



杨怡静,张佳雯,林少玲,等.姜黄素介导下声光动力联合处理对百香果汁贮藏品质的影响[J].轻工学报,2025,40(3):19-27.
YANG Y J,ZHANG J W,LIN S L,et al.The influence of curcumin-mediated sono-photodynamic treatment on the storage quality of passion fruit juice[J].Journal of Light Industry,2025,40(3):19-27.
DOI:10.12187/2025.03.003

姜黄素介导下声光动力联合处理对百香果汁贮藏品质的影响

杨怡静,张佳雯,林少玲,胡嘉森

福建农林大学 食品科学学院,福建 福州 350002

摘要:以百香果汁为研究对象,采用全自动色差仪、电子舌等设备研究姜黄素介导下声光动力联合处理对百香果汁贮藏品质的影响。结果表明:在 50 $\mu\text{mol/L}$ 姜黄素介导下,声光动力联合处理(超声波频率为 45 kHz、强度为 0.40 W/cm^2 ,发光二极管(Light Emitting Diode, LED)波长为 425 nm、蓝光光照幅度为 5.3 mW/cm^2) 30 min,可使百香果汁的菌落总数由初始的 $(1.93 \pm 0.12) \log \text{CFU}/\text{mL}$ 降低至 $(0.80 \pm 0.18) \log \text{CFU}/\text{mL}$ 。贮藏 0 d 时,相较于空白对照组,声光动力联合处理组的总酚含量增加了 10.68 mg/L 。贮藏至 20 d 时,空白对照组的 pH 值升高至 4.01,总可溶性固形物含量下降至 8.93 $^\circ\text{Brix}$,而声光动力联合处理组的 pH 值和总可溶性固形物含量基本保持不变。此外,声光动力联合处理可有效保持百香果汁的外观色泽和感官风味,延长百香果汁的货架期。因此,姜黄素介导的声光动力联合处理可有效改善百香果汁的贮藏品质,为液态食品保鲜研究提供新思路。

关键词:声光动力联合处理;姜黄素;百香果汁;贮藏品质

中图分类号:TS255.44 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2025)03-0019-09

0 引言

百香果,又名西番莲,是一种热带、亚热带水果,富含维生素、多酚、矿物质、可溶性膳食纤维等多种营养物质^[1],已被广泛开发成果汁、果茶、复合饮料等产品^[2]。百香果汁因色泽鲜艳、口感酸甜的特点而深受消费者青睐^[3]。热杀菌作为百香果汁加工过程中的关键工序之一,虽然能有效杀灭果汁中的微生物,但易对果汁中的挥发性化合物及芳香族化合物造成较大耗损,引发产品风味下降、保质

期缩短等问题^[4]。因此,在保证百香果汁品质特性的前提下,开发适用于百香果汁的新型非热杀菌技术具有重要意义。

光动力技术是一种新型非热杀菌技术,主要通过可见光诱导敏化剂产生大量的活性氧分子,这些活性氧分子会对菌体生物大分子产生氧化损伤,导致微生物死亡^[5]。该技术具有安全性高、不会诱发微生物耐药性等优势,在食品杀菌领域展现出巨大的应用潜力^[6]。例如,X. Zhang 等^[7]采用光动力技术处理新鲜圣女果和葡萄,可使圣女果表面细菌和

收稿日期:2024-10-30;修回日期:2025-03-08;出版日期:2025-06-15

基金项目:国家自然科学基金面上基金项目(32272450);福建农林大学科技创新专项基金项目(KFB23132A)

作者简介:杨怡静(2001—),女,福建省三明市人,福建农林大学硕士研究生,主要研究方向为食品安全。E-mail:clemf10@163.com

通信作者:胡嘉森(1984—),男,山东省曲阜市人,福建农林大学副教授,博士,主要研究方向为新型非热杀菌技术灭活食源性致病菌机理及应用。E-mail:jiamiadhu@fafu.edu.cn

大肠杆菌总数减少 80% 以上,使葡萄在室温下的保质期延长 2 d。但由于光的穿透能力有限,且易受敏化剂种类、光源强度、食品透光率等多种因素的影响,光动力技术在食品工业中的应用仍受到诸多限制,主要适用于食品表面或透明澄清液体饮料的杀菌处理。

声动力技术是利用超声波作为能量源激活敏化剂产生活性氧,进而灭活微生物的新型杀菌技术。该技术充分利用了超声波较强的穿透特性,可有效弥补光动力技术的缺陷^[8]。值得注意的是,虽然声动力技术在穿透力方面具有明显优势,但其对敏化剂的激活作用通常较弱,释放的活性氧含量较光动力技术少^[9]。因此,声光动力联合处理可充分结合声动力技术和光动力技术各自的优势,通过超声波和光照协同激活敏化剂并产生活性氧,具有更强的杀菌活性和穿透特性^[10]。例如,F. Alves 等^[11]通过比较姜黄素介导下光动力、声动力、声光动力联合处理对金黄色葡萄球菌生物膜的灭活作用,发现相较于光动力、声动力单独处理,声光动力联合处理具有更好的杀菌效果。本课题组前期研究^[12]也发现,光动力技术的杀菌效果会随着液态食品基质透光率的降低而下降,而声动力技术的杀菌效果基本不受其影响,在低透光率下仍具有较强的杀菌活性。因此,采用声光动力联合处理方法处理百香果汁等低透光特性的液态食品具有较好的可行性,可同时实现光动力技术对敏化剂较强的激活作用,以及声动力技术在低透光特性下的较强穿透力。

姜黄素是一种从姜黄根茎中提取的多酚类化合物^[13],作为天然敏化剂被广泛应用于光动力和声动力技术。例如,J. W. Zhang 等^[14]研究发现,在姜黄素浓度为 50 $\mu\text{mol/L}$ 时,采用 800 W 超声波和 425 nm 发光二极管(Light Emitting Diode, LED)蓝光联合处理 25 min,可实现对单核细胞增生李斯特菌的最佳灭活效果。然而,姜黄素自身的亮黄色在一定程度上会影响食品色泽。赵淑怡等^[15]研究表明,大黄鱼经姜黄素浸泡预处理后,残留的姜黄素会渗透进鱼表皮细胞并影响其明度值(L^*)。百香果汁的色泽与姜黄素相近,选择姜黄素作为敏化剂用于百香果汁的非热杀菌处理,可较大程度避免其对百

香果汁色泽及感官品质的影响。

基于此,本研究拟采用声光动力联合处理方法,利用可见光 and 低频超声波结合以激活敏化剂(姜黄素),探究该处理方法对百香果汁的杀菌效果,并基于贮藏期(20 d)内百香果汁的菌落总数、pH 值、总可溶性固形物含量、总酚含量等品质指标,全面评价该处理方法在百香果汁贮藏保鲜中的有效性和适用性,以期延长百香果汁等低透光性果汁饮品的货架期提供参考。

1 材料和方法

1.1 主要材料与试剂

百香果,福州朴朴电子商务有限公司;姜黄素,东京化成工业株式会社;羧甲基纤维素钠,上海申光食用化学品有限公司;磷酸盐缓冲液(PBS),北京索莱宝科技有限公司;无水乙醇,国药集团化学试剂有限公司;葡萄糖,济南铭锋生物科技有限公司;LB 固体培养基,广东环凯微生物科技有限公司;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH),美国 Sigma 公司;福林-酚试剂、没食子酸,上海源叶生物科技有限公司; Na_2CO_3 ,天津福晨化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器与设备

PL-LED20FL 型 LED,北京普林塞斯科技有限公司;JM-38D-45 型液晶超声波清洗机,深圳市洁盟清洗设备有限公司;HPX-9000 型数显电热培养箱,上海博讯实业有限公司;ZWY-200D 型恒温培养振荡器,上海智城分析仪器制造有限公司;Evolution Pro 型紫外-分光光度计,美国赛默飞世尔科技公司;Agilent-1200 型高效液相色谱仪,安捷伦科技有限公司;SCAN1200 型菌落计数器,法国 Interscience 公司;SA-402B 型电子舌,日本 Insent 公司;PAL-1 型数显糖度计,广州爱宕科学仪器有限公司;PHS-3C 型数显台式 pH 计,天津天马衡基仪器有限公司;ADCI 型全自动色差仪,北京辰泰克仪器技术有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 姜黄素母液制备 准确称量 0.036 8 g 姜黄素溶于 10 mL 无水乙醇中,制得 $1 \times 10^4 \mu\text{mol/L}$ 的姜黄素母液,置于 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱中避光贮藏,备用。

1.3.2 百香果汁制备 将新鲜百香果去壳取肉,榨汁后过滤,获得果汁原液。为中和果汁原液的酸度并稳定液态,加入一定量的纯水使果汁原液体积分数为 18%,同时加入质量分数为 0.3%的羧甲基纤维素钠和质量分数为 5%的葡萄糖,即得百香果汁。

1.3.3 声光动力联合处理 将制得的百香果汁分成 2 组,取其中 1 组与姜黄素稀释液(用生理盐水将姜黄素母液稀释至 100 $\mu\text{mol/L}$)混合,保持百香果汁各组分的含量不变,并使体系中姜黄素浓度为 50 $\mu\text{mol/L}$,将样品避光孵育 30 min,随后将样品试管固定于频率为 45 kHz、超声波强度为 0.40 W/cm²的水浴式超声波清洗机中,水位浸没试管含样部分,同时使用波长为 425 nm、光照强度为 5.3 mW/cm²的 LED 蓝光在 10 cm 照射距离下对样品进行联合处理 30 min。另 1 组为空白对照组,不进行任何处理。对 2 组百香果汁进行初始指标测定后,迅速分装至无菌带盖玻璃瓶中,置于 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中冷藏保存,每 5 d 取样 1 次,测定相应指标。

1.3.4 菌落总数测定 将百香果汁样品进行 10 倍梯度稀释,吸取 200 μL 合适梯度的稀释液均匀涂布于 LB 固体培养基上,在 37 $^{\circ}\text{C}$ 恒温培养振荡器中培养约 48 h,每个梯度平行计数 3 次。参照《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—2022)^[16]测定百香果汁样品的菌落总数,结果取平均值。

1.3.5 维生素 C 含量测定 参照《食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定》(GB 5009.86—2016)^[17]中的高效液相色谱法测定百香果汁样品的维生素 C 含量。

1.3.6 DPPH 自由基清除率测定 参考于弘慧等^[18]的方法,测定百香果汁在贮藏期间的 DPPH 自由基清除率。配制 0.2 mmol/L 的 DPPH 溶液后,取 3 支干净试管,第 1 支试管中加入百香果汁样品和 DPPH 溶液各 1 mL,第 2 支试管中加入百香果汁样品和无水乙醇各 1 mL,第 3 支试管中加入 DPPH 溶液和无水乙醇各 1 mL。将 3 支试管振荡混匀后,避光静置 30 min,使用紫外-分光光度计在 517 nm 波长处测定吸光度,重复测定 3 次,结果取平均值。DPPH 自由基清除率计算公式如下:

$$\text{DPPH 自由基清除率} = \left(1 - \frac{A_0 - A_1}{A_2}\right) \times 100\%$$

式中, A_0 为百香果汁样品与 DPPH 溶液混合后的吸光度, A_1 为百香果汁样品与无水乙醇混合后的吸光度, A_2 为 DPPH 溶液与无水乙醇混合后的吸光度。

1.3.7 pH 值测定 吸取 20 mL 百香果汁样品于小烧杯中,使用 pH 计在室温下测定样品的 pH 值,重复测定 3 次,结果取平均值。

1.3.8 总酚含量测定 参考李靖等^[19]的福林-酚法,测定百香果汁样品的总酚含量。吸取 1 mL 百香果汁样品,用蒸馏水定容至 100 mL,取 1 mL 稀释液与 1 mL 福林-酚试剂混合,振荡摇匀,静置 4 min 后加入 5 mL Na₂CO₃ 溶液,摇匀后在 50 $^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴中避光反应 30 min,使用紫外-分光光度计在 765 nm 波长处测定吸光度。以没食子酸作为标准物质表征总酚含量。

1.3.9 总可溶性固形物含量测定 参考王凤玲等^[20]的方法,在 20 $^{\circ}\text{C}$ 下使用数显糖度计测定百香果汁样品的总可溶性固形物含量,以蒸馏水为空白对照,结果以 $^{\circ}\text{Brix}$ 表示。

1.3.10 色泽测定 使用全自动色差仪测定百香果汁样品在贮藏期间的色泽变化。在每次使用前,需用标准白板对色差仪进行校准。记录样品的色泽参数,总色差(ΔE)的计算公式如下:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L)^2 + (a^* - a)^2 + (b^* - b)^2}$$

式中, L^* 为声光动力联合处理组样品的明度值, a^* 为声光动力联合处理组样品的红绿值, b^* 为声光动力联合处理组样品的黄蓝值, L 为空白对照组样品的明度值, a 为空白对照组样品的红绿值, b 为空白对照组样品的黄蓝值。

1.3.11 感官评价 选择 10 名经过专业培训的食品研究人员组成感官评价小组,参考《果蔬汁类及其饮料》(GB/T 31121—2014)^[21]中的相关规定制定百香果汁样品的评分标准,对样品的色泽、气味、口感及组织状态进行评分,最终结果取平均值,具体评定标准见表 1。

1.3.12 风味测定 采用电子舌测定百香果汁在贮藏期间的风味特征变化。将百香果汁样品离心后,取适量上清液,用 3 倍体积的无菌水稀释;取 100 mL 稀

释后的澄清百香果汁样品装入电子舌专用杯内,将电子舌的传感器探头用蒸馏水清洗后,放入样品中进行测定并收集数据,测定过程持续 120 s,取测定过程最后 20 s 的平均值作为传感器信号值。测定过程中确定酸味的无味点为-13,咸味的无味点为-6,其余味觉的无味点均为 0。

1.4 数据统计分析

除特别注明外,所有实验均重复测定 3 次,数据结果表示为(平均值±标准差)。使用 SPSS 26.0 软件对实验数据进行双因素方差分析和邓肯检验,以 $P < 0.05$ 表示存在显著性差异;采用 GraphPad Prism 9.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 百香果汁菌落总数分析

声光动力联合处理对百香果汁菌落总数的影响如图 1 所示,其中不同小写字母表示存在显著性差异($P < 0.05$),下同。由图 1 可知,在贮藏 0 d 时,空白对照组的菌落总数为 $(1.93 \pm 0.12) \log \text{CFU}/\text{mL}$,而经声光动力联合处理后,百香果汁的菌落总数显著下降至 $(0.80 \pm 0.18) \log \text{CFU}/\text{mL}$ 。同时,在贮藏 15 d 内,空白对照组的菌落总数呈快速上升的趋势,而声光动力联合处理组的菌落总数呈缓慢增长的趋势,且始终低于空白对照组,保持在 $2 \log \text{CFU}/\text{mL}$ 以下。贮藏至第 15 d 时,空白对照组的菌落总数已上升至 $(8.64 \pm 0.17) \log \text{CFU}/\text{mL}$,而

声光动力联合处理组的菌落总数才开始迅速增长。因此,利用声光动力联合处理可有效抑制百香果汁中微生物的繁殖,且贮藏 15 d 内的菌落总数,符合《食品安全国家标准 饮料》(GB 7101—2022)^[22] 的要求。

2.2 百香果汁总酚含量分析

声光动力联合处理对百香果汁总酚含量的影响如图 2 所示。由图 2 可知,在贮藏 20 d 内,声光动力联合处理组与空白对照组的总酚含量变化趋势一致。在贮藏 0 d 时,空白对照组的总酚含量为 $301.89 \text{ mg}/\text{L}$,而经声光动力联合处理后,百香果汁的总酚含量显著提升至 $312.57 \text{ mg}/\text{L}$ 。这可能是因为超声波作用于百香果汁会造成细胞壁破裂,促使结合酚释放,同时,·OH 自由基与杂环酚结合,进而提高总酚含量^[23]。在贮藏前 5 d 内,声光动力联合处理组和空白对照组的总酚含量均呈下降趋势,至贮藏第 5 d 时达到前期低点。推测在贮藏前期(0~

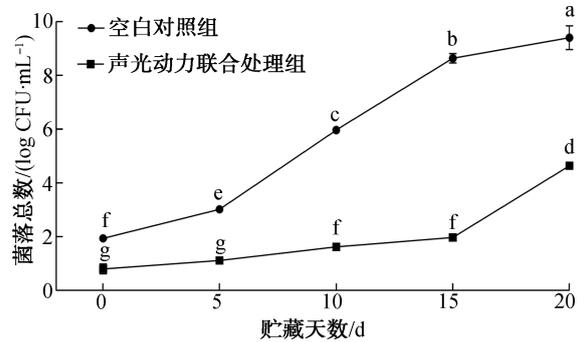


图 1 声光动力联合处理对百香果汁菌落总数的影响
Fig. 1 Effect of sono-photodynamic treatment on the total aerobic plate count of passion fruit juice

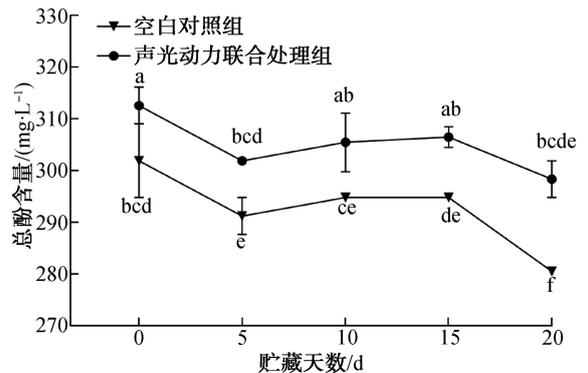


图 2 声光动力联合处理对百香果汁总酚含量的影响
Fig. 2 Effect of sono-photodynamic treatment on the total phenol content of passion fruit juice

表 1 百香果汁感官评定标准

Table 1 Sensory evaluation standards for passion

fruit juice		
项目	评价标准	分值/分
色泽	呈鲜黄色	7~9
	呈淡黄色	4~6
	呈暗黄色	1~3
气味	具有强烈果香,无异味	7~9
	具有果香,无异味	4~6
	无果香,有异味	1~3
口感	果味浓烈,酸甜可口	7~9
	果味一般,酸甜适中	4~6
	果味及酸甜味一般	1~3
组织状态	组织均匀,无分层和沉淀	7~9
	组织较均匀,稍有分层和沉淀	4~6
	组织不均匀,分层严重,沉淀较多	1~3

5 d),百香果汁中的总酚与氧气接触后,在多酚氧化酶的催化作用下发生氧化反应,从而导致总酚含量减少^[24]。贮藏至第 15 d 时,声光动力联合处理组和空白对照组的总酚含量均出现回升趋势,这可能归因于百香果汁中果胶酶发挥作用,促使结合酚持续转化为游离酚。林羨等^[25]也报道了百香果汁经二甲基二碳酸盐处理后总酚含量呈先减少后增加的趋势。在贮藏后期(15~20 d),空白对照组总酚含量的下降速率显著高于声光动力联合处理组,这可能是由于贮藏后期空白对照组发生了更严重的腐败变质。因此,声光动力联合处理能够有效维持百香果汁的总酚含量。

2.3 百香果汁维生素 C 含量分析

声光动力联合处理对百香果汁维生素 C 含量的影响如图 3 所示。由图 3 可知,在贮藏 0 d 时,空白对照组的维生素 C 含量显著高于声光动力联合处理组。这一方面可能是由于声光动力联合处理过程中产生的大量活性氧加剧了维生素 C 的氧化^[23];另一方面,维生素 C 对光高度敏感,声光动力联合处理对维生素 C 产生了负面影响^[26]。贮藏 5 d 后,空白对照组的维生素 C 含量开始低于声光动力联合处理组,并持续降低。随着贮藏时间的延长,两组样品的维生素 C 含量均逐渐下降,但声光动力联合处理组的维生素 C 含量下降速度较为缓慢,这可能与超声波的空化效应有关。超声波的空化效应能去除果汁中的溶解氧,进而延缓维生素 C 的氧化过程。S. M. S. Alam 等^[27]的研究也证实,超声波

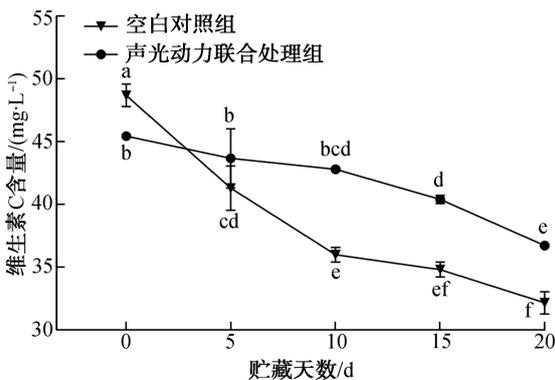


图 3 声光动力联合处理对百香果汁维生素 C 含量的影响

Fig. 3 Effect of sono-photodynamic treatment on the vitamin C content of passion fruit juice

处理对维生素 C 具有保护作用,但氧气存在的情况下,维生素 C 会发生氧化反应而损失。因此,声光动力联合处理在贮藏前期会降低百香果汁中维生素 C 含量,但随着贮藏时间的延长,能够有效减缓百香果汁中维生素 C 含量的下降速度。

2.4 百香果汁 DPPH 自由基清除率分析

声光动力联合处理对百香果汁 DPPH 自由基清除率的影响如图 4 所示。由图 4 可知,在贮藏 0 d 时,声光动力联合处理组的 DPPH 自由基清除率显著低于空白对照组,这与 M. L. Bhavya 等^[23]的研究结果较一致。同时,Z. Y. Chai 等^[28]也报道了光动力处理橙汁的 DPPH 自由基清除率会降低,推测可能是因为光动力激活时所释放的活性氧加剧了果汁的氧化。在贮藏 10~15 d 内,空白对照组的 DPPH 自由基清除率下降幅度较大,且低于声光动力联合处理组。在贮藏后期,声光动力联合处理组的 DPPH 自由基清除率也出现明显下降,但相较于空白对照组,DPPH 自由基的保留效果更佳。

2.5 百香果汁 pH 值分析

pH 值是影响果汁风味和安全性的重要因素。声光动力联合处理对百香果汁 pH 值的影响如图 5 所示。由图 5 可知,对于空白对照组,pH 值在贮藏 0 d 时为 3.78,在贮藏 10 d 内保持相对稳定,在贮藏 10 d 后呈显著升高趋势,在贮藏 20 d 时达到 4.01。这可能是因为,在贮藏后期,空白对照组的维生素 C 和酚酸均发生氧化,导致 pH 值升高。与空白对照组相比,声光动力联合处理组的 pH 值在贮藏期间

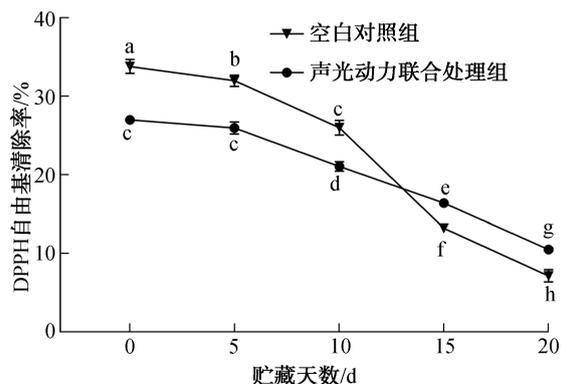


图 4 声光动力联合处理对百香果汁 DPPH 自由基清除率的影响

Fig. 4 Effect of sono-photodynamic treatment on the DPPH free radical scavenging rate of passion fruit juice

均保持在3.8左右。因此,声光动力联合处理能较好地稳定百香果汁在贮藏期间的pH值。

2.6 百香果汁总可溶性固形物含量分析

总可溶性固形物含量是反映果汁品质的一项重要指标,能显著影响果汁的风味和营养^[29]。声光动力联合处理对百香果汁总可溶性固形物含量的影响如图6所示。由图6可知,声光动力联合处理组的总可溶性固形物含量在整个贮藏期间均显著高于空白对照组。这可能是因为超声波产生的空化效应破坏细胞壁后,果汁微颗粒内部的糖类物质更易溶于果汁中。在贮藏前5 d,声光动力联合处理组和空白对照组的总可溶性固形物含量均保持相对稳定。从贮藏第10 d开始,空白对照组的总可溶性固形物含量呈持续降低趋势,第20 d时下降至8.93 °Brix。这可能是因为贮藏后期微生物大量繁殖,消耗了糖、维生素、矿物质等可溶性固形物。该结果与杜晓仪等^[30]的研究结果较一致。但声光动

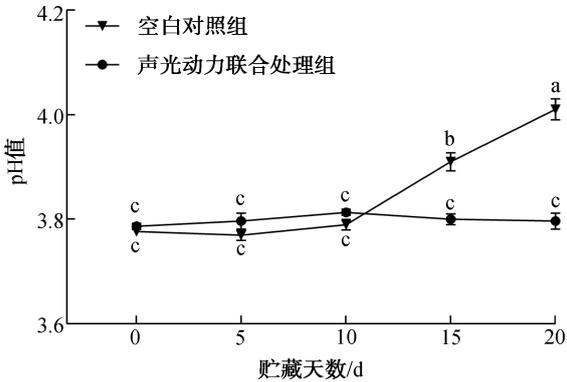


图5 声光动力联合处理对百香果汁pH值的影响
Fig. 5 Effect of sono-photodynamic treatment on the pH value of passion fruit juice

力联合处理组在贮藏后期的总可溶性固形物含量未出现明显降低,这与王晓琼^[31]的研究结果较一致。因此,声光动力联合处理能够有效维持百香果汁在贮藏期间的总可溶性固形物含量。

2.7 百香果汁色泽分析

声光动力联合处理对百香果汁色泽的影响见表2。由表2可知,声光动力联合处理组的 L^* 、 a^* 、 b^* 和 ΔE 均较空白对照组稳定。在贮藏0 d时,声光动力联合处理组的 L^* 显著高于空白对照组($P < 0.05$),表明声光动力联合处理能够增加百香果汁的亮度;同时,声光动力联合处理组的 b^* 显著高于空白对照组($P < 0.05$),可能是因为姜黄素的添加使百香果汁黄度加深;此外,声光动力联合处理组的 ΔE 也显著高于空白对照组($P < 0.05$),这可能与姜黄素的添加有关。M. L. Bhavya等^[32]的研究发现,姜黄素的添加能显著影响光动力处理组鲜切菠萝的 a^* 、 b^* 和 ΔE 。X. X. Sun等^[33]的研究也发现,菠

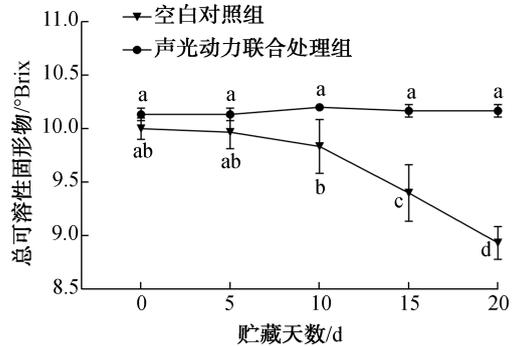


图6 声光动力联合处理对百香果汁总可溶性固形物含量的影响

Fig. 6 Effect of sono-photodynamic treatment on the total soluble solid content of passion fruit juice

表2 声光动力联合处理对百香果汁色泽的影响

Table 2 Effect of sono-photodynamic treatment on passion fruit juice color

组别	贮藏天数/d	L^*	a^*	b^*	ΔE
空白对照组	0	79.53±0.18 ^c	4.24±0.08 ^{bcd}	33.04±0.30 ^d	0 ^f
	5	80.49±0.28 ^b	4.48±0.16 ^a	32.87±0.03 ^d	1.02±0.25 ^c
	10	79.41±0.12 ^c	4.14±0.08 ^{cd}	34.56±0.24 ^c	1.53±0.20 ^d
	15	80.26±0.17 ^b	4.37±0.12 ^{ab}	35.22±0.34 ^b	2.31±0.14 ^c
	20	79.73±0.21 ^c	4.11±0.12 ^d	36.64±0.07 ^a	3.61±0.07 ^a
声光动力联合处理组	0	81.93±0.24 ^a	4.19±0.09 ^{bcd}	34.75±0.50 ^{bc}	2.97±0.27 ^b
	5	81.97±0.12 ^a	4.24±0.05 ^{bcd}	34.84±0.13 ^{bc}	3.04±0.15 ^b
	10	81.90±0.14 ^a	4.35±0.14 ^{abc}	34.61±0.47 ^c	2.87±0.23 ^b
	15	81.88±0.15 ^a	4.27±0.22 ^{bcd}	34.66±0.22 ^c	2.91±0.15 ^b
	20	81.80±0.41 ^a	4.24±0.10 ^{bcd}	35.18±0.28 ^b	3.12±0.20 ^b

注:同列不同小写字母表示组间存在显著性差异($P < 0.05$)。

萝汁饮料的 a^* 和 b^* 会随着姜黄素浓度的增加而增加。在贮藏后期,空白对照组的 ΔE 显著上升,而声光动力联合处理组的 ΔE 仅出现小幅波动。这可能与空白对照组在贮藏后期微生物大量繁殖,导致感官品质发生劣变有关,该因素在一定程度上会影响百香果汁的色泽。因此,声光动力联合处理能够有效维持百香果汁在贮藏期间的色泽稳定性。

2.8 百香果汁感官评分分析

百香果汁感官评分雷达图如图 7 所示。由图 7 可知,在贮藏 0 d 时,声光动力联合处理组和空白对照组之间的感官评分无显著差异。贮藏至第 15 d,声光动力联合处理组的各项感官评分均高于空白对照组。具体而言,在气味和口感方面,空白对照组出现异味,果味表现一般,而声光动力联合处理

组仍保持一定果香,但果味一般。在色泽方面,声光动力联合处理组呈淡黄色,而空白对照组已呈暗黄色。在组织形态方面,声光动力联合处理组出现轻微分层和沉淀,而空白对照组分层严重。出现这些现象的原因可能是声光动力联合处理能有效降低百香果汁的菌落总数,从而延缓百香果汁的腐败变质进程,而空白对照组在贮藏后期由于微生物大量繁殖,导致更为严重的腐败变质。因此,声光动力联合处理可以有效延缓百香果汁在贮藏期间的品质劣变,延长百香果汁的货架期。

2.9 百香果汁风味分析

声光动力联合处理对百香果汁风味的影响如图 8 所示。由图 8a) 和 b) 可知,在贮藏 0 d 时,与空白对照组相比,声光动力联合处理组的感官特征未发生明显变化;贮藏至第 20 d,相较于声光动力联合处理组,除余味外,空白对照组的其余风味指标均发生明显变化,表明随着贮藏时间的延长,空白对照组菌落总数的增加导致营养成分严重损失,引起风味劣变。由图 8c) 可知,第一主成分(PC1)的贡献率为 83.8%,第二主成分(PC2)的贡献率为 12.7%,表明第一和第二主成分涵盖了样品绝大部分信息,能够有效反映样品之间的风味差异。空白对照组在贮藏第 10 d 时,第二主成分得分明显降低,贮藏至第 20 d 时,第一主成分得分明显低于声光动力联合处理组,且位于负半轴上,说明空白对照组的风味在贮藏后期发生了较大变化。因此,声光动力联合处理能够较好地保留百香果汁的风味特性。

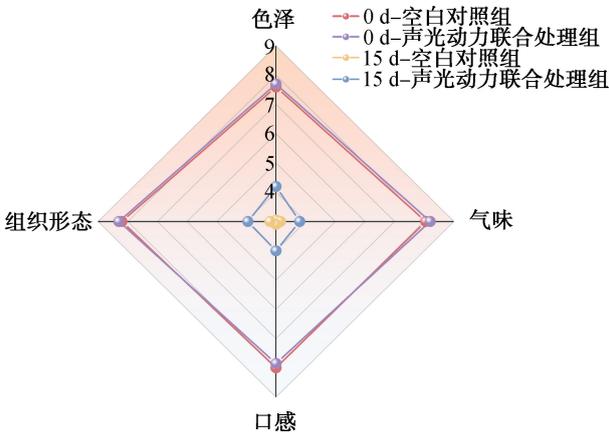


图 7 百香果汁感官评分雷达图

Fig. 7 Radar chart illustrating sensory scores of passion fruit juice

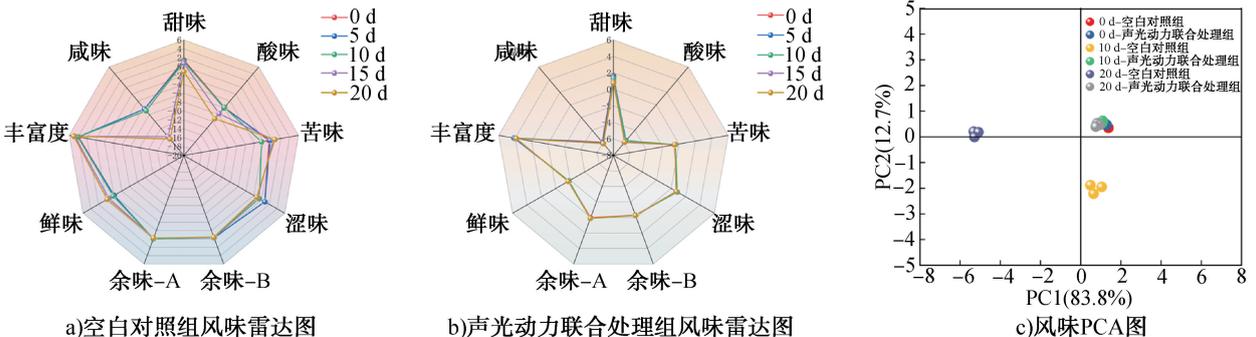


图 8 声光动力联合处理对百香果汁风味的影响

Fig. 8 Effect of sono-photodynamic treatment on the flavor of passion fruit juice

3 结论

本文对百香果汁进行了姜黄素介导的声光动力联合处理,并将处理后的百香果汁置于4℃条件下贮藏20d,分析了贮藏期间声光动力联合处理组和空白对照组中百香果汁的菌落总数、总酚含量、维生素C含量、pH值等指标的变化情况,并采用感官评价和电子舌系统分析了其感官品质和风味特性变化,得到如下结论:声光动力联合处理对百香果汁中的微生物具有显著的灭活作用,菌落总数由初始的 $(1.93 \pm 0.12) \log \text{CFU/mL}$ 降低至 $(0.80 \pm 0.18) \log \text{CFU/mL}$,可作为一种新型有效的果汁杀菌方式。与空白对照组相比,声光动力联合处理不仅显著增加了百香果汁的总酚含量,还有效维持了pH值和总可溶性固形物含量。此外,声光动力联合处理在一定程度上延缓了贮藏期间百香果汁中维生素C含量的降低,表现出更佳的DPPH自由基清除能力,且较好地保持了百香果汁的色泽和风味。值得注意的是,姜黄素在实际应用中会对食品色泽产生较为显著的影响,但由于百香果汁自身的色泽与姜黄素相近,这一特性可使姜黄素原本影响食品色泽的劣势转变为优势,有效提升百香果汁的感官评分。因此,姜黄素介导的声光动力联合处理在实现高效杀菌的同时,能够有效维持百香果汁在贮藏期间的品质特性。本研究结果可为提升百香果汁品质及延长其货架期提供新的技术参考。

参考文献:

[1] 胡德辉,赵莉娜,谢文佩,等. 百香果加工工艺研究进展[J]. 农产品加工,2018(11):65-67.

[2] 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.

[3] XIE X, CHEN C, FU X. Study on the bioaccessibility of phenolic compounds and bioactivities of passion fruit juices from different regions in vitro digestion [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(1): e15056.

[4] 牛慧慧,张慧云,邹文惠,等. 不同杀菌方式对百香果汁感官和营养品质的影响[J]. 食品与发酵工业,

2022, 48(20): 145-151.

[5] YUAN Y, LIU Q Y, HUANG Y J, et al. Antibacterial efficacy and mechanisms of curcumin-based photodynamic treatment against *Staphylococcus aureus* and its application in juices [J]. Molecules, 2022, 27(20): 7136.

[6] WEI G Q, YANG G, WANG Y, et al. Phototherapy-based combination strategies for bacterial infection treatment [J]. Theranostics, 2020, 10(26): 12241-12262.

[7] ZHANG X, WU J, XU C S, et al. Inactivation of microbes on fruit surfaces using photodynamic therapy and its influence on the postharvest shelf-life of fruits [J]. Food Science and Technology International, 2020, 26(8): 696-705.

[8] YAN Q, MEI J, LI D P, et al. Application of sonodynamic technology and sonosensitizers in food sterilization: A review of developments, trends and challenges [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(3): 740-759.

[9] YAN Q, MEI J, LI D P, et al. Application of sonodynamic technology and sonosensitizers in food sterilization: A review of developments, trends and challenges [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(3): 740-759.

[10] WANG D H, ZHOU F, LAI D N, et al. Curcumin-mediated sono/photodynamic treatment preserved the quality of shrimp surimi and influenced its microbial community changes during refrigerated storage [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 78: 105715.

[11] ALVES F, PRATAVIEIRA S, INADA N M, et al. Effects on colonization factors and mechanisms involved in antimicrobial sonophotodynamic inactivation mediated by curcumin [J]. Pharmaceutics, 2023, 15(10): 2407.

[12] LIN S L, ZHANG J W, STEKEL D, et al. The food matrix properties influence the antibacterial effectiveness of photodynamic and sonodynamic treatments [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2024, 93: 103630.

[13] BEN-ZICHRI S, MELTZER M, LACHAM-HARTMAN S, et al. Synergistic activity of anticancer polyphenols embedded in amphiphilic dendrimer nanoparticles [J]. ACS Applied Polymer Materials, 2022, 4(12): 8913-8925.

[14] ZHANG J W, ZHENG P Y, LI J, et al. Curcumin-mediated sono-photodynamic treatment inactivates *Listeria monocytogenes* via ROS-induced physical disruption and oxidative damage [J]. Foods, 2022, 11(6): 808.

[15] 赵淑怡,倪继龙,瞿语桐,等. 不同预处理方式对姜黄素介导的大黄鱼光动力灭活保鲜效果[J]. 食品工业科技, 2025, 46(5): 329-336.

[16] 国家卫生健康委员会,国家市场监督管理总局. 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—2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.

[17] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定: GB 5009. 86—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

- [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] 李靖,王嘉祥,陈欢,等. 超高压与热杀菌对刺梨汁贮藏期品质影响的比较[J]. 食品科学,2022,43(15):101-108.
- [20] 王凤玲,朱琳,柴瑾,等. 超高压处理对鲜榨复配果汁品质及货架期的影响[J]. 食品工业科技,2024,45(9):309-316.
- [21] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 果蔬汁类及其饮料:GB/T 31121—2014[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [22] 国家卫生健康委员会,国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 饮料:GB 7101—2022[S]. 北京:中国标准出版社,2023.
- [23] BHAVYA M L,HEBBAR H U. Sono-photodynamic inactivation of *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* in orange juice[J]. Ultrasonics Sonochemistry,2019,57:108-115.
- [24] 徐涓,张雯雯,李凯,等. 高温蒸汽处理对余甘子果汁贮藏期间的品质影响及褐变行为解析[J]. 食品科学,2019,40(23):246-252.
- [25] 林羨,李博哲,徐玉娟,等. 二甲基二碳酸盐对百香果汁的杀菌效果及品质影响[J]. 保鲜与加工,2022,22(9):38-44.
- [26] LIU Y,LI Y J,SHAO C, et al. Curcumin-based residue-free and reusable photodynamic inactivation system for liquid foods and its application in freshly squeezed orange juice[J]. Food Chemistry,2024,458:140316.
- [27] ALAM S M S, AKTHER S, ISLAM M R, et al. Effects of ultrasound, microwave, and their combined treatments on the shelf life and quality characteristics of fresh litchi juice[J]. Future Foods,2023,8:100254.
- [28] CHAI Z Y, ZHANG F, LIU B J, et al. Antibacterial mechanism and preservation effect of curcumin-based photodynamic extends the shelf life of fresh-cut pears[J]. LWT-Food Science and Technology,2021,142:110941.
- [29] LIN Y L, HU J M, LI S Y, et al. Curcumin-based photodynamic sterilization for preservation of fresh-cut Hami melon[J]. Molecules,2019,24(13):2374.
- [30] 杜晓仪,杨继国,罗文珊,等. 植物乳杆菌发酵三华李果汁工艺优化及贮藏期内品质变化[J]. 现代食品科技,2024,40(3):102-112.
- [31] 王晓琼. 非热加工技术对蓝莓复合果汁品质保护研究[D]. 成都:西华大学,2021.
- [32] BHAVYA M L, SHEWALE S R, RAJORIYA D, et al. Impact of blue LED illumination and natural photosensitizer on bacterial pathogens, enzyme activity and quality attributes of fresh-cut pineapple slices[J]. Food and Bioprocess Technology,2021,14(2):362-372.
- [33] SUN X X, FOLLETT P A, WALL M M, et al. Physical, chemical, and sensory properties of a turmeric-fortified pineapple juice beverage[J]. Foods,2023,12(12):2323.

The influence of curcumin-mediated sono-photodynamic treatment on the storage quality of passion fruit juice

YANG Yijing,ZHANG Jiawen,LIN Shaoling,HU Jiamiao

College of Food Science,Fujian Agriculture and Forestry University,Fuzhou 350002,China

Abstract: This study investigated the effect of curcumin-mediated sono-photodynamic treatment on the storage quality of passion fruit juice using an automatic colorimeter and electronic tongue. The results demonstrated that passion fruit juice treated with 50 $\mu\text{mol/L}$ curcumin-mediated sono-photodynamic treatment (45 kHz ultrasound at 0.40 W/cm^2 , 425 nm wavelength blue light-emitting diode (LED) at 5.3 mW/cm^2) for 30 min exhibited a significant reduction in the total number of colonies, decreasing from $(1.93 \pm 0.12) \log \text{CFU/mL}$ to $(0.80 \pm 0.18) \log \text{CFU/mL}$. Furthermore, at the initial storage time point (0 d), the total phenol content of the sono-photodynamic treatment sample increased by 10.68 mg/L compared with the control sample. After 20 days of storage, the pH value of the control sample increased to 4.01, and the total soluble solid content decreased to 8.93 °Brix. In contrast, both the pH value and soluble solid content in the sono-photodynamic-treated sample remained stable. Additionally, sono-photodynamic treatment could effectively preserve the color and sensory attributes, thereby extending the shelf life of passion fruit juice. In summary, curcumin-mediated sono-photodynamic treatment provides a promising approach for enhancing the storage quality of passion fruit juice and could offer a novel strategy for preserving liquid foods.

Key words: sono-photodynamic treatment; curcumin; passion fruit juice; storage quality