冯天硕, 李杨, 余静, 等. 多糖澄清石榴汁工艺优化及其对关键风味物质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(16): 252−259. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060303

FENG Tianshuo, LI Yang, YU Jing, et al. Optimization of Polysaccharide Clarification Process for Pomegranate Juice and Its Impact on Key Flavor Compounds[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(16): 252−259. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060303

· 工艺技术 ·

多糖澄清石榴汁工艺优化及其对关键风味物质的影响

冯天硕[1], 李　杨[1], 余　静[1], 陈君然[1], 胡云峰[1], 胡立武[2], 邢皓然[1,*]

（1.天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457;
2.新疆优产农业科技发展有限公司, 新疆和田 848300）

摘　要: 本研究以石榴汁为试验对象，分别考察壳聚糖、黄原胶、瓜尔豆胶、刺槐豆胶、海藻酸钠浓度进行单因素及正交试验，旨在确定石榴汁的最佳澄清工艺。同时，利用气相色谱-质谱联用（Gas Chromatography-Mass Spectrometry，GC-MS）技术对自然澄清和复合澄清剂处理后的石榴汁进行了挥发性物质分析。在澄清效果评估方面，以石榴汁的透光率为指标，对比了五种澄清剂的澄清效果。通过正交优化试验，最终确定了石榴汁的最佳澄清工艺条件：0.1 g/L 壳聚糖与 0.1 g/L 海藻酸钠复配比为 1∶1.5、絮凝温度为 30 ℃，氯化钙添加量为 0.05 g/L，透光率为 82.357%。GC-MS 结果显示，经最佳复合澄清组处理后，乙酸乙酯相对含量显著提升，增强了果香；4-萜烯醇相对含量增加 61.49%，增添了木质香及柑橘、花香；2-乙基己醇相对含量增加 34.79%，增添了甜香与果香；正壬醛相对含量上升 54.75%，其具有清新柑橘皮的香气，有助于保留温和的醛类风味，稳定整体风味体系。同时，复合澄清组降低了乙醇、(+)-α-松油醇、正己醛、反,反-2,4-壬二烯醛等可能产生不良风味物质的相对含量，减少了石榴汁中的刺鼻气味和油脂氧化味，进一步改善了石榴汁的整体风味。本研究通过系统探究加工工艺对石榴汁品质的影响，其研究成果可为提升石榴汁产品的感官与营养品质提供理论依据。

关键词: 石榴汁, 透光率, 澄清工艺, 气相色谱-质谱法（GC-MS）, 挥发性物质

中图分类号: TS255.1　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)16−0252−08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060303　　本文网刊:

Optimization of Polysaccharide Clarification Process for Pomegranate Juice and Its Impact on Key Flavor Compounds

FENG Tianshuo[1], LI Yang[1], YU Jing[1], CHEN Junran[1], HU Yunfeng[1], HU Liwu[2], XING Haoran[1,*]

（1.College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;
2.Xinjiang Youchan Agricultural Technology Development Co., Ltd.,Hotan 848300, China）

Abstract: This study took pomegranate juice as the experimental subject and conducted single-factor and orthogonal experiments using chitosan, xanthan gum, guar gum, locust bean gum, and sodium alginate, with the aim of determining the optimal clarification process for pomegranate juice. Meanwhile, gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) technology was employed to analyze the volatile compounds in naturally clarified pomegranate juice and pomegranate juice treated with composite clarifying agents. In terms of evaluating clarification effects, the transmittance of pomegranate juice was used as an indicator to compare the clarification effects of the five clarifying agents. Through orthogonal optimization experiments, the optimal clarification process conditions for pomegranate juice were ultimately determined: A compound ratio of 0.1 g/L chitosan to 0.1 g/L sodium alginate at 1∶1.5, a flocculation temperature of 30 ℃, and a calcium chloride

收稿日期: 2025−06−25

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发任务专项（2022B02030）; 天津市科技计划项目（24ZYCGSN01330）; 天津市林果现代农业产业技术体系项目（ITTHRS2021000）。

作者简介: 冯天硕（2003−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工, E-mail: 15511003522@163.com。

*** 通信作者:** 邢皓然（1991−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 风味化学, E-mail: haoran.xing@tust.edu.cn。

addition amount of 0.05 g/L, achieving a transmittance of 82.357%. Additionally, the GC-MS results revealed that after treatment with the composite clarifying agent group, the relative content of ethyl acetate significantly increased, enhancing the fruity aroma. The relative content of 4-terpineol increased by 61.49%, adding woody, citrus, and floral notes. The relative content of 2-ethylhexanol increased by 34.79%, contributing sweet and fruity aromas. The relative content of nonanal rose by 54.75%. Nonanal possessed a fresh citrus peel aroma, which helped retain a mild aldehyde flavor and stabilized the overall flavor profile. Moreover, the composite clarifying agent group reduced the relative contents of ethanol, (+)-α-terpineol, n-hexanal, trans,trans-2,4-nonadienal, and other substances that might produce undesirable flavors, thereby decreasing the pungent odor and rancid oil smell in pomegranate juice and further improving its overall flavor. This study systematically explores the impact of processing techniques on the quality of pomegranate juice, and its research findings can provide a theoretical basis for improving the sensory and nutritional quality of pomegranate juice products.

Key words: pomegranate juice; transmittance; clarification process; gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS); volatile compounds

石榴(*Punica granatum* L.)是属于安石榴科的植物，主要生长在温暖气候下，广泛分布于亚热带地区，其果实为圆形，外皮呈红色或黄色，内含多颗籽粒[1]。石榴富含维生素 C、酚类、黄酮、花色苷等多种生物活性物质，具有抗氧化和预防癌症等多种保健功能[2−3]。石榴属于呼吸跃变型果实，采后易失水、品质劣变且易染病害，贮藏保鲜难度大、成本高，因此需工业化加工成稳定易流通的果汁等产品，以最大限度保留其生物活性物质，满足健康需求。但在加工、储存、运输和销售过程中，易出现分层、浑浊等问题，这些现象会影响果汁的稳定性和品质[4]。

为了提高果汁的感官质量，通常采用膜技术，包括微滤、纳滤、反渗透等方法[5−7]。但这些技术会增加经济投入，同时膜过滤还会造成膜污染[8]。比较经济、可以迅速提高果汁澄清度的方法还有澄清剂法，主要有蛋白类、多糖类以及吸附类三大类的澄清剂[9−15]。其中，多糖类澄清剂的应用优势更为明显，多糖类澄清剂依靠其分子结构中的多糖链，与溶液中的悬浮颗粒、胶体颗粒及溶解性杂质发生高效的交互作用，如：黄原胶、壳聚糖等[16−18]。Erkan 等[19] 对比分析了 3 种蛋白类澄清剂(白蛋白、酪蛋白、明胶)和两种多糖澄清剂(壳聚糖和黄原胶)对石榴汁的影响，结果显示，多糖澄清剂能够使石榴汁中抗氧化活性增强，总酚、花色苷和水解单宁含量保留较好。Taştan 等[20] 优化了壳聚糖在苹果汁澄清过程中的应用效果，通过实验得出最佳处理方案：壳聚糖使用量为 1.916 mg/mL，操作温度控制在 20 ℃，反应时间设定为 30 min，结果表明，苹果汁的浑浊度大幅下降，与传统澄清方法相比，澄清度有了显著提升。Lachowicz 等[21] 研究了壳聚糖、黄原胶、羧甲基纤维素等多糖类澄清剂对苦莓汁的影响。结果表明，苦莓汁浊度降低，高抗氧化活性增强，并且多酚含量保留较好。

此外，挥发性化合物的构成和浓度对石榴汁的品质起着至关重要的作用。在果汁的品质评价体系中，挥发性风味成分作为香气特征的核心载体，不仅是决定其感官品质的关键要素，更直接关联着消费者的接受度与市场偏好。石榴果实富含酯类、醛类、醇类等挥发性成分，并且这些成分与萜烯、含硫化合物等相互协同，共同构建出石榴独特的风味谱系[22]。本研究以石榴汁为研究对象，探究多糖澄清剂在石榴汁澄清中的应用。通过单因素和正交优化试验，筛选出最佳的澄清剂和工艺条件，并利用气相色谱-质谱联用(Gas Chromatography-Mass Spectrometry，GC-MS)技术对澄清后的石榴汁挥发性物质进行测定，旨在改善石榴汁风味，提高石榴汁的品质。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

石榴　新疆和田地区策勒县策勒乡的‘策勒酸’石榴，储存在−18 ℃ 冰箱中备用；黄原胶、壳聚糖、瓜尔豆胶、刺槐豆胶、海藻酸钠、氯化钙(食品级，纯度均为 98%)　天津市赛玛特食品添加剂公司。

PL203/01 电子分析天平　梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司；BC/BD-319HB 卧式冷藏冷冻转换柜　青岛海尔特种电冰柜有限公司；DK-98-1 电热恒温水浴锅　天津市泰斯特仪器有限公司；KT300 探针型温度计　潮州保德仪器具有限公司；TU-1810 紫外可见分光光度计　北京普析通用仪器有限责任公司；JS06D(019-A5)榨汁机　浙江绍兴苏泊尔生活电器有限公司；ISQ7000 气相色谱-质谱联用仪　Thermo Fisher 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　石榴原汁的制备　将冷冻石榴放置室温解冻后，使用榨汁机处理，经多层纱布过滤制得纯石榴汁。

1.2.2　澄清剂的制备　取壳聚糖、黄原胶、瓜尔豆胶、刺槐豆胶和海藻酸钠各 1 g，制成 1%(w/v)的澄清剂溶液，壳聚糖需溶解于 1% 乙酸溶液中，黄原胶需在 50 ℃ 水浴中加热搅拌至溶解。

1.2.3　石榴原汁的澄清处理　将石榴原汁在室温下静置 8 h，以 4500 r/min 离心 15 min，取上清液得自然澄清果汁，此为对照组。参照陈虹吉[23] 的方法并稍作修改，将 5 种澄清剂分别设定为 0.1、0.5、1.0、1.5、2.0 g/L 五个梯度，向石榴原汁中分别加入 1.2.2 配制的澄清剂溶液达到设置的澄清剂浓度，室温下

静置 8 h, 以 4500 r/min 离心 15 min, 测定透光率以分析澄清剂对果汁的澄清作用。

1.2.4 透光率测定 参照陈虹吉[23] 的方法。透光率的测定采用分光光度法, 取适量样品于比色皿中, 以蒸馏水为参比溶液, 在 720 nm 处测定石榴果汁的透光率, 用 T(%)表示。

1.2.5 石榴汁澄清工艺单因素实验设计 探究不同壳聚糖-海藻酸钠复配比、pH、絮凝温度和氯化钙添加量四个因素对石榴透光率的影响。

1.2.5.1 壳聚糖-海藻酸钠复配比对透光率的影响 取 20 mL 石榴汁, 在 pH 为 3.5、絮凝温度 25 ℃、氯化钙添加量 0.5 g/L 条件下, 按 1∶0.5、1∶1、1∶1.5、1∶2、1.5∶1 比例复配 0.1 g/L 壳聚糖和 0.1 g/L 海藻酸钠, 混匀后静置 4 h, 在 720 nm 处测定透光率。

1.2.5.2 pH 对透光率的影响 取 20 mL 石榴汁, 在壳聚糖-海藻酸钠复配比 1∶1.5、絮凝温度 25 ℃、氯化钙添加量 0.5 g/L 条件下, 将 pH 分别调节为 3.0、3.3、3.5、3.7、4.0, 混匀后静置 4 h, 在 720 nm 处测定透光率。

1.2.5.3 絮凝温度对透光率的影响 取 20 mL 石榴汁, 在壳聚糖-海藻酸钠复配比 1∶1.5、pH 为 3.5、氯化钙添加量 0.5 g/L 条件下, 按照 4、25、35、40 ℃的温度加入絮凝剂, 混匀后静置 4 h, 在 720 nm 处测定透光率。

1.2.5.4 氯化钙添加量对透光率的影响 取 20 mL 石榴汁, 在壳聚糖-海藻酸钠复配比 1∶1.5、pH 为 3.5、絮凝温度 25 ℃条件下, 分别加入 0.1、0.5、1.0、1.5 g/L 氯化钙, 混匀后静置 4 h, 在 720 nm 处测定透光率。

1.2.6 正交试验 在单因素实验基础上, 以透光率为指标, 以壳聚糖-海藻酸钠复配比(A)、絮凝温度(B)、氯化钙添加量(C)为自变量, 设计三因素三水平的正交试验(表 1)。

表 1 正交试验设计因素水平表

Table 1 Factor level table for orthogonal experimental design

水平	因素		
	A壳聚糖-海藻酸钠复配比	B絮凝温度(℃)	C氯化钙添加量 (g/L)
1	1∶0.5	20	0.05
2	1∶1	25	0.10
3	1∶1.5	30	0.15

1.2.7 挥发性风味物质 GC-MS 分析 顶空固相微萃取: 分别取自然澄清和复合澄清的石榴汁各 10 g, 置于 20 mL 顶空瓶内, 并添加 2.00 g 氯化钠和 1 cm 磁力搅拌转子。在 40 ℃ 水浴中, 以 720 r/min 的速度平衡 20 min 后, 将纤维萃取头(插入顶空瓶进行提取, 确保距离液面 1~2 cm。采用 40 ℃ 恒温萃取 40 min 后, 立即将萃取头置入 GC-MS 进样口, 解析 7 min, 同步开启 GC-MS 完成分离、鉴定及数据获取。

GC-MS 分析参数设定: GC-MS 参照 Lu 等[24] 的方法并稍作修改, TG-5SILMS 色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm), 以高纯度氦气作为载气, 流速控制为 1.3 mL/min。进样口加热至 250 ℃, 采用分段升温模式: 初始温度 40 ℃ 维持 3 min, 随后以每分钟 10 ℃ 的速率升至 250 ℃, 并保持 5 min, 总分析时长为 50 min。采用 320 ℃ 离子源温度, 70 eV 电离电压, EI 离子源模式, 接口设定 280 ℃, 全扫描方式(SCAN), 并利用 NIST 与 Wiley 谱库进行检索。

定性和定量分析: 采用 NIST 和 Wiley 质谱库检索进行初步定性, 选择匹配度大于 80% 的鉴定结果。采用峰面积归一化法计算各挥发性风味化合物的相对百分含量。待测组分的相对含量以其峰面积占所有鉴定化合物总峰面积的百分比表示。

1.3 数据处理

所有实验处理重复 3 次, 结果以平均数±标准差表示。采用 Duncan 法检验显著性差异; 图形绘制使用 R 软件(v4.3.1)完成, 通过 SIMCA14.1 进行正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA), 用以评估预测变量的显著性。

2 结果与分析

2.1 不同浓度多糖澄清剂对石榴汁澄清效果分析

透光率一般用于表征果汁的澄清效果。在该实验中, 采用不同浓度(0.1、0.5、1.0、1.5、2.0 g/L)的 5 种澄清剂, 分析其对石榴汁透光率的影响。如图 1 所示, 原汁和自然澄清获得的石榴汁透光率为 40.27% 和 56.08%。在各类澄清剂中, 壳聚糖与海藻酸钠在低浓度条件下即表现出优异的澄清效果, 透光率较高; 而瓜尔豆胶与黄原胶在高浓度时透光率显著下降, 刺槐豆胶则整体变化不大。综合来看, 壳聚糖与海藻酸钠的澄清效果更为理想。

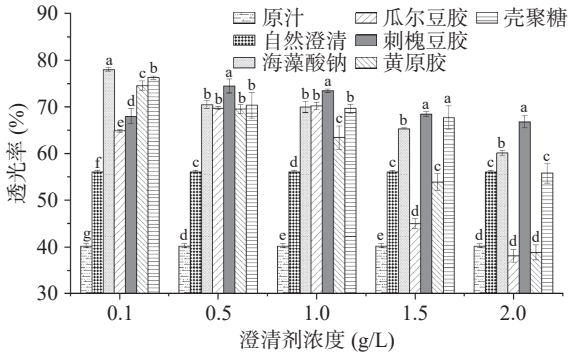


图 1 不同浓度多糖澄清剂对石榴汁澄清效果

Fig.1 Clarification effect of polysaccharide clarifying agents with different concentrations on pomegranate juice

注: 不同字母表示同一浓度下不同澄清剂数据差异显著($P<0.05$), 图 2 同。

具体来看, 海藻酸钠澄清剂在浓度为 0.1 g/L 时达到最佳透光率 78.34%, 此后随浓度上升效果逐渐减弱。瓜尔豆胶澄清剂在浓度为 1.0 g/L 时获得最大的透光率 70.31%。刺槐豆胶澄清剂在浓度为

0.5 g/L 时获得最大的透光率 75.19%。黄原胶澄清剂则是在最低浓度 0.1 g/L 时，石榴汁获得最大的透光率 75.58%，随着黄原胶浓度的增加澄清效果逐渐降低，当浓度高于 1.0 g/L 时，黄原胶不再发挥澄清剂的作用，反而会使石榴汁溶液变得浓稠。壳聚糖澄清剂在浓度在 0.1 g/L 时，获得最大的透光率 76.43%。

综合实验结果可知，在所测试的 5 类多糖澄清剂的最佳浓度中，0.1 g/L 壳聚糖与 0.1 g/L 海藻酸钠对石榴汁的澄清效果最佳。基于此，在单因素实验中，将 0.1 g/L 壳聚糖与 0.1 g/L 海藻酸钠按 1:1 的比例进行复配，并以石榴汁的 pH、絮凝温度及氯化钙添加量作为变量，开展复合澄清工艺的优化实验。

2.2　单因素实验结果

如图 2 所示，随着海藻酸钠的增加，石榴汁的透光率呈现先增加后降低的趋势，这可能是由于壳聚糖与海藻酸钠之间发生架桥效应[25]，通过架桥絮凝和电荷中和作用去除石榴汁中的蛋白质等杂质，但壳聚糖不足会影响桥接效果，而海藻酸钠过量则可能形成胶体网络，抑制杂质沉降[26]，因此当澄清剂复配比为 1:1 时，石榴汁的透光率达到最大值 81.09%；当 pH 为 3.3 时透光率最高，为 75.7%，但在不同 pH 条件下，透光率的变化相对平稳且无显著性差异（P<0.05），因此可将 pH 视为非关键因素；随着温度的升高，透光率也呈现先增加后降低的趋势，这可能归因于温度的升高增加了粒子碰撞频率促进聚集，然而，随着温度过高会引发还原糖和氨基酸之间的非酶褐变反应，降低透光率，同时也可导致壳聚糖老化失活，影响其絮凝效果，使絮凝物沉降过快，未能充分捕获悬浮物质，导致澄清度下降[27]，因此在絮凝温度为 25 ℃ 的条件下，透光率最高为 79.79%；随着氯化钙添加量的增加，透光率呈现先降低后升高的趋势，当氯化钙添加量为 0.1 g/L 时，透光率最高为 80.56%。

2.3　正交试验结果

在上述单因素实验结果的基础上，以壳聚糖-海藻酸钠复配比（A）、絮凝温度（B）和氯化钙添加量（C）为影响因素，以透光率为评价指标，进行三因素三水平的正交试验，结果见表 2，由 R 值来判断，各因素对透光率的影响从高到低依次为：壳聚糖-海藻酸钠复配比>氯化钙添加量>絮凝温度。因此可知，在 $A_3B_3C_1$ 的组合下，澄清后的石榴汁透光率最高，其中壳聚糖-海藻酸钠复配比为 1∶1.5、絮凝温度为 30 ℃，氯化钙添加量为 0.05 g/L。如表 2 所示，经重复实验验证，在最优工艺条件下澄清石榴汁，石榴汁的透光率可达到 82.357%。

2.4　澄清处理对石榴汁挥发性成分影响分析

石榴汁中的香气物质种类较多、成分较为复杂，通过 GC-MS 对挥发性物质测定，对自然澄清（对照组）和复合澄清剂澄清石榴汁挥发性成分进行分析。研究结果显示，两组不同澄清石榴汁的主要风味物质占比最大的均为酯类、醇类、醛类。虽然复合澄清剂组在处理过程中会使一些微小的风味成分发生改变，但复合澄清剂组能显著维持石榴汁的主要风味特性。

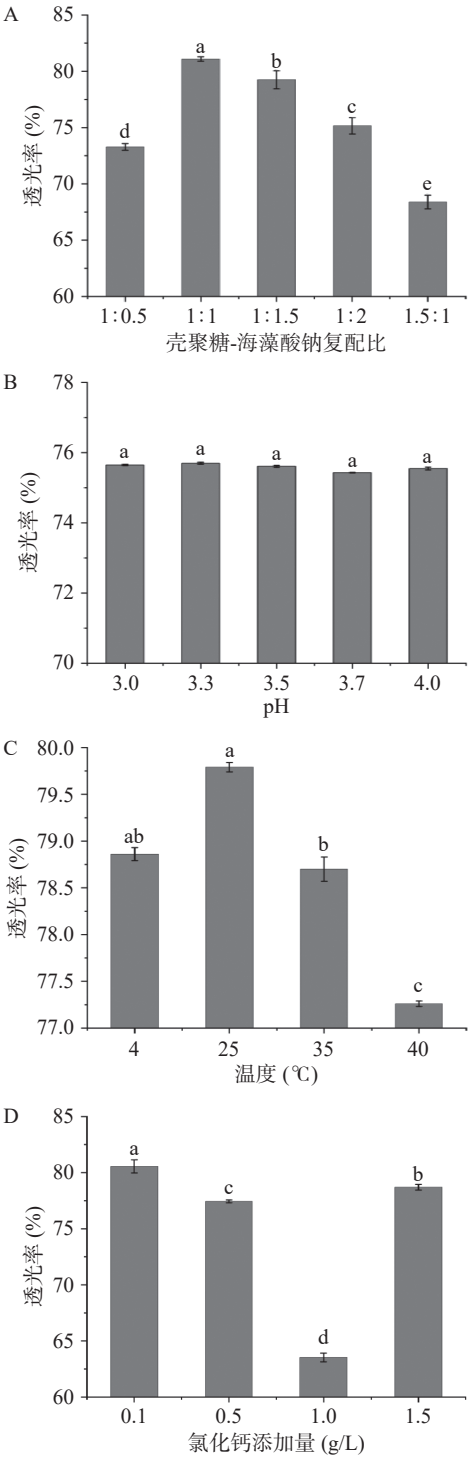


图 2　复合澄清剂复配比（A）、pH（B）、絮凝温度（C）、氯化钙添加量（D）对石榴汁透光率的影响效果

Fig.2　Effects of the compounding ratio of composite clarifying agent (A), pH (B), flocculation temperature (C), and calcium chloride addition amount (D) on the transmittance of pomegranate juice

如表 3 和图 3 所示，醛类、酯类和醇类等构成了策勒酸石榴汁独特风味的关键来源[28]。当石榴汁自然澄清时，一方面，己醛（峰面积百分比为 22.249%）和壬醛（峰面积百分比为 2.380%）为石榴汁赋予了“青草味”的特征，但过量时则可能产生异味[29]。另一

表 2 正交试验结果与分析

Table 2 Results and analysis of orthogonal experiment

项目	A	B	C	透光率(%)
1	1	1	1	66.328
2	1	2	2	58.210
3	1	3	3	62.326
4	2	1	2	74.302
5	2	2	3	76.325
6	2	3	1	77.803
7	3	1	3	82.604
8	3	2	1	81.409
9	3	3	2	83.239
均值k1	62.290	74.410	75.180	
均值k2	76.142	71.983	71.916	
均值k3	82.416	74.456	73.753	
R(极差)	20.126	2.473	3.264	

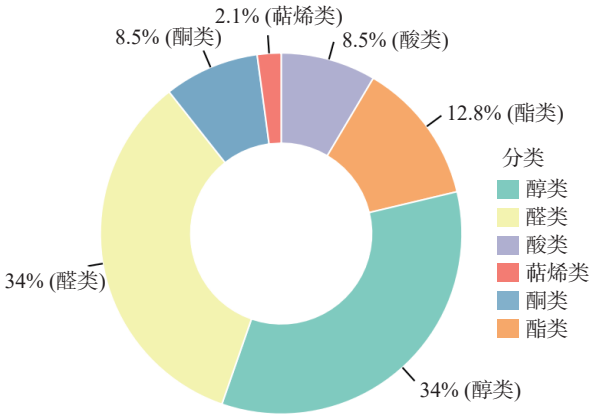


图 3 挥发性物质类别组成环形图

Fig.3 Circular chart of the composition of volatile substance categories

方面，乙酸乙酯(峰面积百分比为 5.276%)为石榴汁贡献了果香[28]。4-萜烯醇(峰面积百分比为 1.088%)等醇类也进一步增强了石榴汁风味的复杂性[28]。

而当石榴汁经过复合澄清剂组处理后，壬醛的峰面积百分比有所上升，增至 3.683%，增幅达 54.75%；这一变化有助于减少石榴汁的刺激性青草味，同时保留温和的醛类风味。此外，复合澄清剂组还显著提升了乙酸乙酯的峰面积百分比，从 5.276% 升至 7.442%，增幅达 41.05%，为石榴汁增强了果味香。对于醇类而言，复合澄清剂组使 4-萜烯醇和 2-乙基己醇的峰面积百分比分别增加了 61.49% 和 34.79%，进一步稳定了风味。同时，复合澄清组也降低了一些风味物质的峰面积百分比。原本在石榴汁中，乙醇、(+)-α-松油醇、正己醛、反,反-2,4-壬二烯醛峰面积百分比较高，这些物质可能会产生刺鼻气味和油脂氧化味等不良风味[30]。经复合澄清处理后，这些物质的峰面积百分比降低，有效减少了石榴汁中的刺鼻气味和油脂氧化味等，进一步改善了整体风味。

2.5 挥发性物质比例分析

基于挥发性物质组成比例分析，可以从整体上评估石榴汁中的主要挥发性物质的分布情况。在自然澄清和复合澄清剂石榴汁样品中共检测到 47 种

表 3 自然澄清和复合澄清剂澄清石榴汁风味成分测定

Table 3 Determination of flavor components in pomegranate juice clarified by natural clarification and composite clarifying agents

类别	化学名称	分子式	保留时间(min)	峰面积百分比(%)	
				自然澄清	复合澄清
酯类	醋酸异丙烯酯	$C_5H_8O_2$	2.12	1.032±0.032	–
	乙酸甲酯	$C_3H_6O_2$	2.20	0.565±0.011	–
	乙酸乙酯	$C_4H_8O_2$	2.65	5.276±0.081	7.442±0.526
	乙酸丁酯	$C_6H_{12}O_2$	5.70	0.243±0.036	1.060±0.068
	己酸乙酯	$C_8H_{16}O_2$	10.06	–	0.293±0.014
	甲酸庚酯	$C_8H_{16}O_2$	17.16	–	0.634±0.051
酸类	冰醋酸	$C_2H_4O_2$	17.39	7.402±0.062	8.871±0.635
	2-甲基丁酸	$C_5H_{10}O_2$	23.70	1.565±0.015	1.553±0.124
	正戊酸	$C_5H_{10}O_2$	25.56	0.560±0.077	0.694±0.091
	正己酸	$C_6H_{12}O_2$	28.40	1.562±0.025	2.153±0.126
醇类	乙醇	C_2H_6O	3.19	14.569±0.129	12.119±0.703
	正丁醇	$C_4H_{10}O$	7.92	0.435±0.076	0.744±0.019
	异丁醇	$C_4H_{10}O$	9.57	0.618±0.019	–
	正戊醇	$C_5H_{12}O$	10.84	3.259±0.168	12.331±0.789
	正己醇	$C_6H_{14}O$	13.99	3.602±0.051	4.373±0.217
	叶醇	$C_6H_{12}O$	14.93	–	0.290±0.036
	3-己烯-1-醇	$C_6H_{12}O$	14.95	0.272±0.015	–
	1-辛烯-3-醇	$C_8H_{16}O$	17.03	0.991±0.015	1.191±0.028
	2-乙基己醇	$C_8H_{18}O$	18.23	7.855±0.038	10.588±0.659
	2-庚烯醇	$C_7H_{16}O$	18.86	–	0.578±0.008
	4-萜烯醇	$C_{10}H_{18}O$	21.42	1.088±0.045	1.757±0.049
	2-辛烯-1-醇	$C_8H_{16}O$	21.93	0.440±0.071	0.736±0.042
	α-二氢松油醇	$C_{10}H_{20}O$	22.54	0.602±0.002	–
	1-甲基-4-(1-甲基乙基)环己醇	$C_{10}H_{20}O$	22.56	–	0.568±0.140
	(+)-α-松油醇	$C_{10}H_{18}O$	24.17	5.421±0.051	3.323±0.519
	十一醇	$C_{11}H_{24}O$	31.60	0.417±0.057	0.983±0.143
醛类	乙醛	C_2H_4O	1.68	1.196±0.117	–
	2-甲基丁醛	$C_5H_{10}O$	2.92	0.507±0.063	0.288±0.109
	异戊醛	$C_5H_{10}O$	2.98	0.542±0.016	0.428±0.167
	正戊醛	$C_5H_{10}O$	3.85	4.092±0.061	3.529±0.855
	正己醛	$C_6H_{12}O$	5.89	22.249±0.119	10.347±2.142
	正庚醛	$C_7H_{14}O$	8.59	0.859±0.035	0.637±0.011
	正辛醛	$C_8H_{16}O$	11.81	0.699±0.143	0.710±0.386
	(Z)-2-庚烯醛	$C_7H_{12}O$	12.95	0.916±0.064	–
	正壬醛	$C_9H_{18}O$	15.13	2.380±0.006	3.683±0.707
	E-2-辛烯醛	C_8H14O	16.24	0.512±0.016	0.749±0.445
	癸醛	$C_{10}H_{20}O$	18.38	0.909±0.068	0.862±0.269
	苯甲醛	C_7H_6O	19.10	0.913±0.063	1.300±0.145
	2,5-二羟基苯甲醛	$C_7H_6O_3$	19.81	0.769±0.047	0.711±0.062
	对甲基苯甲醛	C_8H_8O	21.85	–	0.283±0.014
	反,反-2,4-壬二烯醛	$C_9H_{14}O$	23.22	1.032±0.020	0.754±0.271
	2,4-二甲基苯甲醛	$C_9H_{10}O$	27.20	3.188±0.033	–
酮类	丙酮	CH_3COCH_3	2.12	–	0.940±0.153
	甲乙酮	C_4H_8O	2.79	–	0.921±0.313
	甲基庚烯酮	$C_8H_{14}O$	13.41	0.979±0.045	0.862±0.181
	苯乙酮	C_8H_8O	22.78	–	0.719±0.240
萜烯类	β-蒎烯	$C_{10}H_{16}$	7.71	0.486±0.165	–

注：“–”：未检测到。

挥发性成分，其中，醇类和醛类含量最多，都为 16 种，且都占 34%；酯类化合物 6 种，占 12.8%；酮类和酸类各有 4 种，各占 8.5%；萜烯类化合物只有 1 种，仅占 2.1%。

2.6　澄清处理石榴汁挥发性成分的聚类分析

通过聚类热图分析了不同澄清处理下石榴汁样品挥发性物质累积水平的差异，结果如图 4 所示。复合澄清石榴汁中的乙酸乙酯、己酸乙酯、乙酸丁酯和甲酸庚酯等酯类物质和 4-萜烯醇、正己醇、2-乙基己醇等醇类物质相对含量高于自然澄清样品，这可能产生更有利的风味属性，例如乙酸乙酯具有果味香，4-萜烯醇和 2-乙基己醇能进一步稳定风味。同时，它可以通过减少萜烯类和部分醛类、醇类来增强石榴汁的香气，例如，复合澄清剂处理的石榴汁降低了乙醇、(+)-α-松油醇、正己醛等可能会产生不良风味的物质，减少石榴汁中的刺鼻气味。总之本研究采用复合澄清技术，可优化石榴汁风味，提升果汁的整体香气。

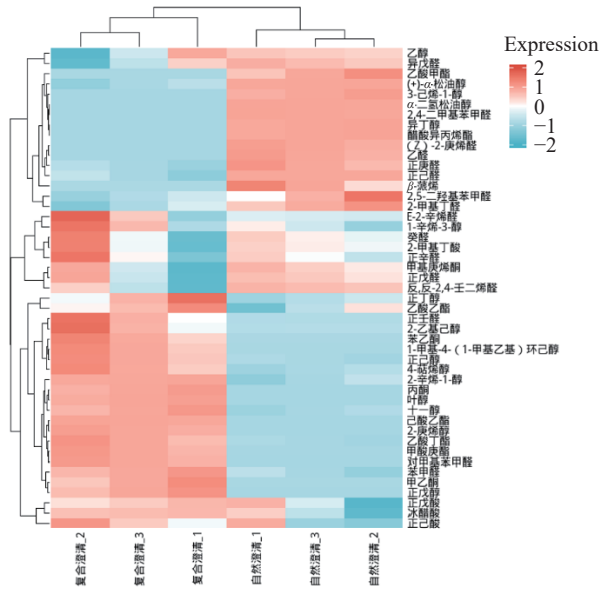


图 4　自然澄清和复合澄清挥发性物质聚类热图

Fig.4　Heatmap of clustering analysis for volatile substances in naturally clarified and compositely clarified samples

2.7　澄清处理石榴汁挥发性成分主成分分析

PCA 是一种统计方法，用于描述样本之间的差异并确定影响样本空间分布的关键变量[31]。样品的香气越接近，它们的信号距离越重叠或接近。相反，差值越大，信号距离越远[32]。如图 5 所示，自然澄清和复合澄清处理的样品在空间上相对独立，有明显区分度。且 PC1 和 PC2 的累计贡献率为 93.6%，远大于可信值 60% 以上，所以 PC1 和 PC2 主成分足以反映石榴汁样品香气特征信息。

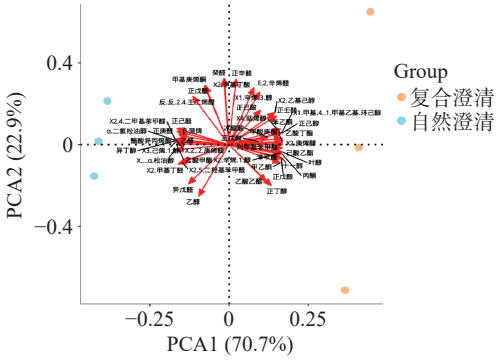


图 5　澄清处理石榴汁挥发性成分 PCA

Fig.5　PCA of volatile components in clarified pomegranate juice

2.8　OPLS-DA 及 VIP 分析

通过建立 OPLS-DA 模型并计算 VIP 值，对石榴汁香气的主要贡献成分进行了筛选[28]，结果如图 6、图 7 所示。OPLS-DA 是一种分析方法，它通过可视化数据并利用变量之间的相关性，来量化样本之间的差异程度[33]。如图 6A 所示，不同澄清处理的石榴汁样本点明显分离，且 OPLS-DA 模型的 R^2X 和 R^2Y

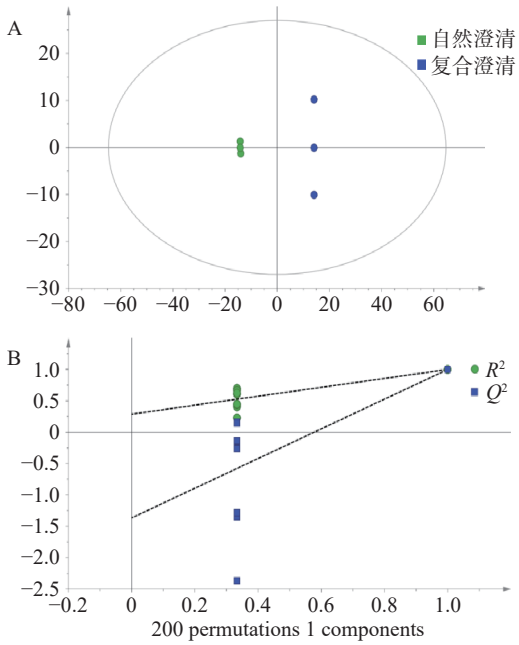


图 6　澄清处理石榴汁挥发性物质 OPLS-DA 得分图(A)和置换检验图(B)

Fig.6　OPLS-DA score plot (A) and permutation test plot (B) for volatile substances in clarified pomegranate juice

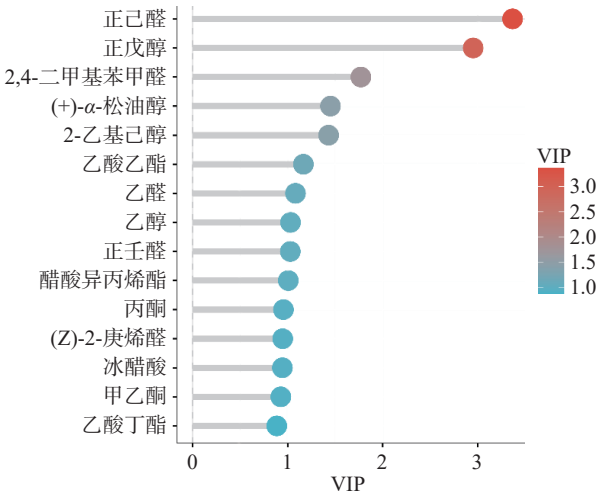


图 7　基于 OPLS-DA 模型分析的 VIP 分布图

Fig.7　VIP distribution plot based on OPLS-DA model analysis

值分别为 0.807 和 0.141，表明具有较强的解释和预测能力。接着对模型进行了 200 次交叉替换测试，如图 6B 所示，R^2(0.288)和 Q^2(−1.37)均小于保留值 1.0，这也表明模型相关性较好，准确度很高，可用于对澄清剂处理石榴汁挥发性物质的分析鉴定。VIP>1 的挥发物被认为是主要的挥发性成分[34]。如图 7 所示，VIP 值超过 1.0 的挥发物共有 10 种，分别是正己醛、正戊醇、2,4-二甲基苯甲醛、(+)-α-松油醇、2-乙基己醇、乙酸乙酯、乙醛、乙醇、正壬醛和醋酸异丙烯酯，表明这 10 种物质可以作为有效指标来区分自然澄清和复合澄清剂处理的石榴汁。

3 结论

本研究采用多糖类澄清剂对石榴汁进行澄清处理，探究其风味改善作用。以澄清度为指标优化工艺。通过单因素与正交试验，确定最优工艺参数为壳聚糖与海藻酸钠复配比 1∶1.5、絮凝温度 30 ℃、氯化钙添加量 0.05 g/L。在风味改善方面，复合澄清剂处理显著丰富了酯类、醛类和醇类物质的组成，增强了果味、木质香、甜香和花香等风味特征，其中乙酸乙酯、4-萜烯醇、2-乙基己醇和正壬醛相对含量分别上升 41.05%、61.49%、34.79% 和 54.75%。同时，该方法有效降低了乙醇和(+)-α-松油醇等不良风味物质的相对含量，减弱了刺鼻气味与油脂氧化味，整体风味更饱满协调。结果表明，复合澄清处理在改善石榴汁风味方面具有显著优势。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 陈利娜, 敬丹, 唐丽颖, 等. 新中国果树科学研究 70 年石榴[J]. 果树学报, 2019, 36(10): 1389−1398. [CHEN Lina, JING Dan, TANG Liying, et al. 70 years of pomegranate research in fruit science in New China[J]. Journal of Fruit Science, 2019, 36(10): 1389−1398.]

[2] 张晶, 李论, 张梅, 等. 石榴化学成分及药理活性研究进展[J]. 中国药科大学学报, 2023, 54(4): 421−430. [ZHANG Jing, LI Lun, ZHANG Mei, et al. Research progress on the chemical constituents and pharmacological activities of pomegranate[J]. Journal of China Pharmaceutical University, 2023, 54(4): 421−430.]

[3] VALERO-MENDOZA A G, MELÉNDEZ-RENTERÍA N P, CHÁVEZ-GONZÁLEZ M L, et al. The whole pomegranate (*Punica granatum* L.), biological properties and important findings: A review[J]. Food Chemistry Advances, 2023, 2: 100153.

[4] COLANTUONO A, VITAGLIONE P, MANZO N, et al. Evaluation of microfiltration and heat treatment on the microbiological characteristics, phenolic composition and volatile compound profile of pomegranate (*Punica granatum* L.) juice[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(9): 3324−3332.

[5] ALPER N, ACAR J. Removal of phenolic compounds in pomegranate juices using ultrafiltration and laccase-ultrafiltration combinations[J]. Nahrung, 2004, 48(3): 184−187.

[6] TUNDIS R, LOIZZO M R, BONESI M, et al. Concentration of bioactive compounds from elderberry (*Sambucus nigra* L.) juice by nanofiltration membranes[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2018, 73(4): 336−343.

[7] KONRADT N, KUHLEN J G, ROHNS H P, et al. Removal of trace organic contaminants by parallel operation of reverse osmosis and granular activated carbon for drinking water treatment[J]. Membranes, 2021, 11(1): 33.

[8] 林梅, 谷玉红. 膜分离技术在水果加工中的应用探讨[J]. 现代食品, 2019(14): 75−77. [LIN Mei, GU Yuhong. Discussion on the application of membrane separation technology in fruit processing[J]. Modern Food, 2019(14): 75−77.]

[9] 崔娜, 王志权. 玫瑰茄杨梅果酒澄清工艺的研究[J]. 现代食品, 2019, 21: 100−103. [CUI Na, WANG Zhiquan. Research on the clarification process of roselle waxberry fruit wine[J]. Modern Food, 2019, 21: 100−103.]

[10] 饶炎炎, 冯建文, 公丽凤, 等. 红树莓果汁澄清剂的选择及澄清工艺的优化[J]. 食品工业科技, 2018, 39(24): 209−215. [RAO Yanyan, FENG Jianwen, GONG Lifeng, et al. Selection of clarifying agents and optimization of clarification process for red raspberry juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(24): 209−215.]

[11] 陈健初. 杨梅汁花色苷稳定性、澄清技术及抗氧化特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005. [CHEN Jianchu. Study on the stability, clarification technology, and antioxidant properties of anthocyanins in bayberry juice[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.]

[12] 孔晓妍, 姚高毅, 王书琪, 等. 不同澄清剂对藜麦酒澄清作用的研究[J]. 食品工程, 2021(3): 46−49. [KONG Xiaoyan, YAO Gaoyi, WANG Shuqi, et al. Study on the clarification effect of different clarifying agents on quinoa wine[J]. Food Engineering, 2021(3): 46−49.]

[13] 黄钰, 王凯, 伍雅励, 等. 甘蔗果醋澄清工艺优化及理化性质分析[J]. 中国调味品, 2021, 46(6): 72−76. [HUANG Yu, WANG Kai, WU Yali, et al. Optimization of clarification process and analysis of physicochemical properties of sugarcane fruit vinegar[J]. China Condiment, 2021, 46(6): 72−76.]

[14] 毕文. 甜瓜果汁澄清工艺研究[J]. 甘肃农业科技, 2019(7): 44−47,230. [BI Wen. Study on the clarification process of melon juice[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2019(7): 44−47,230.]

[15] 韩希凤, 李书启, 陈存坤, 等. 石榴果酒澄清剂的筛选及澄清工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(18): 65−71. [HAN Xifeng, LI Shuqi, CHEN Cunkun, et al. Screening of clarifying agents and optimization of clarification process for pomegranate fruit wine[J]. Food Research and Development, 2021, 42(18): 65−71.]

[16] 夏其乐, 曹艳, 陈剑兵, 等. 蓝莓露酒澄清工艺研究[J]. 食品工业, 2018(10): 145−149. [XIA Qile, CAO Yan, CHEN Jianbing, et al. Study on the clarification process of blueberry liqueur[J]. Food Industry, 2018(10): 145−149.]

[17] 潘叶, 黄惠华. 壳聚糖与黄原胶对菠萝汁澄清效果的研究[J]. 食品工业科技, 2010(1): 260−263. [PAN Ye, HUANG Huihua. Study on the clarification effect of chitosan and xanthan gum on pineapple juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2010(1): 260−263.]

[18] 黄硕, 周文红, 卢艺惠, 等. 响应面法优化超声辅助凹土-壳聚糖澄清姜汁工艺[J]. 食品工业科技, 2020, 41(2): 140−145. [HUANG Shuo, ZHOU Wenhong, LU Yihui, et al. Optimization of ultrasound-assisted attapulgite-chitosan clarification process for

ginger juice using response surface methodology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(2): 140−145.]
[19] ERKAN-KOÇ B, TÜRKYILMAZ M, YEMIŞ O, et al. Effects of various protein- and polysaccharide-based clarification agents on antioxidative compounds and colour of pomegranate juice [J]. Food Chemistry, 2015, 184: 37−45.
[20] TAŞTAN Ö, BAYSAL T. Chitosan as a novel clarifying agent on clear apple juice production: Optimization of process conditions and changes on quality characteristics[J]. Food Chemistry, 2017, 237: 818−824.
[21] LACHOWICZ S, OSZMIAŃSKI J, KALISZ S. Effects of various polysaccharide clarification agents and reaction time on content of polyphenolic compound, antioxidant activity, turbidity and colour of chokeberry juice[J]. LWT, 2018, 92: 347−360.
[22] 白丽丽, 戴华, 孔杜林, 等. HS-SPME-GC-MS 分析番石榴果实中的挥发性成分[J]. 现代食品科技, 2017, 33(11): 230−234. [BAI Lili, DAI Hua, KONG Dulin, et al. Analysis of volatile components in guava fruits by HS-SPME-GC-MS[J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(11): 230−234.]
[23] 陈虹吉. 多糖澄清剂联合膜分离技术对杨梅汁澄清和品质影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020. [CHEN Hongji. Study on the effects of polysaccharide clarifying agent combined with membrane separation technology on the clarification and quality of bayberry juice[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.]
[24] LU Cong, ZHANG Yuyu, ZHAN Ping, 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.
[25] PANDIMA D M, SEKAR M, CHAMUNDESWARI M, et al. A novel wound dressing material: Fibrin–chitosan–sodium alginate composite sheet[J]. Bulletin of Materials Science, 2012, 35(7): 1157−1163.
[26] QIN Yimin, CAI Liling, FENG Deming, et al. Combined use of chitosan and alginate in the treatment of wastewater[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2007, 104(6): 3581−3587.
[27] 吴安迪. 壳聚糖/海藻酸钠复合澄清杨梅汁的工艺及机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022. [WU Andi. Study on the process and mechanism of clarifying bayberry juice using chitosan/sodium alginate composite[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.]
[28] ANDREU-SEVILLA A J, MENA P, MARTÍ N, et al. Volatile composition and descriptive sensory analysis of pomegranate juice and wine[J]. Food Research International, 2013, 54(1): 246−254.
[29] WU Feifan, LIN Kewei, ZHANG Jixiang, et al. Volatile flavor analysis of flesh oil and liver oil from *Doederleinia berycoides* based on HS-GC-IMS, HS-SPME-GC-MS and lipidomics [J]. Grain & Oil Science and Technology, 2025, 8(1): 1−12.
[30] ZHENG Wenxiong, YANG Ronglin, SHUI Shanshan, et al. Effects of hot air drying on muscle quality, volatile flavor compounds, and lipid profiles in sword prawn (*Parapenaeopsis hardwickii*) based on physicochemical, GC-IMS, and UHPLC-MS/MS-based lipidomics analysis[J]. Food Chemistry: X, 2025, 27: 102473.
[31] XU Dingyun, LI Chuan, LAN Hong, et al. Changes in volatile flavor compounds and metabolites during processing of Ginger milk curd from buffalo milk by GC-IMS and LC-MS[J]. Food Research International, 2025, 209: 116230.
[32] WU Songheng, CHEN Bingjie, WANG Xiao, et al. Analysis of the effects of steaming and spray-drying on volatile flavor components of sweet corn beverage based on HS-SPME-GC–MS and HS-GC-IMS[J]. Food Chemistry: X, 2025, 27: 102478.
[33] KANG Chaodi, ZHANG Yingying, ZHANG Mingyue, et al. Screening of specific quantitative peptides of beef by LC–MS/MS coupled with OPLS-DA[J]. Food Chemistry, 2022, 387: 132932.
[34] CHENG Yujiao, LI Guijie, WU Houjiu, et al. Flavor deterioration of Mandarin juice during storage by MDGC-MS/O and GC-MS/PFPD[J]. LWT, 2022, 159: 113132.