁, 陈晓云. 水果蔬菜及其制品中羟甲基糠醛测定的研究[J]. 辽宁农业科学, 2002(4): 12-14.  
LI L, MENG S J, CHEN X Y. Study on the determination of hydroxymethylfurfural in fruits, vegetables and their products[J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2002(4): 12-14.
- [26] 齐建双. 氨基酸分析仪法快速测定玉米籽粒中赖氨酸含量[J]. 中国农学通报, 2014, 30(30): 199-202.  
QI J S. Rapid determination of lysine content in corn grain by amino acid analyzer[J]. Bulletin of Chinese agronomy, 2014, 30(30): 199-202.
- [27] VEGARA S, MARTI N, MENA P, et al. Effect of pasteurization process and storage on color and shelf-life of pomegranate juices[J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 54(2): 592-596.
- [28] 万鹏. 荔枝果汁非酶褐变机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.  
WAN P. Study on non enzymatic browning mechanism of litchi juice [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010.
- [29] 李申, 马亚琴, 韩智, 等. 氨基酸在柑橘汁非酶褐变过程中的影响和作用[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(11): 249-255.  
LI S, MA Y Q, HAN Z, et al. Effects of amino acids on non enzymatic browning of citrus juice[J]. Food and Fermentation Industry, 2015, 41(11): 249-255.
- [30] 曹少谦, 陈伟, 袁勇军, 等. 水蜜桃汁热处理过程中的非酶褐变[J]. 食品科技, 2011, 36(5): 91-94.  
CAO S Q, CHEN W, YUAN Y J, et al. Non enzymatic browning of peach juice during heat treatment[J]. Food Technology, 2011, 36(5): 91-94.
- [31] GARZA S, IBARZ A, PAGAN J, et al. Non-enzymatic browning in peach puree during heating[J]. Food Research International, 1999, 32(5): 335-343.
- [32] 周亚平, 于士梅, 戴洪义, 等. 苹果浓缩汁非酶褐变的研究进展[J]. 莱阳农学院学报: 自然科学版, 2006, 23(1): 23-26.  
ZHOU Y P, YU S M, DAI H Y, et al. Research progress on non enzymatic browning of apple juice concentrate[J]. Journal of Laiyang Agricultural College: Natural Science Edition, 2006, 23(1): 23-26.
- [33] 王小明. 橙汁加工过程的酶解工艺优化与褐变控制研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2013.  
WANG X M. Study on enzymatic hydrolysis process optimization and browning control of orange juice processing[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2013.
- [34] 刘威. 枸杞制汁过程中褐变及主要活性物质含量变化的研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2014.  
LIU W. Study on browning and content changes of main active substances in *Lycium barbarum* juice[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2014.
- [35] 王蓓. 热杀菌方法对加工莲藕汁抗氧化性的影响[J]. 北京农业, 2015(14): 7-8.  
WANG B. Effect of thermal sterilization on antioxi-

- dant activity of processed lotus root juice[J]. Beijing Agriculture, 2015(14): 7-8.
- [36] 陈俊. 5-羟甲基糠醛参与的非酶褐变研究[D]. 广州: 暨南大学, 2019.
- CHEN J. Study on non enzymatic browning involving 5-hydroxymethylfurfural[D]. Guangzhou: Jinan University, 2019.
- [37] SPANO N, CASULA L, PANZANELL A, et al. An RP-HPLC determination of 5-hydroxymethylfurfural in honey: The case of strawberry tree honey[J]. Talanta, 2006, 68(4): 1390-1395.
- [38] MADRUGA M S, MOTTRAM D S. The effect of pH on the formation of maillard-derived aroma volatiles using a cooked meat system[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1995, 68(3): 305-310.
- [39] NODA K, MURATA M. Two novel pyrrolooxazole pigments formed by the Maillard reaction between glucose and threonine or serine [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2017, 81 (2): 343-349.
- [40] 周琪, 陈晨, 周福慧, 等. 短波紫外线控制鲜切苹果褐变与其活性氧代谢的相关性[J]. 食品科学, 2019, 40(5): 102-109.
- ZHOU Q, CHEN C, ZHOU F H, et al. Correlation between browning of fresh cut apple controlled by short wave ultraviolet radiation and its reactive oxygen species metabolism[J]. Food Science, 2019, 40 (5): 102-109.
- [41] 刘园, 肖广健, 陈飞, 等. 热烫方式对桃微观结构、酶促褐变及相关品质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(20): 183-190.
- LIU Y, XIAO G J, CHEN F, et al. Effects of blanching methods on microstructure, enzymatic browning and related quality of peach[J]. Food Industry Technology, 2021, 42(20): 183-190.

### Effects of Sterilization Temperature on Color and Chemical Compositions of Lotus Rhizome Juice

Jiang Huiwen<sup>1</sup>, Sun Xianxian<sup>1</sup>, Li Jie<sup>1,2,3\*</sup>, Yan Shoulei<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070

<sup>2</sup>Key Laboratory of Environment Correlative Dietology, Ministry of Education, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070

<sup>3</sup>Aquatic Vegetable Preservation and Processing Technology Engineering Center of Hubei Province, Wuhan 430070

**Abstract** In this research, the effects of different sterilization temperatures on color and related chemical substances in lotus rhizome juice were studied, and the correlation between color parameters and chemical substances was analyzed to determine the relationship with them. The results showed that the values of  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $\Delta E$  and  $A_{420\text{nm}}$  increased, the contents of reducing sugar and 5-hydroxymethylfurfural increased, and the contents of ascorbic acid, total phenol, threonine, serine, methionine, histidine and proline decreased. Compared with sterilization at 101, 111 °C and 121 °C, sterilization at 81 °C and 91 °C had little effect on the color and chemical substances of lotus rhizome juice. 5-Hydroxymethylfurfural, ascorbic acid and reducing sugar were significantly correlated with  $\Delta E$  and  $A_{420\text{nm}}$ , among which 5-hydroxymethylfurfural had the strongest correlation with  $\Delta E$ , and the coefficient reached 0.940, indicating that 5-hydroxymethylfurfural was the main factor causing the color change of lotus rhizome juice before and after sterilization. 5-Hydroxymethylfurfural was significantly related to ascorbic acid, reducing sugar, threonine and methionine. It could be inferred that the production of 5-hydroxymethylfurfural was mainly related to the oxidative decomposition of ascorbic acid and the Maillard reaction of threonine, methionine and reducing sugar.

**Keywords** lotus rhizome juice; sterilization temperature; browning; principal component analysis; correlation analysis