

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2025.02.004

脉冲强光处理对蓝莓汁杀菌效果及品质的影响

张晓千^{1,2}, 孙晓琛², 苏巍², 崔晓臻², 范琳琳², 周剑忠^{1,2*}

(1. 上海海洋大学 食品学院, 上海 201306; 2. 江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏 南京 210014)

摘要: 为探究脉冲强光(intense pulsed light, IPL)处理对蓝莓汁杀菌效果和品质的影响,以微生物数量、酶活力、营养成分(总花色苷、维生素 C、总酚)含量为指标,分析不同脉冲强度和次数的 IPL 处理对蓝莓汁活菌数和营养品质的影响,并通过气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)法分析蓝莓汁挥发性风味物质的变化。结果表明:IPL 处理后,蓝莓汁中微生物数量降低到 20 CFU/mL 以下;过氧化物酶完全失活,超氧化物歧化酶活力保留率高于(88.68±0.18)%;蓝莓汁没有发生褐变;总酚含量得以完全保留。400 J 强度的 IPL 处理对蓝莓汁抗氧化能力影响不显著($P>0.05$),总花色苷、维生素 C 含量保留率分别高达(84.83±1.30)%、(95.00±2.59)%。GC-MS 分析表明,香气成分中的醛类、醇类、酯类含量有一定的损失,新增异蒲勒醇、柏木烯醇等挥发性风味物质。IPL 处理能够有效杀灭蓝莓汁中的微生物,同时保留较多的营养成分。

关键词: 脉冲强光; 杀菌; 蓝莓汁; 品质; 挥发性风味物质

Influence of Intense Pulsed Light Treatment on Sterilization Effect and Quality of Blueberry Juice

ZHANG Xiaoqian^{1,2}, SUN Xiaochen², SU Wei², CUI Xiaozhen², FAN Linlin², ZHOU Jianzhong^{1,2*}

(1. College of Food Sciences & Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Institute of Agri-products Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, Jiangsu, China)

Abstract: In order to investigate the influence of intense pulsed light (IPL) on the sterilization effect and quality of blueberry juice, microorganism count, enzyme activities, and nutrients (total anthocyanins, vitamin C, and total phenols) were used as indicators to analyze the influence of IPL treatments with different pulse intensities and times on the number of viable bacteria and nutritional quality of blueberry juice. The changes in volatile flavor compounds in blueberry juice were analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The results showed that the number of microorganisms in blueberry juice was reduced to less than 20 CFU/mL after IPL treatment; peroxidase was completely inactivated, and the retention rate of superoxide dismutase activity was higher than (88.68±0.18)%; there was no browning of blueberry juice; the total phenol content was completely retained. The antioxidant capacity of blueberry juice was not significantly affected by an IPL treatment with an intensity of 400 J ($P>0.05$), and the retention rates of total anthocyanins and vitamin C contents were as high as (84.83±1.30)% and (95.00±2.59)%, respectively. GC-MS analysis showed some loss of aldehydes, alcohols, and esters in the aroma composition, with the addition of new volatile aroma compounds such as isobutylol and cedrenol. The IPL treatment could effectively kill the microorganisms in blueberry juice, while retaining more nutrients.

Key words: intense pulsed light; sterilization; blueberry juice; quality; volatile flavor compounds

引文格式:

张晓千, 孙晓琛, 苏巍, 等. 脉冲强光处理对蓝莓汁杀菌效果及品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(2): 23-31.

ZHANG Xiaoqian, SUN Xiaochen, SU Wei, et al. Influence of Intense Pulsed Light Treatment on Sterilization Effect and Quality of Blueberry Juice[J]. Food Research and Development, 2025, 46(2): 23-31.

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(22)2026)

作者简介: 张晓千(1999—), 女(汉), 硕士研究生, 研究方向: 食品科学。

*通信作者: 周剑忠(1965—), 男(汉), 研究员, 博士, 研究方向: 食品生物技术。

蓝莓(越桔属)富含酚类化合物、花色苷、有机酸以及维生素等热敏性生物活性物质,具有抗氧化、抗炎、神经保护和改善视力等功效^[1-3],蕴含重要的经济价值。蓝莓果实成熟后表皮易出现机械损伤,不耐储存,为减少采后损失并且延长蓝莓的销售时间,蓝莓被加工成各种产品,其中蓝莓汁作为最常见的加工产品,它的口感极佳,风味独特。未经杀菌的蓝莓汁容易受到微生物的污染,在25℃下只有几小时的保质期。目前,蓝莓汁的杀菌一般采用热处理(巴氏杀菌)方式,然而热加工不仅会破坏蓝莓汁中热敏性生物活性物质,还会对蓝莓汁的颜色、风味产生不良影响。因此,寻找能够有效对蓝莓汁中微生物和酶灭活,又最大限度保留其营养成分的热杀菌替代方法,是该领域关注的重点。

脉冲强光(intense pulsed light, IPL)是一种较新的冷杀菌技术,它能够在相对较长的时间内(几分之一秒)积累能量,并在短时间内(百万分之一或千分之一秒)利用惰性气体闪光灯释放具有高强度、超短持续脉冲时间(100~400 ms)的广谱光(100~1 100 nm),包括远紫外光、近紫外光和可见光^[4]。IPL可以快速降低食品表面或液体中的微生物数量(营养细菌、细菌内生孢子、霉菌孢子、酵母)以及一些造成食品变质的酶类活力,具有低处理温度、高杀菌效率和无残留物等优势。工业上,IPL技术已经用于包装材料的消毒。IPL技术杀菌的有效性取决于参数的适当优化,例如施加的脉冲次数、脉冲强度、样品和灯之间的距离。此外,食品基质、微生物的污染水平也会影响IPL的杀菌效率。目前IPL应用于固体或与食品接触表面的杀菌研究较多,关于IPL对液体食品的杀菌及其感官品质的影响研究相对较少^[5]。仅有少数研究将IPL用于胡萝卜汁、苹果汁、石榴汁的杀菌^[6]。Bhagat等^[7]将IPL用于石榴汁的杀菌,结果发现IPL将石榴汁中的微生物数量减少了5个对数值,多酚氧化酶和过氧化物酶完全失活,营养物质保留较好(酚类、维生素C)。IPL技术有望应用于蓝莓汁的非热加工,但目前尚未有系统研究。

本研究将IPL应用于蓝莓汁杀菌,以蓝莓汁的微

生物数量、酶活力、色泽、pH值、总酸含量、可溶性固形物含量、总糖含量、总花色苷含量、维生素C含量、总酚含量、抗氧化能力为指标,分析不同脉冲强度和脉冲次数的IPL处理对蓝莓汁活菌数和营养品质的影响,同时结合气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)法分析处理前后蓝莓汁挥发性风味物质的变化,综合评价IPL应用于蓝莓汁杀菌的可行性,以期能为IPL技术在蓝莓汁等果汁杀菌中的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

南高丛蓝莓冻果:南京双吉农业发展有限公司;酚酞、2,6-二氯酚靛酚标准溶液、草酸、碳酸钠(均为分析纯):国药集团化学试剂有限公司;葡萄糖标准品(纯度99%)、没食子酸标准品(纯度98%)、水杨酸(分析纯):上海源叶生物科技有限公司;无水乙醇、福林酚(Folin-Ciocalteu)(均为分析纯):上海麦克林生化科技有限公司;平板计数琼脂、马铃薯葡萄糖琼脂、结晶紫中性红胆盐琼脂、孟加拉红琼脂(均为生物试剂):北京奥博星生物技术有限公司;硫酸亚铁、过氧化氢(均为分析纯):四川西陇科学股份有限公司;超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活力检测试剂盒:南京建成生物工程研究所;过氧化物酶(peroxidase, POD)活力检测试剂盒、多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)活力检测试剂盒:北京索莱宝科技有限公司;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH):北京克瑞斯生物技术有限公司。

1.2 仪器与设备

脉冲强光杀菌设备:江苏省农业科学院农产品加工研究所食品生物工程创新团队和南京安迪威电气工程有限公司联合研制。该系统由脉冲电源和装有氙气闪光灯的腔体组成(见图1)。该设备的输入电压、脉冲强度、频率和脉冲持续时间分别为0~3 650 V、0~500 J、0.3 Hz和200 μ s。

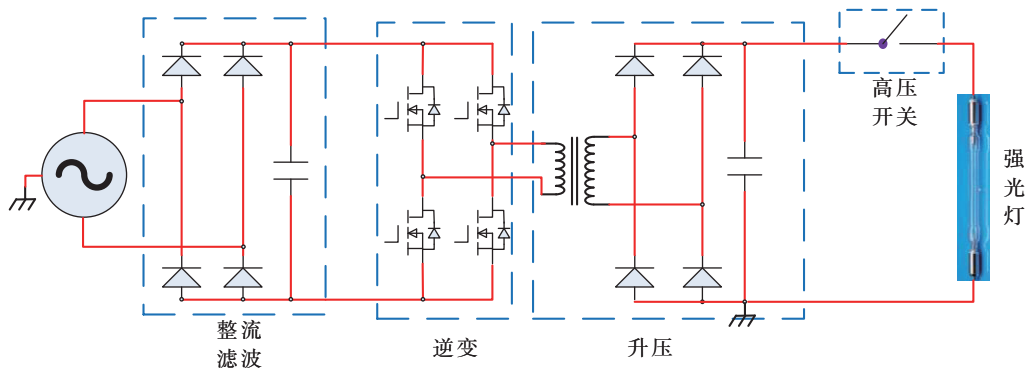


图1 IPL原理示意图

Fig.1 IPL principle

高压灭菌锅(SX-500):日本 TOMY 公司;离心机(3K15):西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司;生化培养箱(LRH-150):上海一恒科学仪器有限公司;双人单面净化工作台(SW-CJ-1C):苏州净化设备有限公司;榨汁机(XY-8608):广东德玛仕智能厨房设备有限公司;手持阿贝折光仪(LH-T32):浙江陆恒环境科技有限公司;台式分光测色仪(24V-3A):深圳市三恩时科技有限公司;酶标仪(E-poch):美国 Bio-Tek 公司;pH 计(FE-20):梅特勒-托利多(上海)有限公司;气相色谱-质谱联用仪(TSQ8000EVO):美国 Thermo Fisher 公司。

1.3 方法

1.3.1 蓝莓汁的制备

将蓝莓冻果常温解冻、清洗,于榨汁机中破碎搅拌 15 s,将得到的蓝莓糜浆以 4 500 r/min 的速度离心 15 min,取上清液经 4 层纱布过滤,滤液即为蓝莓果汁样品。

1.3.2 蓝莓汁的 IPL 处理

将 5 mL 蓝莓汁样品均匀倾注入培养皿(直径 90 mm)中,开盖进行 IPL 处理,蓝莓汁样品厚度为 2 mm,样品与灯之间的距离为 2 cm。处理结束后,将所有蓝莓汁储存在(4±1)℃以备进一步分析,未经任何处理的蓝莓汁样品为对照组。

不同的脉冲强度和脉冲次数设置如表 1 所示。

表 1 不同脉冲处理条件

Table 1 Different pulse treatment conditions

样品编号	脉冲强度和脉冲次数	样品编号	脉冲强度和脉冲次数
UT	未处理	PL5	400 J、60 次
PL1	300 J、20 次	PL6	400 J、100 次
PL2	300 J、60 次	PL7	500 J、20 次
PL3	300 J、100 次	PL8	500 J、60 次
PL4	400 J、20 次	PL9	500 J、100 次

1.3.3 微生物分析

根据 GB 4789.2—2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》、GB 4789.3—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 大肠菌群计数》、GB 4789.15—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 霉菌和酵母计数》中的相关方法对处理前后蓝莓汁中微生物进行计数,结果以残存活菌数(CFU/mL)表示。

1.3.4 酶活力测定

蓝莓汁中 SOD、POD、PPO 活力分别按照检测试剂盒说明书的步骤进行测定。

1.3.5 色泽分析

使用台式分光测色仪测定蓝莓汁样品的色泽。将 15 mL 样品移入比色皿中,测定 L^* (亮/暗)值、 a^* (红/绿)值、 b^* (黄/蓝)值。总色差(ΔE)、褐变指数(brown-

ing index, BI)由以下公式计算^[8]。

$$\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_0^*)^2 + (a_1^* - a_0^*)^2 + (b_1^* - b_0^*)^2} \quad (1)$$

$$X = \frac{a^* + 1.75L^*}{5.645L^* + a^* - 3.012b^*} \quad (2)$$

$$B = \frac{100(X - 0.31)}{0.172} \quad (3)$$

式中: L_1^* 、 L_0^* 分别为经过 IPL 处理和未经 IPL 处理的蓝莓汁的 L^* 值; a_1^* 、 a_0^* 分别为经过 IPL 处理和未经 IPL 处理的蓝莓汁的 a^* 值; b_1^* 、 b_0^* 分别为经过 IPL 处理和未经 IPL 处理的蓝莓汁的 b^* 值; X 为中间值; B 为蓝莓汁的褐变指数。

1.3.6 pH 值和总酸含量的测定

蓝莓汁的 pH 值在室温下用 pH 计测定。蓝莓汁中总酸含量的测定参考 GB 12456—2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》。

1.3.7 可溶性固形物和总糖含量的测定

采用手持阿贝折光仪测定蓝莓汁样品可溶性固形物含量。采用苯酚-硫酸法^[9]测定蓝莓汁的总糖含量,根据葡萄糖标准曲线回归方程($Y=0.0047X+0.0664$, $R^2=0.998$)计算蓝莓汁中总糖含量,结果表示为每升样品中葡萄糖的质量(g)。

1.3.8 维生素 C 含量测定

参照 GB 5009.86—2016《食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定》中 2,6-二氯酚酚滴定法测定蓝莓汁中维生素 C 含量。

1.3.9 总花色苷含量测定

参照 Di Stefano 等^[10]的方法测定总花色苷含量。分别移取一定量的无水乙醇、水和盐酸,按照体积比 69:30:1 混匀制成稀释液。用稀释液对蓝莓汁样品进行 10 倍稀释后在 540 nm 波长处测定溶液吸光度(A_{540})。总花色苷含量(W , mg/L)以蓝莓渣提取液中含有的锦葵色素-3-葡萄糖苷当量计,计算公式如下。

$$W = A_{540} \times 16.7 \times d \quad (4)$$

式中:16.7 为摩尔消光系数; d 为样品的稀释倍数。

1.3.10 总酚含量测定

总酚含量采用福林酚法^[11]测定。0.2 mL 蓝莓汁中加入 0.5 mL 福林酚试剂,再加入 2.3 mL 去离子水,混匀;静置 1 min 后,加入 2 mL 7.5% 碳酸钠溶液,混匀。用锡箔纸包裹后于室温下暗反应 2 h,反应结束后,在 760 nm 处测定溶液吸光度,根据没食子酸标准曲线回归方程($Y=0.0028X+0.0684$, $R^2=0.998$)计算蓝莓汁中总酚含量,结果表示为每升样品中没食子酸的质量(mg)。

1.3.11 DPPH 自由基清除率测定

DPPH 自由基清除率根据 De Souza 等^[12]的方法检测。将 10 mg DPPH 溶于 250 mL 无水乙醇中,制成最终浓度为 0.1 mmol/L 的 DPPH 溶液。将 0.5 mL 样品

与4 mL DPPH溶液混合,避光放置30 min。在517 nm处测定混合物的吸光度。DPPH自由基清除率($M, \%$)的计算公式如下。

$$M = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100 \quad (5)$$

式中: A_1 为0.5 mL样品溶液与4 mL DPPH溶液的吸光度; A_2 为0.5 mL样品溶液与4 mL无水乙醇的吸光度; A_0 为0.5 mL去离子水与4 mL DPPH的吸光度。

1.3.12 羟基自由基($\cdot\text{OH}$)清除率测定

采用Hou等^[13]的方法测定羟基自由基清除能力。将蓝莓汁样品(1 mL)与10 mmol/L硫酸亚铁溶液(1 mL)、10 mmol/L水杨酸溶液(溶于无水乙醇,1 mL)、6 mmol/L过氧化氢溶液(1 mL)反应,然后在37 °C下混合1 h,在510 nm波长处测定混合物的吸光度。羟基自由基清除率($N, \%$)的计算公式如下。

$$N = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100 \quad (6)$$

式中: A_1 为样品的吸光度; A_2 为反应液的吸光度,其中1 mL过氧化氢溶液由1 mL去离子水代替; A_0 为1 mL去离子水的吸光度。

1.3.13 GC-MS测定蓝莓汁挥发性有机化合物

通过GC-MS对蓝莓汁中挥发性有机化合物进行定性、定量分析。将经过前处理的蓝莓汁样品插入气相色谱-质谱联用仪进样口,色谱柱采用TG-5MS弹性石英毛细管柱;载气为高纯氦气;载气流速设置为1.2 mL/min,不分流进样;进样口温度为250 °C;程序升温:初始温度40 °C保持2 min,然后以6 °C/min升到280 °C,保持4 min。

质谱条件:离子源为电子轰击电离源,传输线温度280 °C;离子源温度300 °C;电子能量70 eV;扫描范围(m/z)33~500 amu,采用全扫描采集模式。得到质谱图进行定性分析,利用美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)谱图库工作站数据处理系统按峰面积归一化法进行定量分析,根据某一物质的峰面积与总峰面积的比值计算出各化学成分在蓝莓汁挥发性成分中相对含量^[14]。

1.4 数据处理

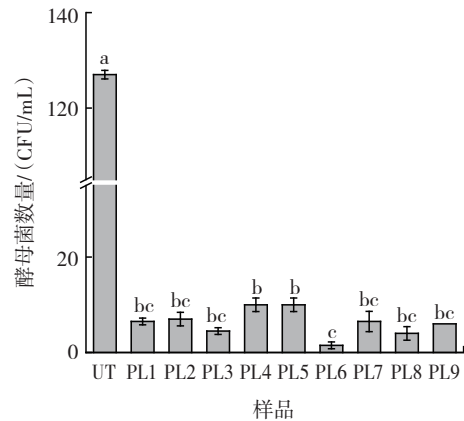
每组蓝莓汁样品平行测定3次,采用SPSS 26.0软件分析试验数据,结果以平均值±标准差表示, $P < 0.05$ 表示有显著性差异;采用Origin 2022软件作图。

2 结果与分析

2.1 IPL处理对蓝莓汁的杀菌效果

图2为不同脉冲强度和不同脉冲次数的IPL处理下蓝莓汁中微生物的杀菌效果。

由图2可知,新鲜蓝莓汁中需氧嗜温菌、霉菌以及大



不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图2 IPL处理对蓝莓汁中酵母菌的杀菌效果

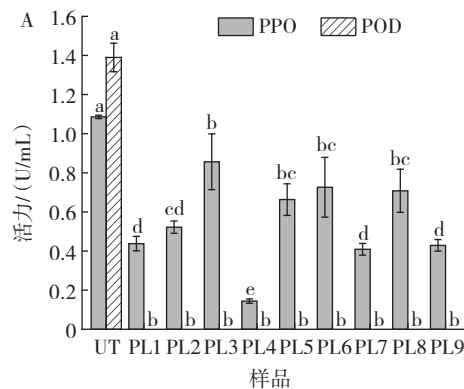
Fig.2 Sterilization effect of IPL treatment on yeast in blueberry juice

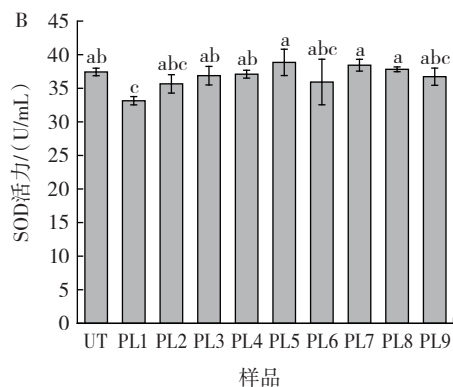
肠菌群均未检出,酵母菌数量为(127.00±0.90) CFU/mL。蓝莓汁属于酸性食品(pH 值 ≤ 4.5),大多数微生物在该环境中的生长受到抑制,而酵母菌具有耐酸性,主要存在于高酸、高糖的食品中,能够利用果汁进行发酵,产生气体和酒精味,严重影响蓝莓汁的品质^[15]。从图2中可以看出,所有IPL处理组的酵母菌数量降低到20 CFU/mL以下,符合GB 7101—2022《食品安全国家标准 饮料》中规定的微生物限量标准。IPL处理导致蓝莓汁中酵母菌的死亡,这可能是由于微生物体内出现DNA损伤、细胞结构变形(液泡膨胀、细胞膜破裂)以及胞内蛋白质的泄露^[16]。

2.2 IPL处理对蓝莓汁中酶的灭活水平

IPL处理对蓝莓汁中酶活力的影响见图3。

果汁中的PPO和POD主要位于植物的细胞器中,当水果经过压榨或切割等加工步骤时,细胞器和液泡会破裂,酶和底物化合物从中释放并开始发生酶促反应^[17],此过程会降解生物活性化合物、产生褐变并诱导不良风味形成^[18]。因此除了微生物的灭活外,导致果汁变质的酶的灭活也是至关重要的。从图3A中可以看出,未处理组蓝莓汁PPO和POD活力分别为(1.09±0.01)、(1.39±0.07) U/mL。经过IPL处理之后,POD完全失去活性,PPO活力存在不同程度的降低,





A. PPO 和 POD 活力; B. SOD 活力。对于同一指标,不同小写字母表示不同处理组之间差异显著($P < 0.05$)。

图3 IPL处理对蓝莓汁中PPO、POD和SOD活力的影响

Fig.3 Influence of IPL treatment on activity of PPO, POD, and SOD in blueberry juice

为(0.14±0.01)~(0.86±0.14)U/mL,其中PL4处理组的PPO活力最低,降低了(87.16±1.15)%。IPL处理会使与酶活力密切相关的必需基团氨基酸残基发生光敏氧化,同时IPL产生的短时高能机械冲击作用使酶的蛋白质结构改变,从而失去活力^[19]。最近研究发现IPL处理导致PPO中β-折叠和随机卷曲增加,α-螺旋和β-转角减少,这些变化表明IPL处理破坏了PPO的二级和三级结构,因此PPO被显著灭活^[20]。此外,Chakraborty等^[21]对葡萄汁进行IPL处理时发现,相较于PPO,POD对IPL较敏感,本试验所测得的蓝莓汁中酶的敏感性与其相似。

SOD不同于PPO和POD,它在清除自由基方面具有重要作用^[22]。由图3B可知,新鲜蓝莓汁中SOD活力为(37.43±0.56)U/mL,经过IPL处理之后,PL1组SOD活力降低至(33.14±0.62)U/mL,其余处理组SOD活力没有显著变化($P > 0.05$),蓝莓汁的SOD活力保留率在(88.68±0.18)%以上。综上可知IPL处理能够在显著降低蓝莓汁中PPO、POD活力的同时保留较高的SOD活力。其中PL4处理组SOD活力保留率最高[(99.12±1.27)%],POD完全失活,PPO活力最低[(0.14±0.01)U/mL]。

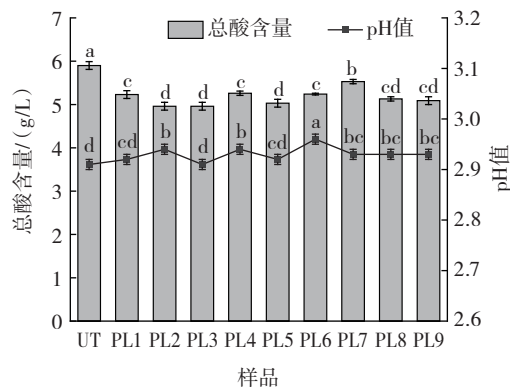
2.3 IPL处理对蓝莓汁pH值、总酸含量的影响

IPL处理后,蓝莓汁的pH值和总酸含量的变化情况见图4。

从图4中可以看出,蓝莓汁的初始pH值为(2.91±0.01),初始总酸含量为(5.90±0.09)g/L。IPL处理后,蓝莓汁的pH值保持在(2.91±0.01)~(2.96±0.01),变化较小。IPL处理后总酸含量略有降低,保留率在86%以上。

2.4 IPL处理对蓝莓汁中可溶性固形物和总糖含量的影响

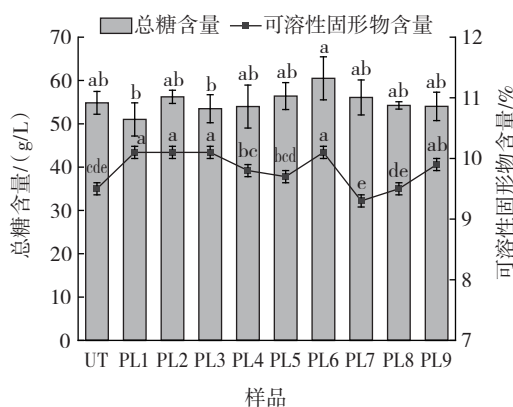
IPL处理后蓝莓汁中可溶性固形物和总糖含量的变化见图5。



对于同一指标,不同小写字母表示不同处理组间差异显著($P < 0.05$)。

图4 IPL处理对蓝莓汁pH值和总酸含量的影响

Fig.4 Influence of IPL treatment on pH and total acid content of blueberry juice



对于同一指标,不同小写字母表示不同处理组间差异显著($P < 0.05$)。

图5 IPL处理对蓝莓汁中总糖含量和可溶性固形物含量的影响

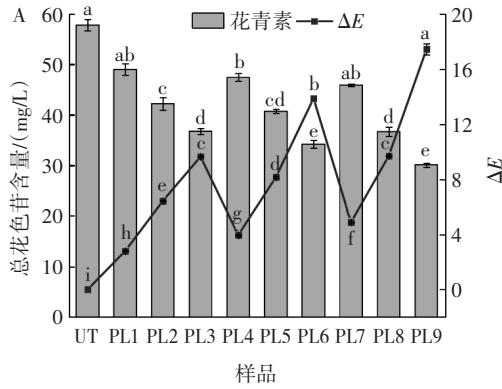
Fig.5 Influence of IPL treatment on total sugar content and soluble solids in blueberry juice

蓝莓汁中可溶性固形物和总糖的含量影响着蓝莓汁的口感和风味,可以反映果汁质量^[23]。从图5中可以看出,IPL处理后蓝莓汁总糖含量整体上保持稳定。PL1、PL2、PL3、PL6以及PL9处理组蓝莓汁的可溶性固形物含量显著升高,PL4、PL5、PL7、PL8处理组可溶性固形物含量与新鲜蓝莓汁相比没有显著性差异($P > 0.05$)。结果表明IPL处理不会造成蓝莓汁可溶性固形物以及总糖含量的损失。

2.5 IPL处理对蓝莓汁中总花色苷含量和颜色的影响

IPL处理对蓝莓汁中总花色苷含量及色差和蓝莓汁外观的影响见图6。

花色苷是存在于水果和蔬菜中的天然色素,其稳定性容易受到温度、pH值及光照等多种因素的影响^[24],而颜色是蓝莓汁的重要感官指标,直接影响消费者满意度。由图6A可知,初始蓝莓汁的总花色苷含量为(57.80±1.12)mg/L,随着脉冲次数和脉冲强度的增大,蓝莓汁中总花色苷含量逐渐下降,而ΔE呈现逐渐上升的趋势。PL1处理组总花色苷含量保留率最高,



A. 总花色苷含量及色差; B. 外观。对于同一指标,不同小写字母表示不同处理组之间差异显著($P < 0.05$)。

图6 IPL处理对蓝莓汁中总花色苷含量及色差和蓝莓汁外观的影响
Fig.6 Influence of IPL treatment on total anthocyanins content, color variation, and appearance of blueberry juice

为(84.83±1.30)%,其次是PL4处理组[(82.06±1.55)%],蓝莓汁中丰富的酚类物质能够通过共聚合反应稳定花色苷,防止花色苷在IPL处理过程中降解^[25],然而较高脉冲强度和较多脉冲次数的IPL处理产生的光化学作用可能会导致花色苷降解,从而使蓝莓汁颜色改变^[26]。从图6B中可以看到,IPL处理组之间蓝莓汁的颜色变化不明显,可能是由于蓝莓汁本身总花色苷含量很高^[27],即使总花色苷含量有所降低,肉眼可辨识度也不高。综上可知在有效杀灭微生物和抑制酶活力的前提下,使用低强度的IPL处理更有利于蓝莓汁总花色苷的保留。

不同处理组蓝莓汁的颜色参数见表2。

表2 不同IPL处理组蓝莓汁的色泽参数

Table 2 Color parameters of blueberry juice in different IPL treatment groups

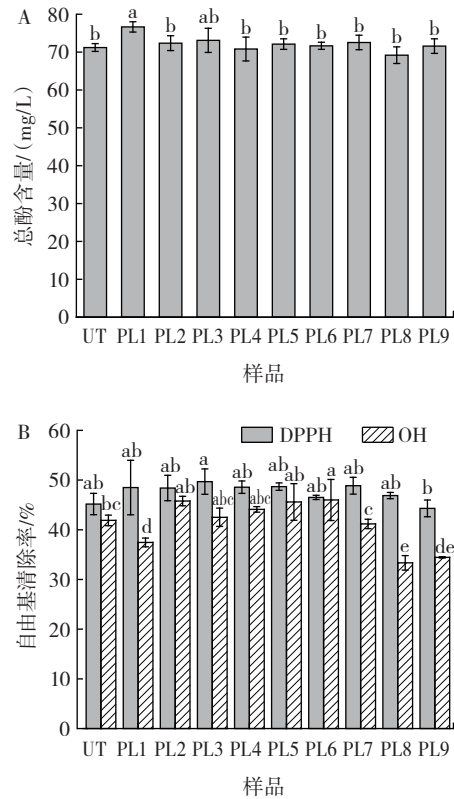
样品编号	L^* 值	a^* 值	b^* 值	BI值
UT	41.65±0.02 ^j	60.38±0.03 ^A	33.56±0.04 ^A	218.33±0.11 ^A
PL1	44.32±0.01 ⁱ	59.82±0.02 ^B	32.92±0.04 ^B	198.56±0.13 ^B
PL2	46.97±0.01 ^F	57.81±0.01 ^E	31.02±0.02 ^E	174.44±0.11 ^E
PL3	49.13±0.01 ^D	55.43±0.01 ^C	30.00±0.04 ^C	158.89±0.14 ^C
PL4	45.23±0.02 ^H	59.35±0.04 ^C	32.28±0.10 ^C	190.09±0.66 ^C
PL5	48.17±0.03 ^E	56.69±0.06 ^F	30.35±0.09 ^F	165.35±0.54 ^F
PL6	51.55±0.01 ^B	52.02±0.01 ^H	28.61±0.02 ^H	141.74±0.08 ^H
PL7	45.79±0.01 ^C	58.84±0.02 ^D	31.49±0.03 ^D	182.92±0.13 ^D
PL8	49.33±0.01 ^C	55.51±0.03 ^C	30.23±0.03 ^F	159.23±0.25 ^C
PL9	53.84±0.16 ^A	48.95±0.40 ^I	28.62±0.29 ^H	131.89±1.87 ^I

注:同列不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

由表2可知,中 L^* 值随着脉冲次数及脉冲强度的增加而增大,说明IPL处理使蓝莓汁变得更亮。 a^* 值变化趋势与 L^* 值相反,它随着脉冲强度及脉冲次数的增加而降低,表明蓝莓汁红色减少, b^* 值也逐渐降低。所有IPL处理组蓝莓汁的BI值降低,可能由于IPL处理很好地控制了蓝莓汁中PPO、POD的活力,因此没有发生酶促褐变。

2.6 IPL处理对蓝莓汁中总酚含量和抗氧化能力的影响

IPL处理对蓝莓汁总酚含量和抗氧化能力的影响见图7。



A. 总酚含量; B. 抗氧化能力。对于同一指标,不同小写字母表示不同处理组间差异显著($P < 0.05$)。

图7 IPL处理对蓝莓汁总酚含量和抗氧化能力的影响

Fig.7 Influence of IPL treatment on total phenol content and antioxidant capacity of blueberry juice

酚类是植物次生代谢的天然物质,具有抗氧化能力。从图7A中看到,初始蓝莓汁的总酚含量为(71.20±1.03)mg/L,IPL处理组蓝莓汁总酚含量为(69.18±2.20)~(76.65±1.35)mg/L,除了PL1处理组将总酚含量提高了(7.65±0.08)%之外,其他处理组总酚含量与初始蓝莓汁总酚含量之间没有显著性差异($P > 0.05$)。Zhan等^[28]研究发现果汁中较高的酚类化合物含量可归因于PPO和POD的有效失活。

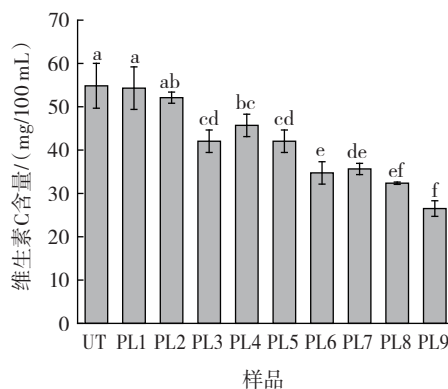
从图7B看出,IPL处理对蓝莓汁DPPH自由基清除率影响不显著($P > 0.05$),PL1、PL8、PL9处理组的羟基自由基清除率降低,其他处理组的羟基自由基清除

率较稳定,说明低脉冲强度、低脉冲次数的组合(300 J、20次)和高脉冲强度、高脉冲次数的组合(500 J、60次;500 J、100次)会显著降低($P<0.05$)蓝莓汁的羟基自由基清除率,而400 J脉冲强度处理的蓝莓汁抗氧化能力维持较好。同样的,Vollmer等^[29]发现施加47个脉冲次数时,IPL对水果的抗氧化能力没有显著影响,但是将脉冲次数增加到94次和187次时可显著降低水果抗氧化能力。

2.7 IPL处理对蓝莓汁维生素C含量的影响

IPL处理对蓝莓汁维生素C含量的影响见图8。

维生素C也称为抗坏血酸,主要存在于果蔬中,是人体必需的营养物质,除抗氧化能力外,它还具有促进铁吸收、增强免疫力的功效^[30]。从图8可以看出,初始蓝莓汁中维生素C含量为 $(54.84\pm 5.17)\text{mg}/100\text{mL}$,低脉冲强度、低脉冲次数处理(PL1、PL2)对蓝莓汁维生素C没有显著性影响($P>0.05$),保留率高达 $(95.00\pm 2.59)\%$ 。然而高强度(500 J)IPL处理会使维生素C快速降解,例如PL9处理组蓝莓汁维生素C保留率仅为 $(48.34\pm 1.12)\%$ 。蓝莓汁中维生素C的降解可能是高强



不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图8 IPL处理对蓝莓汁维生素C含量的影响

Fig.8 Influence of IPL treatment on vitamin C content of blueberry juice

度IPL产生的光热效应与空气中氧气的结合导致的^[29],在醋栗汁中也发现了维生素C对热的高敏感趋势^[31]。

2.8 IPL处理对蓝莓汁挥发性风味物质的影响

IPL处理前后蓝莓汁中挥发性风味物质的变化见表3。

表3 IPL处理前后蓝莓汁中挥发性风味物质的变化

Table 3 Volatile flavor compounds of blueberry juice before and after IPL treatment

化合物类型	化合物名称	分子式	相对含量%	
			对照组	处理组
醇类	反式-2-甲基环戊醇	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$	-	0.16
	正辛醇*	$\text{C}_8\text{H}_{18}\text{O}$	0.52	0.43
	芳樟醇*	$\text{C}_{10}\text{H}_{18}\text{O}$	35.73	33.67
	4-萜烯醇	$\text{C}_{10}\text{H}_{18}\text{O}$	7.70	-
	α -松油醇	$\text{C}_{10}\text{H}_{18}\text{O}$	3.36	-
	橙花醇*	$\text{C}_{10}\text{H}_{18}\text{O}$	1.57	0.82
	异蒲勒醇	$\text{C}_{10}\text{H}_{18}\text{O}$	-	0.02
	香叶醇*	$\text{C}_{10}\text{H}_{18}\text{O}$	12.51	5.85
	正辛醇*	$\text{C}_8\text{H}_{18}\text{O}$	0.52	0.43
	芳樟醇*	$\text{C}_{10}\text{H}_{18}\text{O}$	35.73	33.67
	顺,反-5,9-环十二烷二烯-顺-1,2-二醇	$\text{C}_{12}\text{H}_{20}\text{O}_2$	0.22	-
	雪松醇	$\text{C}_{15}\text{H}_{26}\text{O}$	0.24	-
	柏木烯醇	$\text{C}_{15}\text{H}_{24}\text{O}$	-	0.07
	(-)-异长叶醇	$\text{C}_{15}\text{H}_{26}\text{O}$	-	0.02
	3,7,11-三甲基十二烷醇	$\text{C}_{15}\text{H}_{32}\text{O}$	0.08	-
	醛类	反式-2-癸烯醛	$\text{C}_{10}\text{H}_{18}\text{O}$	0.14
(Z)-7-十六碳烯醛		$\text{C}_{16}\text{H}_{30}\text{O}$	0.20	-
视黄醛		$\text{C}_{20}\text{H}_{28}\text{O}$	0.05	-
酮类	2-甲基-5-(1-甲基乙烯基)环己酮*	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{O}$	1.49	1.83
	大马士酮*	$\text{C}_{13}\text{H}_{18}\text{O}$	0.29	0.48
酸类	顺式-8,11,14-二十碳三烯酸	$\text{C}_{20}\text{H}_{34}\text{O}_2$	0.03	-
	二十碳五烯酸	$\text{C}_{20}\text{H}_{30}\text{O}_2$	-	0.02
	顺式-5,8,11,14,17-二十碳五烯酸	$\text{C}_{20}\text{H}_{30}\text{O}_2$	0.07	-
	2-氨基-4-氧代-3,4-二氢蝶啶-6-羧酸	$\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_5\text{O}_3$	-	0.02
	2-溴十四酸*	$\text{C}_{14}\text{H}_{27}\text{BrO}_2$	0.02	0.04
	3-羟基月桂酸	$\text{C}_{12}\text{H}_{24}\text{O}_3$	0.02	-

续表3 IPL处理前后蓝莓汁中挥发性风味物质的变化

Continue table 3 Volatile flavor compounds of blueberry juice before and after IPL treatment

化合物类型	化合物名称	分子式	相对含量%	
			对照组	处理组
酯类	(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醇 3-甲基丁酸酯	C ₁₅ H ₂₆ O ₂	0.42	-
	花生四烯酸甲酯*	C ₂₁ H ₃₄ O ₂	0.07	0.14
	9-十八烯-12-炔酸甲酯	C ₁₉ H ₃₂ O ₂	-	0.05
烷烃类	(Z)-3,7-二甲基-1,3,6-十八烷三烯*	C ₁₀ H ₁₆	0.15	0.36
	环氧石竹烯*	C ₁₅ H ₂₄ O	0.41	0.16
杂氧化合物	2,4-二甲基苯并[h]喹啉	C ₁₅ H ₁₃ N	-	0.02
	2-乙炔基-2,6,6-三甲基四氢-2H-吡喃	C ₁₀ H ₁₈ O	-	0.28

注:-表示该种化合物未检出; *表示该种化合物是新鲜蓝莓汁和 IPL 处理后蓝莓汁所共有的。

香气是蓝莓汁的重要特征,从表3中可以看出,通过 GC-MS 在蓝莓汁中共鉴定出 33 种挥发性化合物,它们由醇类、醛类、酸类、酮类、酯类、烷烃类和杂氧化合物构成。其中醇类种类较多,例如芳樟醇、橙花醇等,赋予了蓝莓汁较多的果香和花香。IPL 处理后蓝莓汁挥发性成分中醇类物质减少了 5 种,含量也有所降低,橙花醇、香叶醇相对含量分别降低了 0.52、0.47 倍。同时新增了反式-2-甲基环戊醇、异蒲勒醇、柏木烯醇、(-)-异长叶醇 4 种化合物,赋予了蓝莓汁薄荷、黄瓜、柑橘类气味。说明 IPL 处理对香气类型及其含量有一定影响。新化合物的产生可能是由于 IPL 处理导致果汁中细胞破裂,引起细胞内成分的释放^[32]。此外,蓝莓汁酮类含量增加,例如 2-甲基-5-(1-甲基乙炔基)环己酮、大马士酮的相对含量分别增加了 1.23、1.66 倍。醛类化合物经过 IPL 处理后未检测到,这可能是由于醛的不稳定性,导致它们在果汁基质中容易被 IPL 还原成醇类或氧化成酸类^[33]。IPL 处理后,蓝莓汁挥发性成分中的顺式-8,11,14-二十碳三烯酸、顺式-5,8,11,14,17-二十碳五烯酸、3-羟基月桂酸未检测到,2-溴十四酸相对含量增加了 2 倍,同时新增了二十碳五烯酸等化合物。以上结果表明 IPL 处理后蓝莓汁中的醛类、醇类、酯类有所减少,有新的化合物产生,赋予蓝莓汁更丰富的香气,没有产生不良挥发性化合物。

3 结论

IPL 处理将蓝莓汁中微生物数量降低至 GB 7101—2022《食品安全国家标准 饮料》规定的微生物限量以下,导致蓝莓汁变质的酶类(POD、PPO)活力降低,SOD 活力保留较好,同时蓝莓汁没有发生褐变。营养物质方面,IPL 处理不会减少蓝莓汁总酸、总可溶性固形物、总糖含量。400 J 以下强度的 IPL 处理组蓝莓汁总花色苷、维生素 C 含量保留率较高,总酚含量得以完全保留,抗氧化能力维持较好。此外,结合 GC-MS 对蓝莓汁中挥发性风味物质的分析,400 J、20 次 IPL 处理后蓝莓汁中的醛类、醇类、酯类的含量

和种类有所减少,新增了反式-2-甲基环戊醇、异蒲勒醇、柏木烯醇、(-)-异长叶醇等化合物,赋予了蓝莓汁木香、薄荷、黄瓜、柑橘类香气。IPL 技术能够在对蓝莓汁有效杀菌的同时保留较多的营养物质,有潜力应用于蓝莓汁的杀菌。本文结果为 IPL 技术在蓝莓汁中的应用提供参考,后续应考虑经 IPL 处理的蓝莓汁在不同储存条件下的保质期。

参考文献:

- [1] KUMAR V, BANSAL V, MADHAVAN A, et al. Active pharmaceutical ingredient (API) chemicals: A critical review of current biotechnological approaches[J]. *Bioengineered*, 2022, 13(2): 4309-4327.
- [2] MARTÍN-GÓMEZ J, GARCÍA-MARTÍNEZ T, VARO M Á, et al. Phenolic compounds, antioxidant activity and color in the fermentation of mixed blueberry and grape juice with different yeasts[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 146: 111661.
- [3] XU A N, LAI W Y, CHEN P, et al. A comprehensive review on polysaccharide conjugates derived from tea leaves: Composition, structure, function and application[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 114: 83-99.
- [4] KRAMER B, WUNDERLICH J, MURANYI P. Recent findings in pulsed light disinfection[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2017, 122(4): 830-856.
- [5] JUBINVILLE E, TRUDEL-FERLAND M, AMYOT J, et al. Inactivation of hepatitis A virus and norovirus on berries by broad-spectrum pulsed light[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2022, 364: 109529.
- [6] DHAR R, CHAKRABORTY S. Influence of voltage and distance on quality attributes of mixed fruit beverage during pulsed light treatment and kinetic modeling[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2020, 43(11): e13517.
- [7] BHAGAT B, CHAKRABORTY S. Potential of pulsed light treatment to pasteurize pomegranate juice: Microbial safety, enzyme inactivation, and phytochemical retention[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 159: 113215.
- [8] YU K B, ZHOU L, SUN Y F, et al. Anti-browning effect of *Rosa roxburghii* on apple juice and identification of polyphenol oxidase inhibitors[J]. *Food Chemistry*, 2021, 359: 129855.
- [9] 王彦平, 娄芳慧, 陈月英, 等. 苯酚-硫酸法测定紫山药多糖含量的条件优化[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(4): 170-174.
WANG Yanping, LOU Fanghui, CHEN Yueying, et al. Optimization of analytical conditions for the determination of polysaccha-

- rides contents in purple yam by phenol-sulfuric acid method[J]. Food Research and Development, 2021, 42(4): 170-174.
- [10] DI STEFANO R, CRAVERO MC, GENTILINI N. Metodi per lo studio dei polifenoli dei vini[J]. L'Enotecnico, 1989, (5): 83-89.
- [11] 崔燕, 宣晓婷, 朱宏芬, 等. 不同品种蓝莓制汁特性评价[J]. 食品工业科技, 2024, 45(15): 304-312.
- CUI Yan, XUAN Xiaoting, ZHU Hongfen, et al. Evaluation of juice processing characteristics of blueberry from different cultivars[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(15): 304-312.
- [12] DE SOUZA V R, PEREIRA P A P, DA SILVA T L T, et al. Determination of the bioactive compounds, antioxidant activity and chemical composition of Brazilian blackberry, red raspberry, strawberry, blueberry and sweet cherry fruits[J]. Food Chemistry, 2014, 156: 362-368.
- [13] HOU Y N, WANG R X, GAN Z L, et al. Effect of cold plasma on blueberry juice quality[J]. Food Chemistry, 2019, 290: 79-86.
- [14] 陈洋杨. 浓缩橙汁贮藏期间褐变调控的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023.
- CHEN Yangyang. Study on the regulation of browning of concentrated orange juice during storage[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.
- [15] 李靖. 刺梨浓缩汁腐败菌的分离鉴定及鲜榨刺梨汁工艺研究[D]. 成都: 西华大学, 2022.
- LI Jing. Isolation and identification of spoilage bacteria from *Rosa roxburghii* concentrated juice and study on the technology of freshly squeezed *Rosa roxburghii* juice[D]. Chengdu: Xihua University, 2022.
- [16] TAKESHITA K, SHIBATO J, SAMESHIMA T, et al. Damage of yeast cells induced by pulsed light irradiation[J]. International Journal of Food Microbiology, 2003, 85(1/2): 151-158.
- [17] CHAKRABORTY S, KAUSHIK N, RAO P S, et al. High-pressure inactivation of enzymes: A review on its recent applications on fruit purees and juices[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2014, 13(4): 578-596.
- [18] ZOU W H, NIU H H, YI J J, et al. Passion fruit juicing with or without seeds treated by high-pressure processing and thermal pasteurization: Effects on the storage stability of enzymes and quality properties[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2024, 91: 103554.
- [19] 刘亮, 曹少谦, 陈伟, 等. 脉冲强光及紫外线对水蜜桃多酚氧化酶活性的影响[J]. 核农学报, 2014, 28(1): 85-90.
- LIU Liang, CAO Shaoqian, CHEN Wei, et al. Effects of pulsed light and ultraviolet-C irradiation on the activity of polyphenol oxidase from honey peach[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2014, 28(1): 85-90.
- [20] ZHANG J, YU X J, XU B G, et al. Effect of intensive pulsed light on the activity, structure, physico-chemical properties and surface topography of polyphenol oxidase from mushroom[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 72: 102741.
- [21] CHAKRABORTY S, PARAB P V. Pulsed light treatment of table grape juice: Influence of matrix pH on microbial and enzyme inactivation kinetics[J]. Food Bioscience, 2023, 53: 102662.
- [22] STEPHENIE S, CHANG Y P, GNANASEKARAN A, et al. An insight on superoxide dismutase (SOD) from plants for mammalian health enhancement[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 68: 103917.
- [23] HERRERA-BALANDRANO D D, CHAI Z, BETA T, et al. Blueberry anthocyanins: An updated review on approaches to enhancing their bioavailability[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 118: 808-821.
- [24] REQUE P M, STEFFENS R S, JABLONSKI A, et al. Cold storage of blueberry (*Vaccinium* spp.) fruits and juice: Anthocyanin stability and antioxidant activity[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2014, 33(1): 111-116.
- [25] PALA Ç U, TOKLUCU A K. Effect of UV-C light on anthocyanin content and other quality parameters of pomegranate juice[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2011, 24(6): 790-795.
- [26] TURFAN Ö, TÜRKÜYÜLMAZ M, YEMİŞ Ö, et al. Anthocyanin and colour changes during processing of pomegranate (*Punica granatum* L., cv. Hicaznar) juice from sacs and whole fruit[J]. Food Chemistry, 2011, 129(4): 1644-1651.
- [27] VEGARA S, MARTÍN 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] ZHAN L J, HU J Q, PANG L Y, et al. Light exposure reduced browning enzyme activity and accumulated total phenols in cauliflower heads during cool storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 88: 17-20.
- [29] VOLLMER K, CHAKRABORTY S, BHALERAU P P, et al. Effect of pulsed light treatment on natural microbiota, enzyme activity, and phytochemical composition of pineapple (*Ananas comosus* [L.] Merr.) juice[J]. Food and Bioprocess Technology, 2020, 13(7): 1095-1109.
- [30] BASAK S, SHAIK L, CHAKRABORTY S. Effect of ultraviolet and pulsed light treatments on ascorbic acid content in fruit juices—a review of the degradation mechanism[J]. Food Chemistry Advances, 2023, 2: 100333.
- [31] SNEHASIS C, SAURABHI G, PRASANNA P B, et al. The potential of pulsed light treatment to produce enzymatically stable Indian gooseberry (*Emblica officinalis* Gaertn.) juice with maximal retention in total phenolics and vitamin C[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(12): e14932.
- [32] CAI R, MA Y L, WANG Z L, et al. Inactivation activity and mechanism of pulsed light against *Alicyclobacillus acidoterrestris* vegetative cells and spores in concentrated apple juice[J]. International Journal of Food Microbiology, 2024, 413: 110576.
- [33] PAN X, ZHANG S, XU X X, et al. Volatile and non-volatile profiles in jujube pulp co-fermented with lactic acid bacteria[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112772.

责任编辑:王艳

收稿日期:2024-03-28