

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80331

杀菌方式对石榴汁理化特性及挥发性物质含量的影响

谷俊华 邢晓轲

(许昌职业技术学院园林与食品工程学院, 河南 许昌 461000)

摘要: [目的] 评估不同杀菌方式对石榴汁理化特性、酚类物质及香气成分的影响, 为石榴汁加工中杀菌方式的选择提供科学依据。[方法] 以‘突尼斯’软籽石榴汁为原料, 分别采用巴氏杀菌(pasteurization, PS)、超声波(ultrasound, US)、超高压(high-pressure processing, HPP)和微波(microwave sterilization, MS)处理方式进行杀菌, 并测定其理化性质及挥发性物质含量。[结果] 与其他处理相比, HPP在保持石榴汁品质方面表现最优。PS处理导致红色值由16.82降至12.37, 总色差高达4.82, 颜色劣变显著, 而HPP处理组色差值仅为1.77。HPP处理组的维生素C含量(22.18 mg/100 mL)远高于PS处理组(7.35 mg/100 mL), 矢车菊素-3-*O*-葡萄糖苷和矢车菊素-3, 5-*O*-双葡萄糖苷保留率分别达67.02%和66.20%, 显著优于PS处理组。HPP能更好地保留醇、酯、萜烯类主体风味物质, 而PS和MS处理显著促使不良呋喃类物质生成(PS组总呋喃含量54.22 $\mu\text{g/L}$, CK组0.28 $\mu\text{g/L}$)。[结论] HPP在保持石榴汁色泽、维生素C、花青素等酚类及主体风味物质方面显著优于PS、US和MS处理, 并能有效抑制不良风味(呋喃类物质)的产生。HPP是提升石榴汁品质极具前景的杀菌技术。

关键词: 石榴汁; 巴氏杀菌; 超声波; 超高压; 微波; 理化特性; 活性成分; 挥发性成分

Effects of different sterilization methods on the physicochemical properties and volatile compounds of pomegranate juice

GU Junhua XING Xiaoke

(School of Landscape and Food Engineering, Xuchang Vocational Technical College, Xuchang, Henan 461000, China)

Abstract: [Objective] This study aims to evaluate the effects of different sterilization methods on the physicochemical properties, phenolic compounds, and aroma components of pomegranate juice, providing a scientific basis for selecting sterilization techniques in pomegranate juice processing. [Methods] 'Tunisia' soft-seed pomegranate juice is subjected to pasteurization (PS), ultrasound (US), high-pressure processing (HPP), and microwave sterilization (MS), respectively. Physicochemical properties and volatile compound content are determined. [Results] HPP demonstrates superior performance in preserving pomegranate juice quality compared to other treatments. PS treatment significantly reduces the redness value from 16.82 to 12.37 and results in the highest total color difference of 4.82, indicating considerable color deterioration. In contrast, the HPP group exhibits a total color difference value of only 1.77. The vitamin C content in the HPP group (22.18 mg/100 mL) is substantially higher than that in the PS group (7.35 mg/100 mL). The retention rates of cyanidin-3-*O*-glucoside and cyanidin-3, 5-*O*-diglucoside in the HPP group reach 67.02% and 66.20%, respectively, significantly outperforming the PS group. HPP better preserves major flavor compounds such as alcohols, esters, and terpenes, whereas PS and MS treatments markedly promote the formation of undesirable furan compounds (the total furan content in PS group is 54.22 $\mu\text{g/L}$, compared to 0.28 $\mu\text{g/L}$ in the control group, CK). [Conclusion] HPP is significantly superior to PS, US, and MS treatments in maintaining the color, vitamin C, and flavor of pomegranate juice.

基金项目: 河南省职业教育精品在线开放课程“分析化学”项目(编号: 2023082)

通信作者: 谷俊华(1983—), 女, 许昌职业技术学院副教授, 硕士。E-mail: gjh1245@163.com

收稿日期: 2025-04-11 改回日期: 2025-10-31

引用格式: 谷俊华, 邢晓轲. 杀菌方式对石榴汁理化特性及挥发性物质含量的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(2): 175-183.

Citation: GU Junhua, XING Xiaoke. Effects of different sterilization methods on the physicochemical properties and volatile compounds of pomegranate juice[J]. Food & Machinery, 2026, 42(2): 175-183.

anthocyanins and other phenolics, and major flavor compounds of pomegranate juice, while effectively inhibiting the formation of undesirable flavors (e.g., furan compounds). HPP is a highly promising sterilization technology for improving the quality of pomegranate juice.

Keywords: pomegranate juice; pasteurization; ultrasound; high-pressure processing; microwave; physicochemical property; bioactive compound; volatile compound

石榴(*Punica granatum* L.)种植遍及中国华北、中部和西南地区的广大地区。2020年中国石榴种植面积便达到12万 hm^2 ,产量达100万 $\text{t}^{[1]}$ 。石榴果实集食用、药用和观赏于一体,富含多酚类化合物、维生素C和矿物质,具有抗氧化、抗炎和降血脂等多种健康益处^[2]。石榴果实除鲜食外,常被加工成果汁、果酒等产品,深受消费者喜爱。然而,石榴汁在加工和贮藏过程中易发生微生物污染、营养成分降解和风味劣变等问题,限制了其产业发展。

目前,石榴汁产品主要采用巴氏杀菌法(pasteurization, PS; 75~85 $^{\circ}\text{C}$, 10~15 min)进行商业杀菌,这种方法有效延长了石榴汁的保质期。然而,巴氏杀菌法在杀菌的同时,可能会导致石榴汁风味流失,影响其感官特性,此外,石榴汁中丰富的花青素类物质,如矢车菊素-3-O-葡萄糖苷(C3G)等易受热分解,也会导致其色泽劣变和营养成分损失^[3]。为了克服传统热处理的弊端,新型热力学效应技术及非热加工技术应运而生并受到广泛关注,它们在保持果汁原有营养成分和感官特性方面展现出良好潜力^[4]。例如,微波杀菌(microwave sterilization, MS)是一种优良的果汁热处理技术,其热量源自特定辐射频率下介电材料的电磁相互作用。与PS相比,该技术能够在短时间内灭活酶并杀死微生物,同时最大限度地减少营养物质损失。李根等^[5]研究发现,与传统加热方法相比,MS处理苹果汁的色差值(ΔE)较低,并且MS处理显著提高了苹果汁中维生素C含量,并提升了果汁的抗氧化能力。相较于热处理,目前非热处理技术在保持果汁营养及感官品质上具有更好的优势。例如超声波(ultrasonication, US)处理作为一种典型的非热技术,主要利用其空化效应和机械效应达到杀菌目的。与PS处理相比,US处理提升了橘子汁可滴定酸度、总可溶性固形物、总酚及抗坏血酸含量,并改善了果汁的均匀性,提升了其营养和感官品质^[6]。此外,超高压处理(high-pressure processing, HPP)是另一种广泛应用的果汁非热杀菌技术,它在常温或低温下通过施加超静压破坏微生物细胞结构并钝化酶活性,从而有效杀灭细菌和酵母。Yuan等^[7]研究证实,HPP处理不仅能有效降低石榴汁中的微生物数量(菌落总数 $<1\text{ CFU/mL}$),还能更好地保持其天然色泽,提高总花青素含量,并显著抑制多酚氧化酶(PPO)及过氧化物酶(POD)活性,从而减少品质劣变。尽管上述杀菌技术在各类果汁加工中已显示出其在营养保留和品质维持方面的优势,但针对石榴汁这一富含独特

风味及酚类物质的复杂体系,系统性地比较这些不同原理的杀菌方式对其理化特性及挥发性成分影响的研究尚不全面。

研究拟对比分析PS、US、HPP及MS对石榴汁理化性质及香气成分的影响,比较不同杀菌技术对石榴汁品质的保留效果,旨在为筛选较为适合于石榴汁的杀菌方式提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

乙醇、氢氧化钠、福林酚、1,1-二苯基-2-三硝基苯胍(1,1-diphenyl-2-picryl-hydrazyl radical, DPPH)等:分析纯,天津科密欧试剂有限公司;

甲醇、甲酸、乙腈、3-壬酮、没食子酸、原儿茶酸、对羟基苯甲酸、咖啡酸、鞣花酸、儿茶素、石榴皮鞣素、矢车菊素-3-O-葡萄糖苷(C3G)、矢车菊素-3,5-O-双葡萄糖苷(C3G-3,5-diglc)等标准品:色谱纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

榨汁机: MJ-WJE2802D型,美的集团股份有限公司;

超声波处理器: Scientz-II D型,宁波新芝生物科技股份有限公司;

超高压处理机: HPP-600型,包头科发高压科技有限责任公司;

微波炉: PJ21C-BF型,美的集团股份有限公司;

色差计: CR-400型,日本柯尼美能达公司;

紫外分光光度计: UV-8000型,上海元析仪器有限公司;

气相色谱-质谱联用仪: 7890A-5975C型,安捷伦科技(中国)有限公司;

高效液相色谱仪: LC-20A型,日本岛津公司。

1.2 试验方法

1.2.1 果汁制备及杀菌处理 ‘突尼斯’软籽石榴购自当地农贸水果市场,选择新鲜、成熟的石榴,确保其无病虫害和损伤。手动将石榴去皮,取出石榴籽进行榨汁处理。将榨出的石榴汁通过3层纱布过滤,去除果渣和固体颗粒,以获得石榴浊汁(约5 L)。将所获石榴汁平均分为5份(对照组、PS组、US组、HPP组及MS组),置于4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中保存,以待后续杀菌处理。

未处理对照组石榴汁记为CK。对石榴汁(200 mL)进行不同的杀菌处理,各条件经过前期预试验验证均能

够有效杀灭微生物,使石榴汁中总菌落数 <100 CFU/mL。PS条件^[6]:将石榴汁预热至 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ (10 min)并在 $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下处理 5 min ,PS处理后,将果汁在冰浴中冷却,并保存于无菌PET瓶中;US条件^[6]:将超声波探头置于盛放石榴汁的锥形瓶中央,超声频率 40 kHz ,功率 750 W ,处理温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$,处理时间 20 min ;HPP条件^[7]:石榴果汁置于PET瓶中,并放入 10 L 压力容器中,置于超高压仪器中以 550 MPa 的压力处理 10 min (室温);MS条件^[5]:将盛放石榴汁的锥形瓶置于微波炉中,处理功率 800 W ,处理时间 30 s ,处理结束后立即进行冰浴并冷却至室温。前期预试验表明, $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温贮藏条件下,所有方式杀菌处理的NFC石榴汁的保质期均超过4周。

1.2.2 可溶性固形物(TSS)、pH及可滴定酸(TA)含量测定

(1) TSS含量:利用手持式TSS测定仪测定。

(2) pH:利用pH计测定。

(3) TA含量:按GB 12456—2021中的电位滴定法执行。

1.2.3 色泽参数测定 石榴汁的亮度值(L^*),红色值(a^*)及黄色值(b^*)利用色差计进行测定,按式(1)计算色差值(ΔE)^[7]。

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}, \quad (1)$$

式中:

ΔE ——杀菌处理前后石榴汁色差值;

ΔL^* ——杀菌处理前后石榴汁亮度值差;

Δa^* ——杀菌处理前后石榴汁红色值差;

Δb^* ——杀菌处理前后石榴汁黄色值差。

1.2.4 维生素C、总酚及总花青素含量测定

(1) 维生素C(V_C)含量:按GB/T 15038—2006中的2,6-二氯酚酚滴定法执行。

(2) 总酚(TPC)含量:采用福林酚比色法^[8],结果以没食子酸当量表示(mg/100 mL)。

(3) 总花色苷(TAC)含量:采用pH示差法测定^[8],结果以C3G当量表示(mg/100 mL)。

1.2.5 体外抗氧化能力测定 石榴汁体外抗氧化能力以DPPH自由基清除能力及铁离子还原力(ferric ion reducing antioxidant power, FRAP)表示,具体测定步骤参照文献[9]。

1.2.6 单体酚类物质含量测定 利用高效液相色谱法对石榴汁中单体酚类物质进行分析。石榴汁离心后($8\ 000\text{ r/min}$, 15 min)取上清液,经由 $0.22\ \mu\text{m}$ 水微米滤膜过滤后上机分析。具体仪器参数参照文献[10]。

1.2.7 香气成分含量测定 采用气相色谱—质谱联用技术(GC-MS)对石榴汁的香气成分进行了测定。具体操作步骤及仪器参数参照文献[11]。数据处理与化合物鉴

定:采用自动质谱解卷积与识别系统软件进行数据分析。通过将各色谱峰的质谱图及其保留指数(RI)与NIST 17质谱数据库中的标准谱图和RI值进行比对,实现对石榴汁中挥发性化合物的鉴定。半定量分析:设置3-壬酮作为内标物进行半定量分析。

1.2.8 数据分析 所有数据以3个独立试验的平均值±标准差表示,采用SPSS 18.0软件对数据进行单因素方差分析及邓肯差异显著性分析, $P<0.05$ 表示差异显著,利用Origin 2022进行香气成分含量聚类热图分析。

2 结果与分析

2.1 对石榴汁理化特性的影响

不同杀菌方式(PS、US、HPP及MS)下石榴汁TSS、TA、pH及色泽参数的变化如表1所示。与CK组相比,不同处理条件对石榴汁TSS含量的影响较小,仅在US处理组($13.78\text{ }^{\circ}\text{Brix}$)中观察到明显的升高趋势($P<0.05$),可能是由于超声波的空化效应促进了石榴汁中难溶性物质(螯合态果胶等)转化为可溶性物质,提高了TSS含量^[12]。此外,石榴汁经PS处理后TA含量显著提高($P<0.05$),其原因可能为加热促进了水溶性果胶的降解^[12]。4种处理方式均未对石榴汁的pH值产生显著影响($P>0.05$),PS处理略微降低了果汁的pH值,这与处理后TA含量升高相对应。试验发现,在热加工过程中,尤其是在酸性条件下(如果汁的天然pH环境),果胶糖苷键会发生水解断裂,导致果胶分子解聚,释放出游离的半乳糖醛酸单体或寡聚体。由于半乳糖醛酸本身含有羧基,它的释放会使得果汁中可滴定的酸性基团数量增加,从而表现为总酸含量的升高,致使其pH值下降^[12]。

不同处理方式对石榴汁的色泽参数有明显影响。CK组的 L^* 与 a^* 值最高, b^* 值最低,与CK组相比,PS处理组的 L^* 值提高了 20.66% ,反映出加热处理可能导致部分色素分解,从而提升了果汁的亮度;相较而言,HPP、US及MS处理对 L^* 值的影响较小。此外,PS处理显著降低了石榴汁的 a^* 值。相较于PS处理而言,石榴汁经US、HPP及MS处理后其 a^* 值分别提高了 27.32% , 22.96% , 19.87% 。虽然MS处理组也经过了较高温度处理,但其较高的热效率缩短了处理时间,这可能提高了花青素类物质的保留^[13]。类似的是,PS处理也显著提高了石榴汁的 b^* 值。此外,相较于PS处理组,US、HPP及MS处理组石榴汁的 b^* 值变化较小。试验发现,石榴汁经PS处理后,其 a^* 值会降低。 a^* 值降低是由于花青素的降解或聚合。而经HPP处理后其 ΔE 值均低于 1.6 ,难以凭肉眼观察到颜色变化。此外, ΔE 值的变化进一步证实了高温处理组(PS及MS)对石榴汁色泽的显著影响,其 ΔE 值较高,分别为 4.82 和 2.15 ,而US和HPP处理组的色差值相对较小,分别为 1.54 和 1.77 。

表 1 杀菌方式对石榴汁理化特性的影响[†]

Table 1 Effects of sterilization methods on the physicochemical properties of pomegranate juice

杀菌方式	TSS/°Brix	TA/(mg·mL ⁻¹)	pH	L*	a*	b*	ΔE
CK	13.22±0.08 ^b	11.92±0.11 ^b	3.37±0.08	7.89±0.04 ^d	16.82±0.08 ^a	0.52±0.03 ^d	—
PS	13.26±0.12 ^b	12.37±0.08 ^a	3.19±0.09	9.52±0.05 ^a	12.37±0.09 ^e	1.38±0.03 ^a	4.82±0.08 ^a
US	13.78±0.07 ^a	11.98±0.03 ^b	3.39±0.07	8.78±0.03 ^b	15.75±0.11 ^b	1.17±0.02 ^c	1.54±0.03 ^d
HPP	13.31±0.09 ^b	11.88±0.07 ^b	3.35±0.09	8.12±0.05 ^{cd}	15.21±0.08 ^c	1.23±0.02 ^b	1.77±0.03 ^c
MS	13.29±0.13 ^b	12.11±0.13 ^{ab}	3.41±0.08	8.21±0.04 ^c	14.83±0.06 ^d	1.28±0.03 ^b	2.15±0.04 ^b

† 同列小写字母不同代表数据具有显著性差异($P<0.05$)。

2.2 对石榴汁维生素 C、总酚、总花色苷含量及抗氧化能力的影响

不同杀菌处理对石榴汁中 V_c、TPC、TAC 含量及抗氧化能力的影响如表 2 所示。CK 组的各项指标均为最高 (V_c、TPC 和 TAC 含量分别为 26.38, 178.95, 25.97 mg/100 mL; DPPH 自由基清除能力及 FRAP 还原力分别为 92.34%, 88.52%), 表明天然石榴汁中富含功能活性成分, 并具有较强的抗氧化能力。相比之下, PS 处理对石榴汁的影响最为显著 ($P<0.05$), 其 V_c、TPC 和 TAC 含量均显著降低, 其含量较 CK 组分别下降了 72.14%, 23.12%, 72.16%, DPPH 自由基清除能力和 FRAP 还原力也大幅降低, 分别为 72.82%, 67.82%。这主要是 PS 为热处理, 会导致抗氧化成分降解, 尤其是 V_c 和花色苷具有较高的热敏性, 容易在高温条件下发生降解^[7]。US 处理后的石榴汁尽管 V_c 含量 (18.82 mg/100 mL) 和抗氧化能力 (DPPH 83.18%, FRAP 75.37%) 较 CK 组有所下降, 但仍明显高于 PS 处理组, 表明 US 处理对 V_c 和花色苷的保留效果较好, 这可能与非热加工方式下活性物质保留率较

高的特性有关^[3], 有助于抗氧化成分的保留。HPP 处理对抗氧化成分保留效果较为理想, V_c、TPC 和 TAC 含量均次于 CK 组, 但显著高于其他处理组, DPPH 和 FRAP 抗氧化能力也较接近 CK 组, 分别为 87.55%, 82.11%, 这与高压处理可在低温条件下抑制氧化酶活性, 减少抗氧化成分降解的特性一致^[7]。类似的研究^[14]表明, HPP 处理不会导致苹果汁中 V_c 的明显降解。此外, V_c 具有极高的热敏性, 高温瞬时杀菌 (95 °C, 10 s) 处理后石榴汁中总 V_c 含量下降 40% 以上^[7]。MS 处理组则表现出与 US 处理组相近的效果, V_c 和 TAC 含量均高于 PS 组, 但低于 HPP 组, 表明 MS 通过瞬间高热作用使部分抗氧化成分降解, 但降解程度低于 PS 组。此外, Yuan 等^[7]研究表明, 加工处理后石榴汁中 V_c 与花青素含量具有显著相关性, 一般认为在含有 V_c 的果汁体系中, 花青素降解主要是由于 V_c 直接缩合在花青素分子的 4 号碳原子上, 而 V_c 降解过程中产生的过氧化氢和活性氧会提高花青素的降解速率。因此, HPP 处理能更好地保留石榴汁中的抗氧化成分, US 和 MS 次之, 而 PS 处理对抗氧化成分的影响最大。

表 2 杀菌方式对石榴汁理化特性的影响[†]

Table 2 Effects of sterilization methods on the physicochemical properties of pomegranate juice

杀菌方式	V _c /(10 ⁻² mg·mL ⁻¹)	TPC/(10 ⁻² mg·mL ⁻¹)	TAC/(10 ⁻² mg·mL ⁻¹)	DPPH/%	FRAP/%
CK	26.38±0.32 ^a	178.95±3.15 ^a	25.97±0.85 ^a	92.34±1.35 ^a	88.52±2.19 ^a
PS	7.35±0.18 ^d	137.57±2.89 ^e	7.23±0.23 ^d	72.82±0.86 ^e	67.82±1.82 ^d
US	18.82±0.53 ^c	157.68±3.22 ^e	18.85±0.78 ^c	83.18±1.21 ^c	75.37±1.76 ^c
HPP	22.18±0.37 ^b	167.33±4.13 ^b	20.56±0.71 ^b	87.55±1.24 ^b	82.11±1.87 ^b
MS	18.37±0.44 ^c	149.37±2.18 ^d	17.24±0.63 ^c	79.23±0.97 ^d	76.28±0.96 ^c

† 同列小写字母不同代表数据具有显著性差异($P<0.05$)。

2.3 对石榴汁酚类物质含量的影响

各处理方式对酚酸类、黄酮类及花色苷类物质含量具有显著影响。对于酚酸类物质, 没食子酸及原儿茶酸含量较高, 是石榴汁中主要的酚酸类物质, 能够赋予石榴汁极高的抗氧化活性。CK 组没食子酸、对羟基苯甲酸、咖啡酸及鞣花酸含量最高, 而经 PS 处理后, 4 种成分的含量均呈下降趋势 (下降了 6.90%~47.47%), 这可能归因于

加热过程中的酚类物质的氧化与降解效应^[15]。此外, 鞣花酸及没食子酸下降幅度最高, 可能与酚类物质的结构有关。酚酸类物质 (如没食子酸、对羟基苯甲酸) 的酯键或糖苷键在高温下易水解。例如, 鞣花酸 (由没食子酸聚合而成) 可能因酯键断裂分解为更小分子。此外, 高温加速氧化反应, 尤其是含邻苯二酚结构的酚酸 (如咖啡酸)。氧自由基攻击酚羟基, 导致醌类物质形成, 进一步聚合或

分解为小分子^[16]。与PS及MS处理组相比,US和HPP处理对酚酸的影响较小,尤其是US处理保持了较高含量的没食子酸及咖啡酸,HPP处理保持了较高含量的对羟基苯甲酸及鞣花酸,说明US和HPP在较低温度条件下对酚酸类化合物的破坏较少。

石榴汁中富含黄酮类物质如儿茶素及石榴皮鞣素,CK组的儿茶素和石榴皮鞣素含量分别为3.39,37.85 mg/100 mL,显示出天然状态下石榴汁中较高的黄酮含量。PS和MS处理显著降低了这两种黄酮类化合物的含量,尤其是石榴皮鞣素在经PS及MS处理后含量分别下降了58.18%,44.12%,说明加热处理对黄酮类化合物的影响较大,这可能是由于黄酮结构中的羟基在高温下易被破坏^[17]。相比之下,US和HPP处理在保留黄酮类物质上具有一定优势,US处理组中儿茶素含量为3.12 mg/100 mL,而HPP处理组中的石榴皮鞣素含量仍保持较高水平(28.49 mg/100 mL),表明这些非热或低热处理方式能更好地保留黄酮类物质的结构完整性。

石榴汁的显著抗氧化性和特征色泽主要归功于其所含的花色苷类物质。相关研究^[18]表明,石榴果实中含量最丰富的花青素是C3G和C3G-3,5-diglc,约占对照样品中总花青素的80%以上,是石榴汁中最主要的花青素。CK组的C3G和C3G-3,5-diglc含量最高,分别为15.89,7.81 mg/100 mL。然而,PS处理对这类热敏性化

合物的破坏较大,C3G含量大幅下降至3.18 mg/100 mL,这也与Yuan等^[7]的研究结果一致。研究^[19]表明,石榴汁经热处理后花色苷含量显著降低了40%以上。US和HPP处理则对花色苷的保留效果较好,尤其是HPP处理后C3G-3,5-diglc仍达到5.17 mg/100 mL,可能是由于HPP在较低温度条件下发挥作用,避免了热敏性花色苷的大幅降解。相比之下,MS处理虽然在局部高温作用下对花色苷有一定破坏,但其影响不及PS显著。在不同处理方式下,石榴汁中两种花色苷表现出不同的稳定性和含量变化。这种差异主要归因于它们的分子结构差异,尤其是糖苷化位点的不同,导致在加工过程中对热和压力的耐受性存在显著差异^[20]。相比之下,US和HPP处理对C3G的降解影响相对较小,HPP处理后仍保留了较高的C3G含量(保留率为67.02%),表明非热处理能够更好地保留这种单糖苷的结构完整性和功能性。C3G-3,5-diglc属于二糖苷,额外的糖基结构不仅提供了更强的空间位阻效应,还能在一定程度上增加花色苷分子的稳定性,减少高温或氧化处理带来的分解^[20]。研究^[21]表明,适宜压强下HPP处理能够最大程度减少果汁中花青素的降解,但高压强HPP处理则会显著提高花青素的降解。因此,尽管在PS处理下,C3G-3,5-diglc的含量也有所下降,但其降解幅度比C3G要小,显示了更高的热稳定性。

表3 杀菌方式对石榴汁酚类物质含量的影响[†]

杀菌方式	没食子酸	原儿茶酸	对羟基苯甲酸	咖啡酸	鞣花酸	儿茶素	石榴皮鞣素	C3G	C3G-3,5-diglc
CK	40.35±0.48 ^a	13.52±0.11 ^c	3.19±0.12	2.72±0.04 ^a	4.34±0.12 ^a	3.39±0.13 ^a	37.85±0.43 ^a	15.89±0.24 ^a	7.81±0.07 ^a
PS	32.27±0.38 ^c	13.75±0.15 ^c	2.97±0.08	2.15±0.08 ^b	2.28±0.09 ^c	2.85±0.08 ^b	15.83±0.38 ^c	3.18±0.15 ^c	2.18±0.06 ^d
US	37.55±0.32 ^b	15.55±0.17 ^a	2.96±0.11	2.32±0.04 ^b	3.27±0.11 ^c	3.12±0.07 ^{ab}	25.68±0.33 ^c	8.56±0.11 ^c	4.17±0.08 ^c
HPP	36.87±0.36 ^b	14.37±0.18 ^b	3.12±0.11	2.18±0.08 ^b	3.78±0.14 ^b	3.28±0.12 ^a	28.49±0.28 ^b	10.65±0.12 ^b	5.17±0.08 ^b
MS	37.21±0.43 ^b	13.88±0.14 ^c	3.09±0.08	2.27±0.07 ^b	2.78±0.16 ^d	2.88±0.11 ^b	21.15±0.21 ^d	6.21±0.08 ^d	3.86±0.06 ^c

[†] 同列小写字母不同代表数据具有显著性差异($P<0.05$)。

2.4 对石榴汁香气物质含量的影响

不同处理条件下石榴汁中的香气成分含量变化如表4所示,共检测到31种香气成分,其中8种醇类、6种醛类、3种酯类、3种酸类、4种呋喃类及7种萜烯类。醇类、醛类及萜烯类总体含量较高,是石榴汁中主要的香气成分,与Lu等^[22]的研究结果一致。

石榴汁中的醇类物质包括乙醇、1-戊醇、1-己醇及3-己烯-1-醇等,主要赋予石榴汁酒香、果香及泥土味等复杂的香气特征。相关研究^[22]表明,3-己烯-1-醇是对石榴果汁整体香气贡献最大的挥发性物质之一。对照组(CK)中,醇类物质的总含量为110.07 μg/L。HPP处理后,醇类物质的总含量下降至91.12 μg/L(下降了17.29%),显示

HPP对醇类的保留效果较好。相比之下,PS、US及MS处理使总醇类物质含量分别减少了43.81%,31.62%,33.28%。Yikmis等^[23]研究表明,醇类物质是石榴汁中最丰富的香气成分,经PS处理后的石榴汁中醇类物质含量明显降低,与试验结果一致。在所检测到的醇类物质中,乙醇、1-己醇、3-己烯-1-醇含量较高,在鲜石榴汁中的含量分别达到了27.56,38.65,15.66 μg/L。在对比各处理方式下的乙醇含量时,HPP和CK组中的乙醇含量较高,而PS和US处理显著降低了乙醇含量。这一现象可能是加热和超声处理下,乙醇会发生挥发或转化为醛类或酯类化合物^[7]。此外,HPP处理可能在低温条件下保留了部分易挥发醇类物质,因而其含量接近对照组。1-己醇和庚醇等

表 4 杀菌方式对石榴汁香气成分含量的影响†

Table 4 Effects of sterilization methods on the aroma content of pomegranate juice μg/L

种类	香气成分	CK	PS	US	HPP	MS	香气描述 ^[22,24]
醇类	乙醇	27.56±0.57 ^a	13.57±0.35 ^d	18.55±0.75 ^b	28.65±0.23 ^a	16.78±0.76 ^c	酒味、甜味
	2-甲基-1-丙醇	3.48±0.16 ^a	2.58±0.21 ^b	3.28±0.13 ^a	3.45±0.12 ^a	3.19±0.18 ^a	酒味
	1-戊醇	2.89±0.13 ^b	1.89±0.09 ^c	3.45±0.21 ^a	3.58±0.21 ^a	2.87±0.23 ^b	果味
	1-己醇	38.65±0.48 ^a	25.37±0.75 ^d	30.28±0.73 ^c	33.27±0.85 ^b	31.28±0.86 ^{bc}	香蕉味、花香味
	庚醇	8.26±0.18 ^a	6.38±0.37 ^{bc}	7.15±0.42 ^b	5.89±0.25 ^c	6.75±0.16 ^b	泥土味、霉味
	3-己烯-1-醇	15.66±0.92 ^a	8.67±0.42 ^d	10.21±0.37 ^c	12.53±0.27 ^b	8.69±0.19 ^d	草味、果味
	松油烯-4-醇	3.18±0.18 ^a	2.87±0.15 ^a	2.18±0.13 ^b	3.27±0.13 ^a	3.12±0.26 ^a	泥土味、霉味
	苯乙醇	0.39±0.02 ^c	0.57±0.03 ^b	0.23±0.01 ^d	0.48±0.02 ^b	0.83±0.05 ^a	蜂蜜味、甜味
醛类	乙醛	13.56±0.68 ^c	15.37±0.27 ^b	10.28±0.55 ^c	16.68±0.82 ^a	12.69±0.24 ^d	青苹果味
	2-甲基丁醛	22.38±0.85 ^a	14.96±0.45 ^d	17.65±0.86 ^{bc}	18.68±0.85 ^b	16.53±0.52 ^c	霉味、咖啡味
	3-甲基丁醛	35.66±0.96 ^a	22.18±0.76 ^d	24.67±0.76 ^c	28.67±0.73 ^b	23.67±0.87 ^c	霉味
	苯甲醛	12.18±0.55 ^b	15.76±0.29 ^a	10.58±0.24 ^c	15.83±0.37 ^a	12.69±0.31 ^b	苦杏仁味
	3-甲基苯甲醛	7.34±0.68 ^a	5.18±0.33 ^b	6.55±0.28 ^a	5.34±0.28 ^b	5.67±0.28 ^b	甜味、果味
	(E)-2-癸烯醛	15.89±0.58 ^a	8.68±0.42 ^c	11.37±0.43 ^b	15.34±0.28 ^a	9.66±0.76 ^c	花香味、橙子味
酯类	(Z)-3-己烯基乙酸酯	4.56±0.49 ^a	2.83±0.03 ^c	3.12±0.28 ^{bc}	3.55±0.11 ^b	2.89±0.16 ^c	果味、花香味
	苯甲酸甲酯	19.37±0.33 ^a	12.85±0.28 ^c	12.75±0.46 ^c	15.67±0.85 ^b	14.27±0.39 ^b	杏仁味、花香味
	乙酸乙酯	72.88±0.78 ^a	42.38±1.32 ^c	50.68±1.73 ^c	58.69±0.86 ^b	46.38±1.26 ^d	果味
酸类	乙酸	13.18±0.39 ^a	11.18±0.23 ^b	12.32±0.56 ^{ab}	12.78±0.38 ^a	10.55±0.38 ^b	醋味
	2-甲基丙酸	15.66±0.48 ^a	14.14±0.18 ^{ab}	13.55±0.68 ^b	15.56±0.76 ^a	14.39±0.37 ^a	甜味、奶酪味
	2-甲基丁酸	1.38±0.08 ^c	1.55±0.15 ^a	1.32±0.15 ^{ab}	1.25±0.08 ^b	1.18±0.13 ^b	辛辣味、酸味
呋喃类	3-甲基糠醛	ND	12.33±0.44 ^a	2.13±0.04 ^c	0.38±0.02 ^d	8.83±0.28 ^b	面包味、杏仁味
	乙酰呋喃	ND	15.37±0.37 ^a	2.18±0.03 ^c	0.64±0.04 ^d	5.39±0.36 ^b	焦糖味、咖啡味
	5-甲基糠醛	ND	22.97±0.67 ^a	6.57±0.27 ^c	ND	8.53±0.65 ^b	甜味、苦味
	四氢-2-呋喃酮	0.28±0.01 ^d	3.55±0.04 ^a	1.31±0.21 ^c	0.31±0.03 ^d	1.82±0.17 ^b	奶油味
萜烯类	α-松油醇	23.68±0.76 ^a	13.58±0.38 ^d	15.66±0.78 ^c	18.55±0.82 ^b	12.11±0.67 ^d	松树味、柠檬味
	薄荷酮	6.38±0.49 ^a	3.18±0.27 ^d	4.28±0.43 ^c	5.18±0.18 ^b	3.28±0.17 ^d	薄荷味
	香芹酮	2.49±0.22 ^a	2.09±0.15 ^b	2.37±0.28 ^{ab}	2.51±0.11 ^a	1.53±0.16 ^c	薄荷味、甘草味
	柏木烯	7.68±0.38 ^d	5.27±0.49 ^b	5.76±0.37 ^b	5.63±0.09 ^b	5.82±0.34 ^b	松树味
	柠檬烯	42.18±0.76 ^a	31.28±0.83 ^c	35.59±0.98 ^b	40.28±1.23 ^a	32.38±1.08 ^{bc}	柑橘味、甜味
	β-月桂烯	15.88±0.53 ^a	9.18±0.52 ^c	12.38±0.54 ^b	15.68±0.96 ^a	9.08±0.37 ^c	泥土味、霉味
	β-石竹烯	2.18±0.14 ^a	2.58±0.21 ^a	0.89±0.06 ^c	1.37±0.04 ^b	2.31±0.11 ^a	木头味

† 同行小写字母不同代表数据具有显著性差异(P<0.05)。

带有香蕉香气的长链醇在加热处理后显著减少,可能与热降解作用相关,或是这些醇类物质被氧化转化为相应的醛类或酯类化合物^[13]。超声处理也减少了醇类物质的含量,这可能与超声波引起的分子破坏和挥发性化合物的散失有关。

醛类物质通常是通过脂质氧化或醇类的氧化转化生成的,而不同处理方式对这些醛类的影响也各不相同。在 PS 和 HPP 处理下,石榴汁中乙醛和苯甲醛等低相对分子质量醛类的含量增加,这可能是因为高温或高压条件下脂质氧化速率提升,促进了这些醛类物质的生成^[23]。

特别是在 PS 处理下,较高的温度会加速脂肪酸的降解,从而增加了脂肪酸降解产物(乙醛和苯甲醛)的生成。US 处理对醛类物质的影响相对温和,可能是由于 US 处理的时间较短且温度不高,使得醛类物质的转化速率较低。然而,较强的声能可能会导致部分醛类物质挥发性损失或转化为其他氧化产物,如酸类。此外,相较于 PS 处理组,其他 3 种处理均能够提高醛类物质的保留,特别是 HPP 处理显著提高了总醛类物质含量(提高了 28.50%)。

酯类物质通常赋予石榴汁果香、花香和杏仁香气。不同处理方式对酯类物质含量具有明显影响。CK 组中

酯类物质的总含量最高为 96.81 μg/L。PS、US、HPP 及 MS 处理后总酯类含量分别下降了 40.03%, 31.26%, 19.52%, 34.37%, PS 处理组总酯类物质含量下降最为明显, 这种剧烈的减少可能是 PS 处理中的高温导致酯类物质的热降解及挥发^[24]。在所检测到的酯类物质中, 乙酸乙酯含量较高。在 HPP 和 US 处理下, 乙酸乙酯等酯类物质的含量相对较高, 可能是因为这些处理方式温度较低, 其降解速率较慢。酸类物质(如乙酸、2-甲基丙酸和 2-甲

基丁酸)赋予石榴汁酸味、辛辣和醋味等特征。这些酸类化合物的变化受到不同处理方式的显著影响。在 PS 和 US 处理下, 乙酸等酸类物质含量减少, 可能是因为加热和超声处理加速了酸类化合物的挥发。HPP 处理对酸类物质的影响相对较小, 可能是因为低温条件下酸类物质的挥发性较低。此外, PS 组的高温处理可能导致酸类物质脱水反应, 进一步生成其他降解产物。总体而言, 不同处理方式对酸类物质含量的影响较小, 表明石榴汁中的酸

表 5 杀菌方式对对石榴汁香气成分种类数量及含量的影响[†]

Table 5 Effects of sterilization methods on the types, quantities, and contents of aroma components in pomegranate juice

种类	CK		PS		US		HPP		MS	
	数量	含量/ (μg·L ⁻¹)	数量	含量/ (μg·L ⁻¹)	数量	含量/ (μg·L ⁻¹)	数量	含量/ (μg·L ⁻¹)	数量	含量/ (μg·L ⁻¹)
醇类	8	110.07±3.68 ^a	8	61.90±2.58 ^d	8	75.33±4.15 ^c	8	91.12±4.28 ^b	8	73.51±3.17 ^c
醛类	6	107.01±5.37 ^a	6	75.13±4.32 ^d	6	78.10±3.76 ^c	6	96.54±5.67 ^b	6	76.91±4.18 ^{cd}
酯类	3	96.81±5.18 ^a	3	58.06±4.37 ^d	3	66.55±4.66 ^c	3	77.91±4.27 ^b	3	63.54±5.37 ^{cd}
酸类	3	30.22±1.28 ^a	3	26.87±1.39 ^{bc}	3	27.19±1.87 ^{bc}	3	29.59±1.12 ^b	3	26.12±0.95 ^c
呋喃类	1	0.28±0.01 ^e	4	54.22±3.57 ^a	4	12.19±0.79 ^c	3	1.33±0.02 ^d	4	24.57±1.83 ^b
萜烯类	7	100.47±7.56 ^a	7	67.16±5.34 ^d	7	76.93±4.12 ^c	7	89.20±4.64 ^b	7	66.51±4.14 ^d
合计	28	444.86±23.57 ^a	31	343.34±13.83 ^c	31	336.29±15.67 ^c	30	385.69±17.34 ^b	31	331.16±14.88 ^c

[†] 同行小写字母不同代表数据具有显著性差异(P<0.05)。

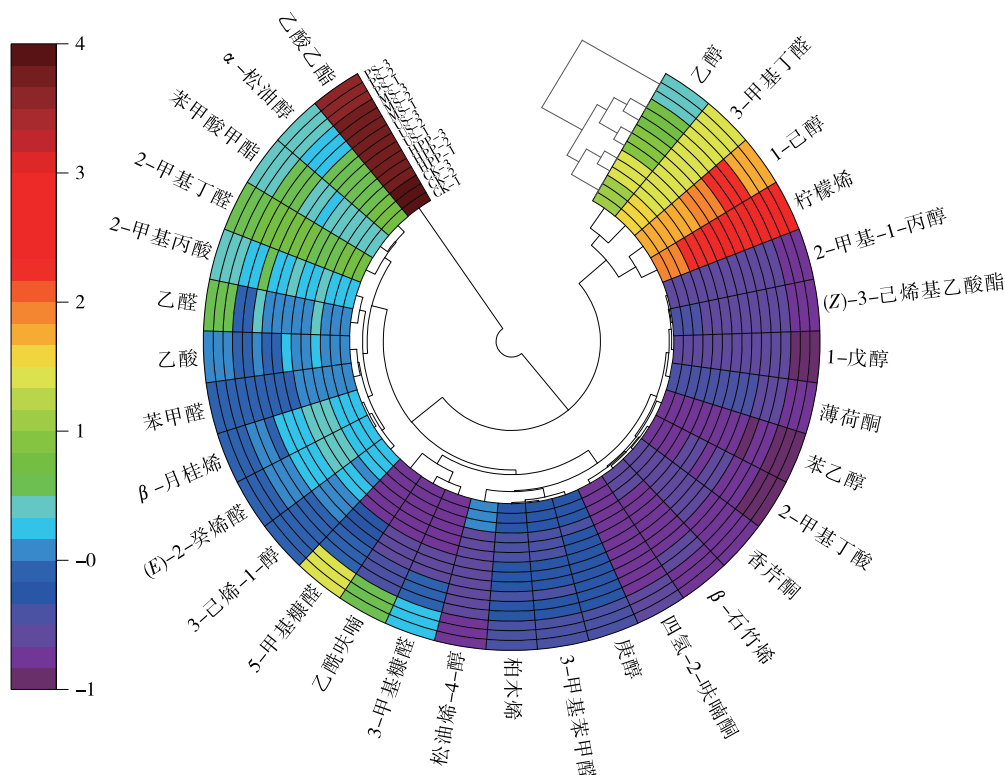


图 1 不同杀菌条件下石榴汁香气成分的聚类热图

Figure 1 Cluster heatmap of the aroma composition of pomegranate juice under different treatment conditions

类香气成分较为稳定。

鲜石榴汁中呋喃类物质含量极低,其总呋喃类物质含量仅为 0.28 $\mu\text{g/L}$,呋喃类物质赋予石榴汁面包味、焦糖味和杏仁味。呋喃类化合物的生成通常与美拉德反应和热解反应有关。PS 及 MS 处理显著增加了呋喃类物质的含量,总呋喃类物质含量分别达到了 54.22, 24.57 $\mu\text{g/L}$,可能是高温促进了糖类与氨基酸的美拉德反应和焦糖化反应,从而生成更多的呋喃类化合物^[25]。此外,超声波处理也在一定程度上促进了呋喃类物质的生成,可能与超声波导致的局部高温和自由基产生有关,从而加速了美拉德反应。HPP 处理下石榴汁的呋喃类化合物含量最低,这与其温度较低抑制了美拉德反应有关。萜烯类化合物赋予石榴汁松香、柠檬香和泥土香等香气。这些化合物的变化与挥发性和氧化过程密切相关。CK 组中,萜烯类物质总含量为 100.47 $\mu\text{g/L}$,PS 及 US 处理后总萜烯类物质含量下降最为明显。与 PS 组相比,US 及 HPP 处理显著提高了总萜烯类物质的含量(分别提高了 14.55% 及 32.82%)。在所检测到的萜烯类物质中 α -松油醇、柠檬烯及 β -月桂烯含量较高,是石榴汁中主要的萜烯类物质,这也与 Esposito 等^[26]的研究结果一致。不同处理条件下石榴汁中主要萜烯类物质含量的变化与总萜烯类物质含量变化趋势一致,即 HPP 处理能够更好地保留石榴汁的萜烯类物质。

研究^[22]表明,不同挥发性化合物的混合物,包括醇(己醇和(Z)-3-己烯醇)、醛(己醛)和萜烯(β -蒎烯、柠檬烯、 α -松油醇和 β -石竹烯),在石榴果实风味的形成中起着重要作用,这也与试验结果一致。它们提供的清香、木香、泥土香、果香、花香等风味共同构成了石榴汁独特的风味。聚类分析热图能够更直观地展示不同处理条件对石榴汁香气成分的影响,如图 1 所示,HPP 处理组与 CK 组可聚为一类,US 及 MS 处理组可聚为一类,PS 处理组单独为一类。总之,HPP 处理能够更好地保留石榴汁中的风味成分,降低不良风味(呋喃类物质)成分的产生。

3 结论

该研究系统评价了巴氏杀菌、超声波、超高压处理及微波杀菌 4 种杀菌方式对石榴汁关键理化特性以及挥发性风味成分的影响。结果表明,在所比较的技术中,超高压处理在综合保持石榴汁品质方面展现出最显著的优势。具体而言,超高压处理不仅有效保留了石榴汁的天然色泽(ΔE 值最低,为 1.77),最大限度地保护了维生素 C(含量为 22.18 mg/100 mL,较巴氏杀菌处理高出约 200%)和多种关键酚类化合物,如矢车菊素-3-O-葡萄糖苷和矢车菊素-3,5-O-双葡萄糖苷的保留率分别高达 67.02%, 66.20%。同时,超高压处理对石榴汁原有的醇、酯、萜烯类等主体风味物质的保留效果最佳,且显著抑制了巴氏

杀菌和微波杀菌处理中易产生的美拉德反应产物(如呋喃类不良风味物质)。相较之下,巴氏杀菌对石榴汁的色泽、酚类物质及风味成分均造成了最严重的负面影响。超声波和微波杀菌在部分指标上优于巴氏杀菌,但在整体品质保留方面仍不及超高压处理。超高压处理技术作为一种非热杀菌手段,在生产高品质、营养丰富、风味天然石榴汁方面具有巨大潜力,能够满足消费者对健康和天然食品日益增长的需求。

该研究初步揭示了不同杀菌方式对石榴汁品质的影响,未来仍需进一步系统研究这些处理对石榴汁在贮藏期间的品质稳定性(如酶活变化、沉淀形成、微生物控制长效性及货架期)的影响。此外,针对不同石榴品种的特性优化各杀菌工艺参数,并结合感官评价和经济成本分析,将是推动研究成果向实际应用转化的重要方向。

参考文献

- [1] PENG Y J, YUN Y R, ZOU W H, et al. Characterisation of colour, phenolics, and volatile compounds of six pomegranate varieties grown in Yunnan[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2025, 60(1): vvaf007.
- [2] GE S S, DUO L, WANG J Q, et al. A unique understanding of traditional medicine of pomegranate, *Punica granatum* L. and its current research status[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2021, 271: 113877.
- [3] CONIDI C, DRIOLI E, CASSANO A. Perspective of membrane technology in pomegranate juice processing: a review [J]. Foods, 2020, 9(7): 889.
- [4] HUANG H W, HSU C P, WANG C Y. Healthy expectations of high hydrostatic pressure treatment in food processing industry [J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2020, 28(1): 1-13.
- [5] 李根, 赵岩, 马寅斐, 等. 微波和巴氏杀菌对 NFC 苹果汁品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(8): 96-100.
LI G, ZHAO Y, MA Y F, et al. Effect of microwave sterilization and pasteurization on the quality of NFC apple juice[J]. Food Research and Development, 2019, 40(8): 96-100.
- [6] DE LIMA ALVES L, DOS SANTOS R L, BAYER B L, et al. Thermosonication of tangerine juice: effects on quality characteristics, bioactive compounds, and antioxidant activity [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(12): e14914.
- [7] YUAN L, CHENG F Y, YI J J, et al. Effect of high-pressure processing and thermal treatments on color and *in vitro* bioaccessibility of anthocyanin and antioxidants in cloudy pomegranate juice[J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131397.
- [8] 毕文, 戴明. 不同发酵方式对桑葚果酒酚类物质含量、香气成分及感官品质的影响[J]. 食品科技, 2024, 49(8): 101-109.
BI W, DAI M. Influence of different fermentation methods on

- the phenolics content, aroma composition and sensory quality of mulberry wine[J]. *Food Science and Technology*, 2024, 49(8): 101-109.
- [9] GENG Z H, WANG J, ZHU L C, et al. Metabolomics provide a novel interpretation of the changes in flavonoids during sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) drying[J]. *Food Chemistry*, 2023, 413: 135598.
- [10] LI T L, JIANG T, LIU N, et al. Biotransformation of phenolic profiles and improvement of antioxidant capacities in jujube juice by select lactic acid bacteria[J]. *Food Chemistry*, 2021, 339: 127859.
- [11] WANG Y, CUI M Y, ZHANG Q, et al. Enhancing blueberry wine aroma: insights from cultivar selection and berry sorting [J]. *Current Research in Food Science*, 2023, 7: 100643.
- [12] NAQASH F, MASOODI F A, AHMAD RATHER S, et al. Emerging concepts in the nutraceutical and functional properties of pectin—a review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 168: 227-239.
- [13] IJOD G, MUSA F N, ANWAR F, et al. Thermal and nonthermal pretreatment methods for the extraction of anthocyanins: a review[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(12): e17255.
- [14] RINALDI M, DHENGE R, RODOLFI M, et al. The effects of high-pressure processing pre-treatment on apple fruit for juice production[J]. *Foods*, 2024, 13(14): 2 182.
- [15] TEREFE N S, YANG Y H, KNOERZER K, et al. High pressure and thermal inactivation kinetics of polyphenol oxidase and peroxidase in strawberry puree[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2010, 11(1): 52-60.
- [16] ROCCHETTI G, GREGORIO R P, LORENZO J M, et al. Functional implications of bound phenolic compounds and phenolics-food interaction: a review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2022, 21(2): 811-842.
- [17] FU Y, LIU W N, SOLADOYE O P. Towards innovative food processing of flavonoid compounds: insights into stability and bioactivity[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 150: 111968.
- [18] TURAN E, ASLANTAS R, BILGIN J, et al. High-pressure homogenization of pomegranate juice: impact on physicochemical, antioxidant, antimicrobial, and in vitro bioaccessibility properties[J]. *Food Science & Nutrition*, 2024, 12(12): 10 315-10 329.
- [19] 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.
- [20] ENARU B, DREȚCANU G, POP T D, et al. Anthocyanins: factors affecting their stability and degradation[J]. *Antioxidants*, 2021, 10(12): 1 967.
- [21] SUN Y X, HUANG F, CHEN Y, et al. The effect of high-pressure processing on the copigmentation and storage stability of polyphenols with anthocyanin monomers[J]. *Foods*, 2024, 13(23): 3 756.
- [22] LU C, ZHANG Y Y, ZHAN P, et al. Characterization of the key aroma compounds in four varieties of pomegranate juice by gas chromatography-mass spectrometry, gas chromatography-olfactometry, odor activity value, aroma recombination, and omission tests[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2023, 12(1): 151-160.
- [23] YIKMIS S, OZER H, LEVENT O, et al. Effect of thermosonication and thermal treatments on antidiabetic, antihypertensive, mineral elements and in vitro bioaccessibility of bioactive compounds in freshly squeezed pomegranate juice [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2022, 16(4): 3 023-3 041.
- [24] JOHNSON D R, DECKER E A. The role of oxygen in lipid oxidation reactions: a review[J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2015, 6(1): 171-190.
- [25] NIU S L, ZHOU Y, YU H W, et al. Investigation on thermal degradation properties of oleic acid and its methyl and ethyl esters through TG-FTIR[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 149: 495-504.
- [26] ESPOSTO S, VENEZIANI G, TATICCHI A, et al. Chemical composition, antioxidant activity, and sensory characterization of commercial pomegranate juices[J]. *Antioxidants*, 2021, 10 (9): 1 381.