

# 不同非热加工技术对百香果果浆杀菌效果及品质变化的比较

郑楚瑶<sup>1</sup>, 张司南<sup>1</sup>, 吴元斌<sup>2</sup>, 蒋卓<sup>1\*</sup>

(1. 华南农业大学食品学院, 广东广州 510642) (2. 广西果天下食品科技有限公司, 广西百色 533612)

**摘要:** 为评价不同非热杀菌方式对果蔬原料杀菌效果及品质的影响, 该研究分别采用超高压技术 (High Hydrostatic Pressure, HHP)、低温等离子体技术 (Cold Plasma, CP) 和辐照技术三种方式对百香果鲜榨果浆进行杀菌处理。结果表明, 三种非热处理方式对果浆中的微生物 (2.15 lg(CFU/g)、2.44 lg(CFU/g)、2.34 lg(CFU/g)) 均有一定的抑制和杀灭作用, 其中 300 MPa 及以上压力处理和 3 kGy 辐照量处理后果浆的菌落数均 < 1 lg(CFU/g), 这两种方式对百香果果浆均有较好的杀菌效果。为了进一步探究超高压处理对果浆贮藏期的影响, 该研究还探讨了超高压处理前后的果浆在 -20 °C 的条件下储存 9 个月内微生物含量的变化, 实验得出, 500 MPa 和 600 MPa 处理的百香果果浆在 -20 °C 下储存 9 个月后微生物含量仍 < 2 lg(CFU/g), 符合国家安全规定。在理化性质方面, 超高压技术和低温等离子体技术能有效保持果浆的色泽 ( $\Delta E < 2$ ) 和风味 ( $p > 0.05$ ), 且能抑制果浆 POD 酶、PPO 酶的活性, 但辐照处理无法钝化 PPO 酶。综上所述, 超高压技术能有效杀灭百香果果浆中的菌落, 并能更好地保持果浆的品质, 因此超高压技术在百香果果浆中具有较好的商业应用前景。

**关键词:** 超高压; 低温等离子体; 辐照; 微生物; 品质

文章编号: 1673-9078(2023)01-205-212

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.1.0133

## Comparison on Sterilization Effect and Quality Change of Passion Fruit Pulp Prepared by Different Non-thermal Processing Technologies

ZHENG Chuyao<sup>1</sup>, ZHANG Sinan<sup>1</sup>, WU Yuanbin<sup>2</sup>, JIANG Zhuo<sup>1\*</sup>

(1. College of Food Sciences, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

(2. Guangxi Guotianxia Food Technology Co. Ltd., Baise 533612, China)

**Abstract:** To evaluate the influences of different non-thermal methods on the sterilization effectiveness and quality of raw fruit and vegetable materials, high hydrostatic pressure (HHP) technology, cold plasma (CP) technology, and irradiation technology were applied to sterilize freshly pressed passion fruit pulp. The results indicated that the three non-thermal treatments could inhibit and kill to certain extents the microorganisms in the pulp (2.15 lg(CFU/g), 2.44 lg(CFU/g), 2.34 lg(CFU/g), respectively). The number of colonies in the pulp was lower than 1 lg (CFU/g) after the treatment at a pressure of 300 MPa and above and the treatment with an irradiation dose of 3 kGy, indicating that both methods had a good sterilizing effect on passion fruit pulp. In order to explore further the effect of HHP treatment on the storage period of fruit pulp, this study also investigated the changes in the microbial contents of fruit pulps with and without a high hydrostatic pressure treatment during the storage at -18 °C for 9 months. The experiments showed that the microbial contents of the passion fruit pulps treated at 500 MPa and 600 MPa were still in compliance with the National Safety Regulation after being stored at -20 °C for 9 months (both < 2 lg (CFU/g)). In terms of physico-chemical characteristics, the HHP technology and CP technology could effectively retain the color ( $\Delta E < 2$ ) and flavor ( $p > 0.05$ ) of the

引文格式:

郑楚瑶, 张司南, 吴元斌, 等. 不同非热加工技术对百香果果浆杀菌效果及品质变化的比较[J]. 现代食品科技, 2023, 39(1): 205-212

ZHENG Chuyao, ZHANG Sinan, WU Yuanbin, et al. Comparison on sterilization effect and quality change of passion fruit pulp prepared by different non-thermal processing technologies [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(1): 205-212

收稿日期: 2022-02-10

基金项目: 广东省重点研发计划项目 (2019B020212004; 2020B020225002); 中国工程物理研究院中子物理学重点实验室开放基金 (2019DB01)

作者简介: 郑楚瑶 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品机械, E-mail: choryiucheong@163.com

通讯作者: 蒋卓 (1986-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 超高压果蔬加工, E-mail: jiangzhuo@scau.edu.cn

fruit pulp, and exerted certain inhibitory effects on the activities of POD and PPO enzymes, although the irradiation treatment could not inactivate the PPO enzyme. In summary, the HHP technology can effectively kill the microbiam colonies in the passion fruit pulp while retaining better the quality of the pulp. Therefore, HHP technology has good commercial application prospects in processing passion fruit pulp.

**Key words:** high hydrostatic pressure; coldplasma; irradiation technology; microorganisms; quality

百香果,又名西番莲,属西番莲科西番莲属植物,其果肉香气浓郁,因具有百种水果的香气得名。百香果由内到外都具有非常大的药用价值和营养价值。其果皮中含有大量果胶、花青素、膳食纤维等,经过晒干、研磨等工艺处理后可以作为辅料进食,具有一定的保健作用。Queiroz 等<sup>[1]</sup>发现黄色百香果果皮粉(主要是果胶成分)可以降低糖尿病患者的胰岛素抵抗力,改善胰岛素敏感性,从而对糖尿病的常规疗法起到较好的辅助作用。百香果的果肉中存在大量黄酮、黄酮苷、生物碱等小分子化合物,其中的黄酮类成分使百香果具有很好的抗炎作用;在微量元素方面,百香果果肉中含有铜、钾、铁、钙等 21 种维持生命活动所必需的矿物质元素,其中钾含量高达 1 400~2 640 mg/kg<sup>[2]</sup>;除此之外果肉种还存在多种维生素、胡萝卜素等营养物质<sup>[3]</sup>。

传统的果汁饮品加工灭菌方法多为高温瞬时灭菌或巴氏杀菌,但是高温灭菌容易破坏果浆本身的营养成分,使果汁产生蒸煮味,影响百香果果汁的品质、口感,不利于鲜榨果浆的销售。谢国芳等<sup>[4]</sup>利用定量描述分析法对高温瞬时灭菌后的蓝莓汁进行感官评定,得出该方法会破坏果浆的天然色泽及香味,还使果浆产生不宜的蒸煮味;胡盼盼等<sup>[5]</sup>研究三种传统热杀菌方式处理后鲜榨苹果汁的品质变化,发现果汁中的 Vc 含量出现了不同程度的下降,其中热处理法对果汁 Vc 含量的影响最为明显。正因为传统热杀菌方式会对果汁带来不良影响,近年来学者们对非热杀菌工作的研究越来越多,例如彭思嘉等<sup>[6]</sup>比较了超高压技术和高温短时杀菌技术对樱桃汁品质的影响,结果表明超高压杀菌能有效保持樱桃汁总酚、维生素 C、天竺葵素-3,5 二葡萄糖苷等营养物质的含量。超高压技术(High Hydrostatic Pressure, HHP)在食品、茶饮品生产加工过程中的影响是近年来的研究热点。将食品或饮品包装后放入舱体中,以液体作为压力传递介质,对其施加 400~600 MPa 的压力或用高级液压油施加以 100~1 000 MPa 的压力并保压一段时间,以杀死食品饮品中的微生物、降低酶活性,达到加工、灭菌、储藏目的<sup>[7]</sup>。低温等离子体技术(Cold Plasma, CP)是一种新型的非热杀菌技术,其原理是向空气中注入大量能量,使气体电离产生等离子体<sup>[8]</sup>,这些等离子体受外界电场和磁场的影响,产生多种物理化学反应,

如紫外辐射、电磁场、热效应、带电粒子和活性粒子等<sup>[9]</sup>。这种方式之所以能够灭菌,主要是由于电离出的超氧化物、羟自由基、过氧化氢、一氧化氮和臭氧等活性物质和带电粒子作用于细胞膜及胞内遗传物质,扰乱细胞正常生理功能,从而导致细胞的裂解和死亡。而食品辐照是利用原子能射线产生的辐射能量杀死食品中不同种类的微生物的一种杀菌技术。其原理是利用辐照射线对微生物产生初级和次级作用。除以上三种非热加工方式以外,还有 PEF、高压二氧化碳等。

非热处理方法方式均能避免传统热杀菌方式对果浆饮品带来的不良影响,为更好的评估不同非热方式的优点,本文选取百香果榨果浆为对象,选取了方便对液态食品进行杀菌处理的 HHP、CP 和辐照处理三种方式进行对比研究,设置不同参数处理百香果鲜榨果浆,比较三种杀菌方式的杀菌效果及理化品质的影响,得出杀菌效果最好且对鲜榨果浆品质影响最小的杀菌方法,为其工业化加工和推广提供一定的参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

百香果鲜榨果浆,由广州市领航食品有限公司提供。琼脂粉、胰蛋白胨、酵母浸出膏、氯化钠、无水葡萄糖、磷酸氢二钾( $K_2HPO_4$ )、磷酸二氢钾( $KH_2PO_4$ )、孟加拉红琼脂、愈创木酚、30%  $H_2O_2$ ,均为分析纯。

SSH-75L 超高压设备,三水河科技股份有限公司;CPS-I型高压电场低温等离子体杀菌测试系统,南京农业大学联合研发;Q(H) $\gamma$ 型辐照装置,广州辐锐高能技术有限公司;FD-5 荧光分光密度计,SPECTROPHOTOMETER;HY102ATC 型手持折光仪,杭州恒仪器仪表科技有限公司;752N 型紫外可见分光光度计,上海仪电分析仪器有限公司;离心机,广州市泉宏科学仪器有限公司;LHS-250SC 型恒温培养箱,上海齐欣科学仪器有限公司;PHS-25 型 PH 计,雷磁;FA1204C 型分析天平, Techcomp; YX-24JM 型手提式压力蒸汽灭菌器,江阴滨江医疗设备有限公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 超高压处理

使用超高压设备对百香果鲜榨果浆进行杀菌处理。

超高压前,将果浆分装在密封袋中真空密封,每袋约50 g,设置处理压力为200、300、400、500、600 MPa,保压时间15 min。每个压力梯度处理4包样品,处理完后于立刻置于-20℃冰柜中冷冻储存待测。

### 1.2.2 低温等离子体处理

使用高压电场低温等离子体冷杀菌设备(CP-I型)对百香果果浆进行杀菌处理。处理时首先控制电压为140 kV,分别对果浆进行时长为3 min、6 min、9 min的杀菌处理;再控制杀菌时间为6 min,分别用120 kV、160 kV电压对果浆进行杀菌。

### 1.2.3 辐照处理

利用辐照装置对果浆样品进行杀菌处理,辐射源为钴-60。分别用3 kGy、6 kGy和9 kGy三个梯度处理果浆样品,辐照时长分别为4 h、8 h、12 h。

### 1.2.4 微生物测定

菌落总数参照国家标准《食品安全国家标准食品微生物学检验菌落总数测定》(GB 4789.2-2016),测定三种非热杀菌方式处理前后样品中的菌落总数,以lg(CFU/g)进行计算。霉菌和酵母参照国家标准《食品安全国家标准食品微生物学检验,霉菌和酵母计数测定》(GB 4789.15-2016),测定样品中的霉菌和酵母含量,以lg(CFU/g)进行计算。

### 1.2.5 酶活性检测

#### 1.2.5.1 POD 酶活性检测

粗酶提取液:参照Carmen<sup>[10]</sup>的方法略做修改。

POD酶活性测定:将粗酶提取液0.1 mL加入比色皿中,再加入反应溶液(含pH值6.1的磷酸缓冲液、30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>和愈创木酚),快速搅拌均匀后放入波长为470 nm的紫外分光光度计中读数。根据读数绘制酶活性图,并计算百香果果浆中的酶活性及残留酶活性,计算公式见公式(1):

$$B = \frac{\Delta A_{470\text{nm}} \times V_t}{m \times V_s \times 0.01 \times t} \quad (1)$$

式中:

B—POD酶活性, U/g min;

$\Delta A_{470\text{nm}}$ —反应时间内吸光度的变化;

$V_t$ —粗酶提取液的总体积, mL;

$m$ —样品鲜重, g;

$V_s$ —测定时取用酶液的体积, mL;

$t$ 表示反应时间, min。

#### 1.2.5.2 PPO 酶活性检测

粗酶提取液:参照Carmen<sup>[10]</sup>方法略做修改。

PPO酶活性测定:将粗酶提取液0.3 mL加入比色皿中,再加入3 mL含0.07 mol/L邻苯二酚的磷酸缓冲液(pH值6.5, 0.05 mol/L)快速搅拌均匀后于波长为420 nm

的紫外分光光度计中读数。根据读数绘制酶活性图,并计算处理后百香果果汁中的酶活性及残留酶活性,计算公式见公式(2)

$$C = \frac{A_t}{A_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

C—残留酶活性, %;

$A_t$ 表示处理后果浆中的酶活性, U/g min;

$A_0$ 表示处理前果浆的酶活性, U/g min。

### 1.2.6 颜色指标检测

利用荧光分光光度计测量百香果果浆的颜色指标。测量前用滤网将果浆中的黑色果籽滤去,并将汁液搅拌均匀,倒入透明塑料测试皿中,在反射模式下读取样品 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 三色值,并计算总色差 $\Delta E$ ,重复测量10次取平均值。其中 $L^*$ 示亮度, $a^*$ 表示被测样品的红绿色, $b^*$ 表示被测样品的黄蓝色, $\Delta E$ 为总色差,其值越大,表示样品的颜色变化越大。

### 1.2.7 pH值与可溶性固型物含量(TSS)

果浆pH值采用pH计测定仪检测。取10 mL样品于烧杯中,放置到温度恢复至室温后,搅拌均匀,用pH计进行测定,每个样品测量5次,取平均值。

采用手持式折光计法测定果浆中的TSS含量。将样品液搅拌均匀后,用吸管吸取2~3滴样品液于棱镜上通过目镜观察读数。每个样品重复5次,取平均值。

### 1.2.8 果浆贮藏期实验

选取综合评价较好的处理方式处理百香果果浆后进行贮藏期实验。在-20℃下保存时间达到1周、2周、1月、2月、3月、6月、9月时,对处理前后样品的微生物含量进行测试。

## 1.3 数据统计与分析

采用SPSS对实验数据进行分析,运用Origin 19.0软件进行绘图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 微生物情况

菌落数是判定果汁饮品被污染程度的主要标志,其测定结果能反映果浆在生产过程中是否达到卫生标准、灭菌是否充分,以便做出适当的卫生学评价。经测定并比较三种杀菌方法以及未经杀菌的百香果果浆微生物指标,结果如表1所示:三种杀菌方式处理前百香果果浆中测出的初始自然菌落数分别为2.15 lg(CFU/g)、2.44 lg(CFU/g)和2.54 lg(CFU/g),经过200 MPa超高压处理后,果浆中的菌落总数降至

2.021 lg(CFU/g)。根据《食品安全国家标准饮品》(GB 7101-2015)中的规定,果汁饮料中自然菌落数需 $\leq 2$  lg(CFU/g),因此 200 MPa 压力处理并不能达到良好的杀菌效果;300 MPa 及以上压力处理后,果浆样品的菌落总数已降至可检测值以下( $\leq 1$  lg(CFU/g)),这些结果说明 HHP 处理能有效抑制甚至杀灭百香果果浆中不耐压的自然菌,且压力越高杀菌效果越明显。同样地,辐照处理也能有效杀灭果浆中的微生物,3 kGy 辐射量处理后百香果果浆的微生物含量已经降至可检测值以下。

CP 处理对百香果果浆中的微生物同样表现出一定的抑制作用,但效果较 HHP 处理和辐照处理不显著,具体表现为:在相同的处理电压下(140 kV),处理 6 min 才能将果浆中的菌落总数降至国标要求的安全值以下,且随着处理时间的延长,9 min 后果浆中的菌落数仍有 1.65 lg(CFU/g),杀菌率为 32.37%;而在相同的处理时间下(6 min),果浆中的菌落数随着

处理电压的升高出现小幅度下降,但用 160 kV 电压处理果浆后,菌落总数仍有 1.87 lg(CFU/g)。

霉菌和酵母菌时引起果汁原浆腐败的重要菌类之一,其中以青霉最为常见。它的存在会导致水果原浆产生刺激性气味,也会使果汁分层,严重影响果汁的品质和观感。而不少霉菌又属于耐热型菌种,常规的巴氏消毒可能无法完将其全杀灭,因此研究非热杀菌技术对霉菌的杀灭效果尤为重要。三种不同的杀菌处理后百香果果浆中霉菌和酵母的含量如表 2 所示。三种杀菌方式都能完全杀灭果浆中的霉菌和酵母,其中 HHP 处理和辐照处理效果尤为显著,具体表现为:300 MPa 及以上压力处理后的果浆已经无法检测出霉菌和酵母;在辐照处理方面,3 kGy 辐射量处理后即可达到 100% 灭菌。对于 CP 处理,用 160 kV 电压处理 6 min 或 140 kV 电压处理 9 min,才能将果浆中的霉菌完全杀灭。

表 1 三种杀菌方式对百香果果浆菌落总数的影响

**Table 1 Effects of three sterilization methods on the total number of colonies in passion fruit pulp**

HHP 杀菌		CP 杀菌		辐照杀菌	
处理参数	菌落数/lg(CFU/g)	处理参数	菌落数/lg(CFU/g)	处理参数	菌落数/lg(CFU/g)
对照组	2.15 $\pm$ 0.05	对照组	2.44 $\pm$ 0.05	对照组	2.34 $\pm$ 0.10
200 MPa	2.02 $\pm$ 0.07	3 min, 140 kV	2.24 $\pm$ 0.05	3 kGy	$\leq 1$
300 MPa	$\leq 1$	6 min, 120 kV	2.00 $\pm$ 0.09	6 kGy	$\leq 1$
400 MPa	$\leq 1$	6 min, 140 kV	1.95 $\pm$ 0.09	9 kGy	$\leq 1$
500 MPa	$\leq 1$	6 min, 160 kV	1.87 $\pm$ 0.10	-	-
600 MPa	$\leq 1$	9 min, 140 kV	1.65 $\pm$ 0.10	-	-

注:国家标准 $\leq 2$  lg(CFU/g);数据结果为均值 $\pm$ 标准差( $n=3$ )。

表 2 三种杀菌方式对百香果果浆霉菌和酵母的影响

**Table 2 Effects of three sterilization methods on passion fruit pulp mold and yeast**

HHP 杀菌		CP 杀菌		辐照杀菌	
处理参数	菌落数 lg(CFU/g)	处理参数	菌落数 lg(CFU/g)	处理参数	菌落数 lg(CFU/g)
对照组	1.17 $\pm$ 0.05	对照组	1.65 $\pm$ 0.05	对照组	1.65 $\pm$ 0.01
200 MPa	0.70 $\pm$ 0.10	3 min, 140 kV	1.54 $\pm$ 0.02	3 kGy	ND
300 MPa	ND	6 min, 120 kV	1.30 $\pm$ 0.01	6 kGy	ND
400 MPa	ND	6 min, 140 kV	0.70 $\pm$ 0.01	9 kGy	ND
500 MPa	ND	6 min, 160 kV	ND		
600 MPa	ND	9 min, 140 kV	ND		

注:ND 表示未测出;数据结果为均值 $\pm$ 标准差( $n=3$ )。

总的来说,以上三种不同的非热杀菌技术中 HHP 处理和辐照处理均有较好的杀菌效果,而 CP 处理的杀菌效果则不占优势。这是因为 HHP 技术杀菌的基本原理是基于压力对微生物的致死作用,一定程度的高压会影响微生物细胞的形态和结构,影响其内部的生物化学反应,同时还会破坏细胞膜、细胞壁等结构,

甚至会导致细胞内容物泄漏,对一些微生物造成不可逆的变化<sup>[11]</sup>;辐照杀菌的原理基于射线对微生物的初级作用和次级作用,Co-60 等辐射源可以破坏微生物的 DNA 并使细胞内的酶、膜蛋白变性,从而导致细胞失活<sup>[12]</sup>。以上两种方式均可以直接作用于微生物上,因而杀菌效果更优;而低温等离子体杀菌技术主要利

用样品周围的介质放电产生光电子、离子和自由基等活性物质，从而对样品中的微生物产生抑制作用<sup>[13]</sup>。低温等离子体技术较为复杂，杀菌效果受到多种因素的影响，且在杀菌时样品包装内部需要留出足够的空间（约占包装的 1/3），因而限制了装样体积。此外，辐照处理虽然可以达到理想的杀菌效果，但由于该技术处理后的食品可能会存在辐射残留，这会对人体健康造成一定的损害，目前多数消费者对辐照杀菌食品在接受程度不高。因此可以判断在以上三种非热杀菌方式中，超高压同时具备了杀菌效果好且技术安全的特点。为了进一步探究 HHP 技术对百香果果浆贮藏期安全性的影响，以及三种非热杀菌技术对果浆样品理化性质的影响，对 HHP 处理后的样品进行 9 个月的微生物检测，并且测试了三种杀菌方式处理后样品的酶活性、色泽、pH 值等参数的变化。

### 2.2 贮藏期实验

HHP 处理后在-20℃下存放 9 个月期间果浆菌落总数和霉菌数量变化如下图所示。由图 1 可知，随着储存时间的延长，各处理组的自然菌数量逐渐增加，其中对照组（未经过 HHP 处理）和 200 MPa 压力处理组中的微生物数量增长较快，证明果浆中有不少细菌和微生物在 200 MPa 压力下还能存活；在-20℃条件下储存半年内，400 MPa 及以上压力处理的百香果果浆的菌落数仍低于国标中的安全值；储存到 9 个月时，400 MPa 处理的百香果果浆菌落总数略微超过了国家标准要求的 2 lg(CFU/g)，但 500~600 MPa 处理的果浆菌落数依旧低于 2 lg(CFU/g)，达到理想的杀菌效果。由此可见，超高压 400 MPa 及以上压力处理已经能将大部分不耐压得自然菌杀灭，对于不耐压的细菌也能有效抑制其生长，实现较好的杀菌效果。

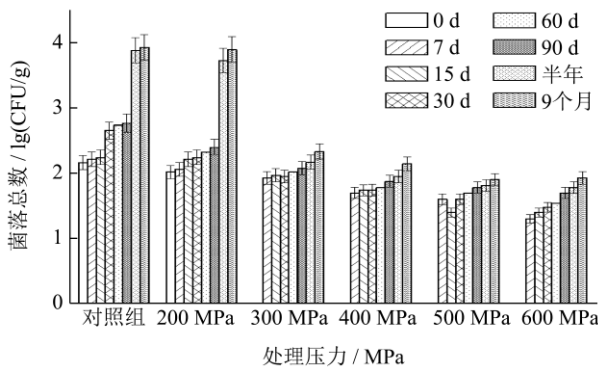


图 1 百香果储存 9 个月内菌落总数变化

Fig.1 Changes in the total number of colonies of passion fruit within 9 months of storage

贮藏期内百香果果浆的霉菌变化如图 2 所示：随着储存时间的延长，对照组和 200 MPa 处理组中检测

出的霉菌数量均呈现出上升趋势，300 MPa 处理组果浆则分别在 60 d、半年和 9 个月取样时检测出霉菌，且菌落数均低于国标规定的安全值（≤20 CFU/g），因此猜测 300 MPa 处理组测出的霉菌是由人为操作或培养时落入；400~600 MPa 压力处理后始终没有检测出霉菌，因此可以推测 400 MPa 以上超高压处理有效杀灭百香果果浆中的霉菌。其他学者的研究也有类似的结果：Feng 等<sup>[14]</sup>将草莓-苹果-柠檬复合果汁于 500 MPa 下处理 15 min 后在冷藏（4℃）中储存 12 d 以上，结果表明超高压处理能保证果汁在储存期内能满足商业无菌标准，且理化性质无显著差异。黄晓铃<sup>[15]</sup>在常温下用 600 MPa 的超高压处理 NFC 橙汁并保压 1 分钟后测得橙汁中自然菌数量降至检测限值，在 4℃下储藏 25 d 后仍未检测出微生物指标，表明经 600 MPa 超高压处理后 NFC 橙汁的贮藏期明显延长，储藏期内微生物安全性更高。

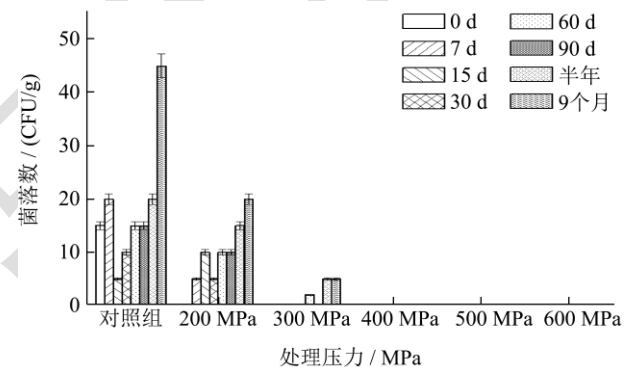


图 2 百香果储存 9 个月内霉菌和酵母变化

Fig.2 Changes in mold and yeast of passion fruit within 9 months of storage

### 2.3 酶活性检测

对照组果浆测得 POD 酶活性和 PPO 酶活性分别为 174.0 U/g min 和 3.16 U/g min。分别用三种非热杀菌方式处理后的百香果果浆中的 POD 酶及 PPO 酶残留活性如图 3~5 所示，可以看出，三种杀菌方式对百香果果浆中的 POD 酶活性均有一定的抑制作用。利用 HHP 技术处理的果浆，随着处理压力的升高，果浆中的 POD 酶活性呈现下降的趋势（图 3），其中用 200 MPa 和 300 MPa 压力处理的样品 POD 酶活性下降速度缓慢，处理 15 min 后果浆中的残余酶活性仍有 70.07% 和 69.17%；往后随着压力的上升，POD 酶活性下降较为明显，用 600 MPa 压力处理后 POD 酶的残留活性已低于 50%。辐照杀菌方式对果浆 POD 酶活性的影响 HHP 处理相似，随着辐照剂量的上升，果浆中 POD 酶的残留活性从 81.97% 下降至 53.40%（图 5）。CP 处理方面，不同处理时间和处理电压对



POD 酶残留活性的影响如图 4 所示, 由图可知, 在处理压力不变的情况下 (140 kV) POD 酶活性随着处理时间的延长而下降; 在处理时间恒定的情况下 (6 min), 处理电压越大 POD 酶的残留活性越小, 且在本实验中, 用 120 kV 电压处理样品 6 min 后果浆的 POD 酶残留活性最高, 因此猜测在一定范围电压强度对酶活性的影响较处理时间大。

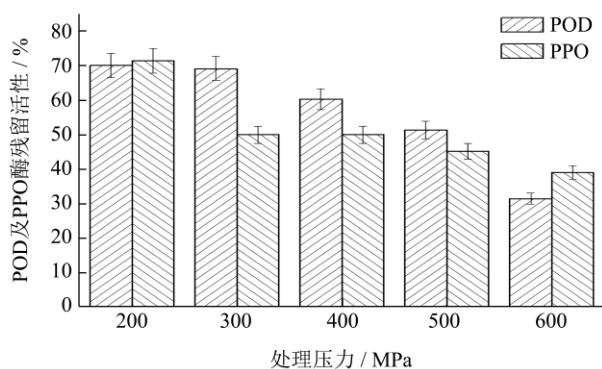


图 3 HHP 处理后百香果果浆 POD 及 PPO 酶残留活性

Fig.3 Residual activities of POD and PPO enzymes in passion fruit pulp after HHP treatment

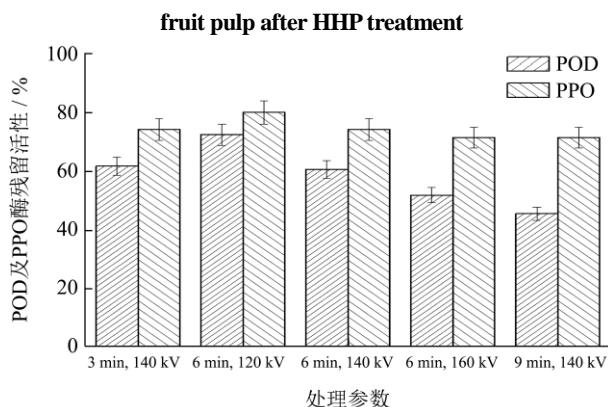


图 4 CP 处理后百香果果浆 POD 及 PPO 酶残留活性

Fig.4 Residual activities of POD and PPO enzymes in passion fruit pulp after CP treatment

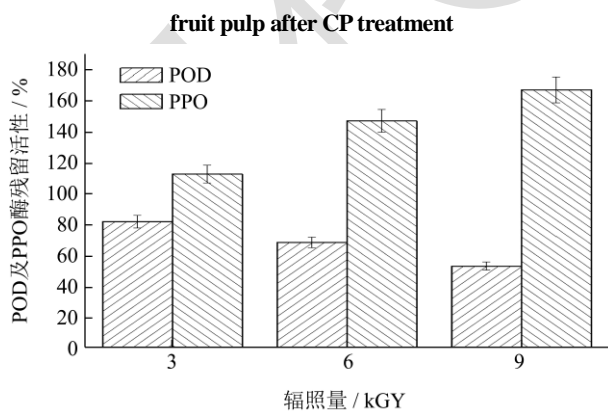


图 5 辐照处理后百香果果浆 POD 及 PPO 酶残留活性

Fig.5 Residual activities of POD and PPO enzymes in passion fruit pulp after irradiation treatment

PPO 酶也是促进水果褐变的关键酶之一, 在一定条件下, PPO 酶会将水果中的酚类物质催化为醌并聚

合成黑色素或褐色素<sup>[16]</sup>, 导致果肉颜色改变, 因此控制 PPO 酶的活性有助于延缓果浆褐变, 保持色泽。对于 PPO 酶的残余酶活性, HHP 处理和 CP 处理对 PPO 酶活性的影响与 POD 酶类似, 随着处理参数的改变, PPO 酶残留活性的变化呈现出与 POD 酶相同的趋势, 但从整体上来看, CP 处理对 PPO 酶的钝化作用没有 POD 酶显著。而经过辐照处理后果浆中 PPO 酶的活性呈现出与 POD 酶相反的趋势: 3 kGy 辐照量处理后, 果浆中的 PPO 酶被激活, 活性由对照组的 3.16 U/g min 上升至 3.54 U/g min, 且辐照剂量越大样品中 PPO 酶的活性越高, 处理组与对照组存在明显差异 ( $p < 0.05$ )。

## 2.4 颜色指标

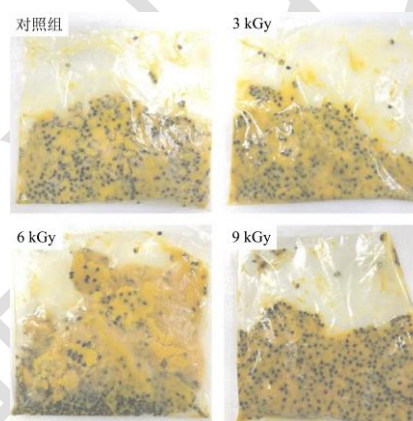


图 6 不同辐照剂量处理后百香果果浆色泽变化

Fig.6 Color change of passion fruit pulp after different irradiation doses

三种方式处理后百香果果浆的色泽如表 3 所示。

由于测试时百香果果浆中籽的数量会对色泽产生较大的影响, 且三种处理方式均不会对果籽的色泽、形态造成明显变化, 因此本次实验中先将果浆中的果籽滤去, 再用荧光分光密度计测量果浆的色度值。为了研究三种非热处理方式对百香果果浆色泽的影响, 处理后的样品均在 -20 °C 下存放了两周后进行测量。由表 3 可得, 超高压处理和低温等离子体处理后果浆的  $\Delta E$  值均小于 1。一般认为当  $\Delta E \geq 2$  时, 色泽差别可以人的视觉所分辨, 当  $\Delta E < 2$  时, 色泽变化肉眼不可分辨<sup>[17]</sup>, 因此超高压处理和低温等离子体处理不会对果浆的色泽产生明显影响, 不会使果浆发生肉眼可分辨的颜色变化, 这与于弘慧等<sup>[18]</sup>在探究 CP 杀菌工艺对梨汁品质的影响时得出的结果一致。辐照处理后百香果果浆的色差存在显著差异, 随着辐照剂量的增加果浆的总色差  $\Delta E$  值增大, 其变化趋势与辐照处理后 PPO 酶活性的变化趋势一致。由表 3 可以看出, 对照组果浆的  $L^*$  值为 2.03, 3 kGy 辐照处理后  $L^*$  值下降至 1.82,  $L^*$  值的下降代表果浆颜色变暗, 6 kGy 和 9 kGy 辐照

量处理后果浆的  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值进一步下降, 9 kGy 时  $b^*$  值从对照组的 1.84 降至 0.64, 以上数据均表明辐照处理会导致果浆的颜色加深, 从图 6 也可看出 9 kGy 辐照处理后百香果样品的色泽偏暗, 以上数据进一步佐证了辐照处理对果浆 PPO 酶的激活作用。

## 2.5 pH 值和可溶性固形物含量 (TSS)

果汁 pH 值的大小会直接影响果汁的滋味和口感, 由表 4 可知, 三种杀菌方式处理后百香果果浆的 pH 值与对照组相比, pH 值和无显著差异, 数值维持在 pH 值 3.13~3.16 范围内, 证明三种处理方式对果浆的 pH 值影响甚微。在可溶性固形物含量检测方面, 对照

组果浆的可溶性固形物含量为 15.2 °Brix, 而经过 200~600 MPa 超高压后, 样品的可溶性固形物含量均有略微上升, 数值分布在 15.5~17.0 °Brix 之间, 而 CP 和辐照两种杀菌方式处理后果浆中的 TSS 含量维持在 15.2 °Brix, 并未发生明显变化, 分析认为有可能是超高压会使果汁中一些大分子物质破裂蛋白质溶出, 从而导致了可溶性固形物含量的升高。相关文献也有类似的结果, 如邓红等<sup>[19]</sup>利用超高压技术处理猕猴桃 NFC 果汁, 结果发现处理后猕猴桃汁的 TSS 含量也出现了略微上升。但从总体上来看, 三种杀菌方式处理后百香果果浆的 pH 值及 TSS 值均在小范围内变化, 说明以上三种方式对果浆的 pH 值及 TSS 影响较小。

表 3 三种方式处理后百香果果浆的色差

Table 3 The color difference of passion fruit pulp after treatment in three treatments

处理方法	对照组	200 MPa	300 MPa	400 MPa	500 MPa	600 MPa	
HHP	$L^*$	2.03±0.15 <sup>a</sup>	1.93±0.12 <sup>a</sup>	1.82±0.12 <sup>b</sup>	2.02±0.11 <sup>c</sup>	2.65±0.45 <sup>d</sup>	2.97±0.12 <sup>e</sup>
	$a^*$	1.73±0.09 <sup>a</sup>	1.77±0.07 <sup>a</sup>	1.23±0.09 <sup>b</sup>	1.78±0.12 <sup>c</sup>	1.47±0.03 <sup>d</sup>	1.52±0.09 <sup>a</sup>
	$b^*$	1.84±0.22 <sup>a</sup>	1.51±0.14 <sup>b</sup>	1.62±0.29 <sup>c</sup>	1.51±0.34 <sup>d</sup>	1.52±0.33 <sup>e</sup>	1.44±0.20 <sup>f</sup>
	$\Delta E$	-	0.35	0.59	0.33	0.74	0.45
		对照组	3 min 140 kV	6 min 120 kV	6 min 140 kV	6 min 160 kV	9 min 140 kV
CP	$L^*$	2.03±0.15 <sup>a</sup>	2.04±0.10 <sup>a</sup>	2.01±0.09 <sup>a</sup>	2.09±0.15 <sup>a</sup>	2.09±0.11 <sup>a</sup>	2.12±0.17 <sup>b</sup>
	$a^*$	1.73±0.09 <sup>a</sup>	1.80±0.09 <sup>a</sup>	1.91±0.15 <sup>a</sup>	1.88±0.15 <sup>b</sup>	1.88±0.04 <sup>c</sup>	1.73±0.19 <sup>a</sup>
	$b^*$	1.84±0.22 <sup>a</sup>	1.88±0.18 <sup>a</sup>	1.95±0.11 <sup>a</sup>	2.06±0.15 <sup>b</sup>	2.06±0.20 <sup>c</sup>	2.08±0.28 <sup>d</sup>
	$\Delta E$	-	0.08	0.21	0.22	0.22	0.26
		对照组	3 kGy	6 kGy	9 kGy		
辐照	$L^*$	2.03±0.15 <sup>a</sup>	1.82±0.20 <sup>a</sup>	1.62±0.11 <sup>b</sup>	1.47±0.15 <sup>c</sup>		
	$a^*$	1.73±0.09 <sup>a</sup>	1.67±0.07 <sup>a</sup>	1.39±0.13 <sup>b</sup>	1.22±0.26 <sup>c</sup>		
	$b^*$	1.84±0.22 <sup>a</sup>	1.37±0.29 <sup>b</sup>	0.84±0.12 <sup>c</sup>	0.64±0.31 <sup>d</sup>		
	$\Delta E$	-	0.51	1.14	2.01		

注: 数据结果为均值±标准差 ( $n=10$ ); 同一行中具有不同上标者表示差异显著 ( $p<0.05$ )。

表 4 三种方式处理后百香果果浆的 pH 值和可溶性固形物含量

Table 4 pH value and TSS content of passion fruit pulp after three treatments

不同处理	参数	对照组	200 MPa	300 MPa	400 MPa	500 MPa	600 MPa
HHP	pH	3.15±0.00 <sup>a</sup>	3.13±0.01 <sup>b</sup>	3.15±0.00 <sup>a</sup>	3.16±0.01 <sup>a</sup>	3.14±0.01 <sup>a</sup>	3.15±0.01 <sup>a</sup>
	TSS	15.2±0.00 <sup>a</sup>	15.2±0.00 <sup>a</sup>	15.5±0.00 <sup>b</sup>	17.0±0.00 <sup>c</sup>	16.0±0.00 <sup>d</sup>	16.0±0.00 <sup>d</sup>
CP	参数		3 min 140 kV	6 min 120 kV	6 min 140 kV	6 min 160 kV	9 min 140 kV
	pH	3.15±0.00 <sup>a</sup>	3.14±0.01 <sup>a</sup>	3.15±0.01 <sup>a</sup>	3.16±0.01 <sup>a</sup>	3.15±0.01 <sup>a</sup>	3.16±0.01 <sup>a</sup>
	TSS	15.2±0.00 <sup>a</sup>	15.2±0.00 <sup>a</sup>	15.2±0.00 <sup>a</sup>	15.2±0.00 <sup>a</sup>	15.2±0.00 <sup>a</sup>	15.2±0.00 <sup>a</sup>
辐照	参数		3 kGy	6 kGy	9 kGy		
	pH	3.15±0.00 <sup>a</sup>	3.16±0.01 <sup>a</sup>	3.14±0.01 <sup>a</sup>	3.14±0.01 <sup>a</sup>		
	TSS	15.2±0.00 <sup>a</sup>	15.2±0.00 <sup>a</sup>	15.2±0.00 <sup>a</sup>	15.2±0.00 <sup>a</sup>		

注: 数据结果为均值±标准差 ( $n=5$ ); 同一行中具有不同上标者表示差异显著 ( $p<0.05$ )。

## 3 结论

本文研究 HHP、CP 和辐照处理对百香果果浆的

影响, 分析了处理前后果浆的微生物数量、残留酶活性、色泽、pH 值及 TSS 的变化。结果表明, 三种杀菌方式均能使百香果鲜榨果浆达到商业无菌的要求,

其中 HHP 和辐照处理的杀菌效果更好, 具体表现为 300 MPa 及以上压力处理(保压时间 15 min)和 3 kGy 及以上辐照量处理即可将百香果果浆中的菌落数降至小于 2 lg(CFU/g), 且利用 HHP 技术处理的果浆经过 9 个月的储存期实验后, 500 MPa 和 600 MPa 处理后果浆的微生物数量仍低于国标要求的安全值。在理化性质方面, 三种杀菌方式对百香果果浆 pH 和 TSS 的影响较小, 与对照组样品的差异不显著 ( $p>0.05$ )。不同杀菌方式均会引起果浆  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值的变化, 其中 CP 技术处理后果浆的总色差变化最小, HHP 处理后的色差值略大于 CP 技术, 但两者都不会对果浆的色泽造成肉眼可见的明显变化 ( $\Delta E<2$ ); 而辐照后的样品与对照组相比由于 PPO 酶活性有明显上升 ( $p<0.05$ ), 且在实验中随着辐照剂量的增加, PPO 酶活性从 3.16 U/g min 上升至 5.28 U/g min, 因此处理后的样品更容易褐变, 9 kGy 辐照量处理后的样品与对照组相比色差值  $\Delta E$  已大于 2, 说明果浆色泽发生肉眼可辨的改变。综合得, HHP 技术在杀菌和保持理化性质方面的整体表现较为优秀。其他学者在研究超高压蔬果汁的影响时也有类似的结论, 如 Qing 等<sup>[20]</sup>研究表明 400 MPa 超高压处理能有效杀灭西瓜汁中的微生物, 且可以保持西瓜汁在贮藏期(16 周)内的品质和风味。综上所述, HHP 技术在果蔬汁加工行业中具有广阔的应用前景。

## 参考文献

- [1] De Queiroz-Maria do Socoro Ramos, Janebro-Daniele Idalino, D da Cunha-Maria Auxiliadora Lins, et al. Effect of the yellow passion fruit peel flour (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa* Deg.) in insulin sensitivity in type 2 diabetes mellitus patients [J]. Nutrition Journal, 2012, 11(1): 89
- [2] 邝瑞彬, 孔凡利, 杨护. 百香果果汁营养特性分析与评价[J]. 食品工业科技, 2021, 42(9): 347-357
- [3] 张建梅, 刘娟, 高鹏, 等. 西番莲的利用价值及市场前景的探讨[J]. 河北果树, 2019, 2: 41-43
- [4] 谢国芳, 王瑞, 周笑犁, 等. 不同灭菌处理对蓝莓汁品质的影响[J]. 现代食品科技, 2014, 30(7): 205-210
- [5] 胡盼盼, 李军, 王莉, 等. 不同杀菌技术对鲜榨苹果汁贮藏品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(21): 196-199
- [6] 彭思嘉, 侯志强, 徐贞贞, 等. 超高压和高温短时杀菌对樱桃汁品质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(17): 71-78
- [7] 邓滢炎, 魏佳. 压力设备在食品行业中的应用[J]. 科技创新导报, 2015, 12(20): 234
- [8] CHEN Yaqi, CHENG Junhu, SUN Dawen. Chemical, physical and physiological quality attributes of fruit and vegetables induced by cold plasma treatment: Mechanisms and application advances [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 60(16): 2676-2690
- [9] Aliyu Idris Muhammad, Xiang Qisen, Liao Xinyu, et al. Understanding the impact of nonthermal plasma on food constituents and microstructure - A review [J]. Food and Bioprocess Technology, 2018, 11(3): 463-486
- [10] Ortuno Carmen, Trang Duong, Balaban Murat, et al. Combined high hydrostatic pressure and carbon dioxide inactivation of pectin methylesterase, polyphenol oxidase and peroxidase in feijoa puree [J]. Journal of Supercritical Fluids, 2013, 82(Complete): 56-62
- [11] Agregán R, Munekata P E, Zhang W, et al. High-pressure processing in inactivation of Salmonella spp. in food products [J]. Trends Food Science Technology, 2021, 107: 31-37
- [12] Han Yan, Zhenkun Cui, Tatiana Maooli, et al. Recent advances in non-thermal disinfection technologies in the food industry [J]. Food Science and Technology Research, 2021, 27(5): 675-710
- [13] 张关涛, 张东杰, 李娟, 等. 低温等离子体技术在食品杀菌中应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(12): 417-426
- [14] FENG Xiaoping, ZHOU Zhongyu, WANG Xiaoqiong, et al. Comparison of high hydrostatic pressure, ultrasound, and heat treatments on the quality of strawberry-apple-lemon juice blend [J]. Foods, 2020, 9(2): 218
- [15] 黄晓玲, 王永涛, 廖小军, 等. 超高压和高温短时杀菌对 NFC 橙汁品质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(6): 1-8, 14
- [16] 王馨雨, 杨绿竹, 王婷, 等. 植物多酚氧化酶的生理功能、分离纯化及酶促褐变控制的研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(9): 222-237
- [17] 王亮, 姚森, 童彦, 等. 百香果芒果复合果汁饮料储藏过程中色泽变化及其动力学研究[J]. 饮料工业, 2020, 23(1): 11-17
- [18] 于弘慧, 马挺军, 孙运金, 等. 低温等离子体杀菌工艺的优化及其对梨汁品质和抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(9): 212-216, 221
- [19] 邓红, 刘旻昊, 马婧, 等. UHP 与 HTST 杀菌处理的猕猴桃 NFC 果汁贮藏期品质变化[J]. 食品工业科技, 2020, 41(9): 269-277, 296
- [20] Liu Qing, Huang Guangxue, Ma Changlu, et al. Effect of ultra-high pressure and ultra-high temperature treatments on the quality of watermelon juice during storage [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(9): 1-11