

李颜博, 杜庆萍, 杨 瑞, 等. 沙棘原浆关键加工环节品质动态变化[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(2): 362-371.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.02.017

沙棘原浆关键加工环节品质动态变化

李颜博, 杜庆萍, 杨 瑞, 李 薇, 张路思, 宋安康, 李 玮, 李学文, 王 伟
(新疆农业大学食品科学与药学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 为明确沙棘原浆在加工过程中的品质变化, 本研究以新疆大果沙棘为试验材料, 系统探究破壁处理、酶解处理、均质处理和灭菌处理对沙棘原浆营养指标及抗氧化能力的影响, 并基于气相色谱-离子迁移谱(GC-IMS)技术探究沙棘原浆挥发性物质的动态变化。结果表明, 与对照相比, 破壁处理后的沙棘原浆中抗坏血酸含量显著降低($P < 0.05$); 与破壁处理后的沙棘原浆相比, 酶解处理后的沙棘原浆中总酚含量、抗坏血酸含量、抗氧化能力显著提高($P < 0.05$); 与均质处理后的沙棘原浆相比, 灭菌处理后的沙棘原浆中总酚含量、抗坏血酸含量、抗氧化能力显著降低($P < 0.05$)。双边检验结果表明, 酶解处理和灭菌处理是影响沙棘原浆风味的关键加工环节。正交偏最小二乘法判别分析(OPLS-DA)结果表明, 乙缩醛、2-戊酮、丙酮、2-丁酮、乙酸甲酯是区分对照、酶解处理后的沙棘原浆和灭菌处理后的沙棘原浆的关键特征化合物。本研究结果可为沙棘原浆的品质控制及加工工艺优化提供科学依据。

关键词: 沙棘原浆; 加工环节; 品质; 挥发性物质

中图分类号: S793.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)02-0362-10

Dynamic quality changes of sea buckthorn puree in key processing stages

LI Yanbo, DU Qingping, YANG Rui, LI Wei, ZHANG Lusi, SONG Ankang, LI Wei, LI Xuewen, WANG Wei

(College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: To clarify the quality changes of sea buckthorn puree during processing, this study used Xinjiang large-fruit sea buckthorn as the experimental material, systematically explored the effects of wall-breaking treatment, enzymatic hydrolysis treatment, homogenization treatment, and sterilization treatment on the nutritional indexes and antioxidant capacity of sea buckthorn puree. Moreover, based on the gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) technology, the dynamic changes of volatile substances in sea buckthorn puree were investigated. The results showed that, compared with the control, the ascorbic acid content of sea buckthorn puree after wall-breaking treatment decreased significantly ($P < 0.05$). Compared with the sea buckthorn puree after wall-breaking treatment, the total phenol content, ascorbic acid content, and antioxidant capacity of sea buckthorn puree after enzymatic hydrolysis treatment increased significantly ($P < 0.05$). Compared with the sea buckthorn puree after homogenization treatment, the total phenol content, ascorbic acid content, and antioxidant capacity of sea buckthorn puree after sterilization treatment decreased significantly ($P < 0.05$). The results of the two-tailed test indicated that enzymatic hydrolysis treatment and sterilization treatment were the key processing steps affecting the flavor of sea buckthorn puree. The results of orthogonal partial least squares discriminant analysis

(OPLS-DA) showed that acetal, 2-pentanone, acetone, 2-butanone, and methyl acetate were the key characteristic compounds differentiating the sea buckthorn puree in the control, the sea buckthorn puree treated by enzymatic hydrolysis, and the sea buckthorn puree treated by sterilization. The results of this study can provide a scientific basis

收稿日期: 2024-07-04

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发项目(2022B02005-2-3); 新疆维吾尔自治区研究生科研创新计划项目(XJ2024G141)

作者简介: 李颜博(1998-), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工。(E-mail) 18764513650@163.com

通讯作者: 王 伟, (E-mail) ww2shz@163.com

for the quality control and processing technology optimization of sea buckthorn puree.

Key words: sea buckthorn puree; processing stage; quality; volatile substances

沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)属胡颓子科,在中国、俄罗斯、印度等国家广泛种植^[1]。新疆阿勒泰地区是中国主要的沙棘种植区域,全区种植面积达 $1.87 \times 10^4 \text{ hm}^2$,年产量达 $1.2 \times 10^4 \text{ t}$,主要品种包括深秋红、状元黄、无刺丰等^[2]。阿勒泰地区种植的沙棘具有果粒大、产量高、品质优良的特点,其果实富含抗坏血酸、黄酮、萜类、有机酸等多种营养成分^[3],同时具有降血压、降血脂和保护肝脏等药用功效^[4]。目前,市场上的沙棘产品有沙棘原浆、沙棘果油、沙棘果粉、沙棘茶等^[5]。

沙棘果汁的加工工艺同其他果汁类似,主要包括清洗、榨汁、均质、灭菌等环节。不同加工步骤对果汁品质具有重要影响。Xu等^[6]研究结果表明,热处理能够加速沙棘果汁中抗坏血酸的降解。Aaby等^[7]研究发现,热处理能提升沙棘原浆中类胡萝卜素的含量,均质处理则使果汁颜色变黄。高文涛等^[8]研究发现,酶解处理可以提高黄花菜果汁中的总酚含量和抗氧化能力。Zhu等^[9]研究发现,榨汁处理能够提升苹果汁中的脂类挥发性物质含量,而醛类物质含量降低。宋自娟等^[10]研究结果表明,冷榨汁处理更有利于保留果汁中的挥发性物质。目前,关于沙棘原浆在加工过程中品质变化的研究相对较少,这在一定程度上制约了沙棘产业的发展。

气相色谱-离子迁移谱(GC-IMS)技术结合了气相色谱高分离度和离子迁移谱高灵敏度的优势^[11],无需复杂的样品前处理即可快速检测痕量挥发性有机化合物^[12]。目前,该技术已被广泛应用于甜瓜汁^[13]、橙汁^[14]、水蜜桃汁^[15]、猕猴桃汁^[16]等多种果汁香气风味研究中,并取得了显著成效。

本研究拟对加工过程中沙棘原浆的理化性质、营养品质及抗氧化能力进行系统分析,同时基于GC-IMS技术探究关键加工环节对沙棘原浆挥发性化合物的影响。本研究结果将为优化沙棘原浆加工工艺及完善质量标准提供科学依据,对于提升沙棘原浆的产品质量具有重要意义。

1 材料与方法

试验材料沙棘果选用中国新疆阿勒泰地区主栽品种深秋红,果实深红色,完全成熟,平均纵径

13.58 mm,平均横径 8.01 mm;果胶酶购自天津盛丰商贸有限公司;纤维素酶购自沧州夏盛酶技术有限公司;正构酮(2-丁酮、2-戊酮、2-己酮、2-庚酮、2-辛酮和 2-壬酮)、无水乙醇、碳酸钠等均为分析纯。

SP902S 多功能破壁机购自苏泊尔集团有限公司,UV-1200 紫外分光光度计购自上海美谱达仪器有限公司,PHS-3C 数显 pH 计购自上海仪电科学仪器股份有限公司,JN-Mini Pro 连续超高压均质机购自广东聚能纳米生物科技有限公司,FlavourSpec[®] 气相离子迁移谱购自德国 G.A.S.公司,CTC-PAL 3 静态顶空自动进样装置购自瑞士 CTC Analytics AG 公司。

1.1 试验方法

1.1.1 样品处理 选取同一批次沙棘果,混合均匀。使用自来水清洗沙棘果,迅速沥干水分,在冰浴条件下研磨成果浆(对照),取适量果浆,放入破壁机中榨汁(破壁处理),取破壁处理得到的沙棘汁,加入果胶酶和纤维素酶,在 41 ℃ 条件下酶解 93 min 后过滤(酶解处理),采用超高压均质机,以 37 MPa 压力进行均质(均质处理),取均质处理得到的沙棘汁,65 ℃ 恒温水浴 30 min,然后迅速降温至 5 ℃(灭菌处理)。将每一步处理得到的样品置于 4 ℃ 冰箱备用。

1.1.2 抗坏血酸含量的测定 参照 GB 5009.86-2016《食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定》中的 2,6-二氯酚靛酚滴定法进行测定。

1.1.3 总酚含量的测定 采用 Folin-Ciocalteu 比色法^[17]测定,建立标准曲线,回归方程 $Y = 0.1347x + 0.0129$ 。样品处理后,在 765 nm 波长处测定其吸光度值,并根据标准曲线计算样品中的总酚含量。

1.1.4 DPPH 自由基清除率的测定 参照 Fawoie 等^[18]的方法并稍作修改,样品用乙醇定容后静置 30 min,再离心,取上清液 2 mL 和 2 mL DPPH(1,1-二苯基-2-三硝基苯基)甲醇溶液混合,置于黑暗中反应 30 min,在 517 nm 波长处测定吸光度,根据公式(1)计算清除率。

$$\text{DPPH 自由基清除率} = \left(1 - \frac{A_2 - A_3}{A_1}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中, A_1 为甲醇溶液+甲醇溶液的吸光度; A_2 为 DPPH 甲醇溶液+样品的吸光度; A_3 为甲醇溶液+样品的吸光度。

1.1.5 双边检验 参照 GB/T 16291.1-2012《感官分析 选拔、培训与管理评价员一般导则》,采用三点检验法筛选出 20 名嗅觉灵敏的食品专业人员(汉族),男女数量比例为 1:1,年龄为 23~30 岁。参照 GB/T 10220-2012《感官分析 方法学 总论》对相邻加工环节的沙棘原浆进行差异性双边检验,从而确定对挥发性成分影响较大的加工环节。原假设为对相邻加工环节沙棘原浆的偏爱程度没有显著差异性,记为 $P_A = P_B$,备择假设记为 $P_A \neq P_B$,即 $P_A > P_B$ 或者 $P_A < P_B$ 。

1.1.6 挥发性成分的测定 称取 2 g 样品置于 20 mL 顶空瓶中,60 °C 条件下孵育 20 min 后进样,进样体积 500 μ L,采用不分流进样模式,孵化转速设为 500 r/min,进样针温度设为 85 °C。

1.1.6.1 GC 条件 采用 MXT-WAX 毛细管色谱柱(30.00 m \times 0.53 mm,1.00 μ m),色谱柱温度设为 60 °C,载气为高纯氮气(纯度 \geq 99.999%)。在程序开始时,载气(高纯氮气)的流速设置为 2 mL/min,保持 2 min,在接下来的 8 min 内,载气流速从 2 mL/min 均匀增加到 10 mL/min,再经过 10 min,载气流速继续从 10 mL/min 均匀增加到 100 mL/min,保持 30 min。整个载气程序运行时间为 50 min。进样口温度设为 80 °C。

1.1.6.2 IMS 条件 电离源为氚源(^3H);离子迁移管长度为 53 mm,电场强度为 500 V/cm;迁移管温度设为 45 °C,使用高纯氮气(纯度 \geq 99.999%)作为漂移气体,漂移气体的流速设为 75 mL/min,采用正离子模式。

1.1.6.3 挥发性化合物定性及相对含量计算 检测 6 种酮的混合标准样品,建立保留时间和保留指数的校准曲线,随后通过目标物的保留时间计算其保留指数,使用 VOCal 软件内置的 GC 保留指数(NIST 2020)数据库和 IMS 迁移时间数据库进行检索和对比,从而对目标物进行定性分析。

采用面积归一法计算不同挥发性化合物的相对含量,计算公式如下:

$$\text{相对含量} = \frac{\text{特定组分的峰面积}}{\text{总峰面积}} \times 100\% \quad (2)$$

1.2 数据处理

每处理重复 3 次,采用 Excel 2019,SPSS 23 和 Origin 2021 进行数据处理和图表绘制;利用 VOCal 数据处理软件生成挥发性成分的指纹图谱,并计算样品间欧

式距离;利用 SIMCA 14.1 软件进行正交偏最小二乘判别分析(Orthogonal partial least squares discriminant analysis,OPLS-DA),并计算变量投影重要度。

2 结果与分析

2.1 不同加工环节沙棘原浆总酚和 pH 值的变化

如图 1A 所示,破壁处理后的沙棘原浆的总酚含量和对照相比无显著差异($P > 0.05$)。酶解处理后的沙棘原浆的总酚含量显著高于破壁处理后的沙棘原浆($P < 0.05$),均质处理后的沙棘原浆的总酚含量显著高于酶解处理后的沙棘原浆($P < 0.05$),这是因为酶解处理和均质处理均能破坏细胞壁,导致细胞内容物进一步释放^[19-20]。而灭菌处理后的沙棘原浆的总酚含量显著低于均质处理后的沙棘原浆($P < 0.05$)。

如图 1B 所示,加工过程中,沙棘原浆的 pH 值为 2.70~2.95。破壁处理后的沙棘原浆的 pH 值和对照相比无显著差异($P > 0.05$),酶解处理后的沙棘原浆的 pH 值显著低于破壁处理后的沙棘原浆($P < 0.05$),均质处理后的沙棘原浆的 pH 值显著低于酶解处理后的沙棘原浆($P < 0.05$),灭菌处理后的沙棘原浆的 pH 值显著高于均质处理后的沙棘原浆($P < 0.05$)。这可能是因为加热导致果汁中共轭碱基的中和能力下降,使 H^+ 含量降低,从而提高 pH 值^[21]。

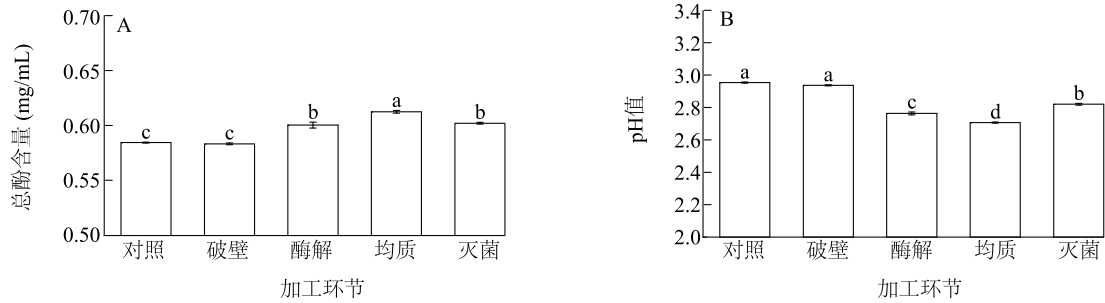
2.2 不同加工环节沙棘原浆抗坏血酸含量和 DPPH 自由基清除率的变化

如图 2A 所示,与对照相比,破壁处理后的沙棘原浆的抗坏血酸含量显著下降($P < 0.05$)。酶解处理后的沙棘原浆的抗坏血酸含量显著高于破壁处理后的沙棘原浆($P < 0.05$)。均质处理后的沙棘原浆的抗坏血酸含量和酶解处理后的沙棘原浆相比无显著差异($P > 0.05$)。灭菌处理后的沙棘原浆的抗坏血酸含量显著低于均质处理后的沙棘原浆($P < 0.05$)。表明果胶酶和纤维素酶能够有效促进沙棘原浆中抗坏血酸的析出,而榨汁处理的物理破坏和灭菌处理的高温是影响沙棘原浆中抗坏血酸含量降低的主要原因。

如图 2B 所示,酶解处理后的沙棘原浆对 DPPH 自由基的清除率显著高于破壁处理后的沙棘原浆($P < 0.05$),酶解处理和均质处理后的沙棘原浆对 DPPH 自由基的清除率较高,分别达 90.56% 和 91.37%。灭菌处理后的沙棘原浆对 DPPH 自由基

的清除率显著低于均质处理后的沙棘原浆 ($P < 0.05$)。有研究表明,抗氧化能力与抗坏血酸

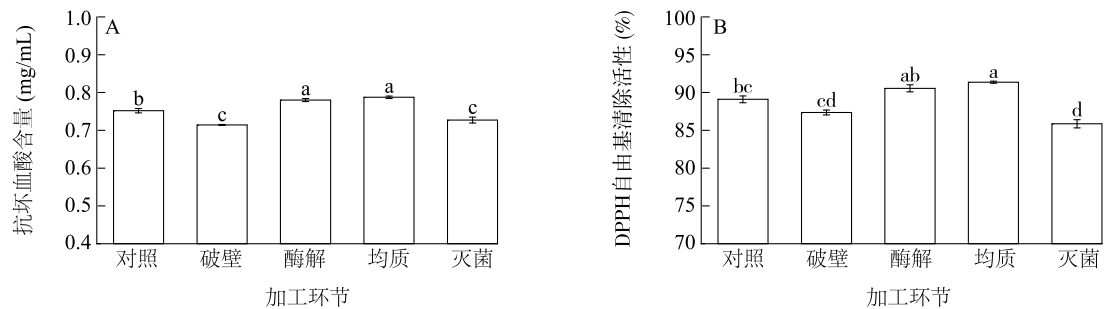
含量有关^[22],沙棘原浆中抗坏血酸含量的变化可能直接影响其抗氧化能力。



图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图1 不同加工环节沙棘原浆总酚含量(A)和pH值(B)的变化

Fig.1 Changes in the total phenol content (A) and pH value (B) of sea buckthorn puree in different processing stages



图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图2 不同加工环节沙棘原浆抗坏血酸含量(A)和DPPH自由基清除活性(B)的变化

Fig.2 Changes in ascorbic acid content (A) and DPPH free radical scavenging activity (B) of sea buckthorn puree in different processing stages

2.3 关键加工环节的筛选

双边检验旨在区分样品之间的差异,通过比较临近加工环节样品的整体香气差异,可以确定对风味影响较大的加工环节,结果如表1所示,对照(A)和破壁处理(B)后的沙棘原浆香气轮廓没有显著差异 ($P_A = P_B$),酶处理(A)后和均质处理(B)后的沙

棘原浆香气轮廓没有显著差异 ($P_A = P_B$)。而破壁处理和酶解处理比较组中,有18人更偏爱酶解处理后的沙棘原浆,均质处理和灭菌处理比较组中有16人偏爱均质处理后的沙棘原浆,即酶解处理和灭菌处理是影响沙棘原浆挥发性成分变化的关键步骤,满足备择假设 $P_A \neq P_B$ 。

表1 不同比较组的双边检验结果

Table 1 Results of two-tailed tests for different comparison groups

项目	对照(A)和破壁处理(B)比较组	破壁处理(A)和酶解处理(B)比较组	酶解处理(A)和均质处理(B)比较组	均质处理(A)和灭菌处理(B)比较组
偏爱A人数	12	2	9	16
偏爱B人数	8	18	11	4

同列最大值大于15,则说明该检验达到了5%的置信水平,因此拒绝原假设,接受备择假设。

2.4 关键加工环节沙棘原浆挥发性成分

2.4.1 关键加工环节沙棘原浆挥发性成分定性分析 如表2所示,从对照、酶解处理后和灭菌处理后的沙棘原浆中共鉴定出83个吸收峰,包

括酯类化合物34种、醇类化合物11种、醛类化合物21种、酮类化合物5种、萜烯类化合物5种、吡嗪类化合物4种、酸类化合物2种和含硫化合物1种。

表 2 关键加工环节沙棘原浆的挥发性物质及相对含量

Table 2 Volatile substances and their relative contents in sea buckthorn puree at key processing stages

类型	编号	化合物名称	气味特征	CAS	RI	相对含量(%)		
						对照	酶解后的沙棘原浆	灭菌后的沙棘原浆
酯类	1	醋酸辛酯(M)	橙茉莉味	C112141	1 482.1	3.49±0.04b	3.43±0.02c	3.56±0.01a
	2	醋酸辛酯(D)	橙茉莉味	C112141	1 481.4	1.42±0.12a	1.43±0.02a	1.50±0.03a
	3	辛酸乙酯(M)	果香味	C106321	1 456.0	3.58±0.10b	3.59±0.04ab	3.71±0.04a
	4	辛酸乙酯(D)	果香味	C106321	1 455.5	2.98±0.13b	3.31±0.01a	3.43±0.04a
	5	乙酸叶醇酯	甜果味、青草味	C3681718	1 371.4	0.16±0.01b	0.20±0a	0.11±0c
	6	庚酸乙酯(M)	果味、朗姆酒味	C106309	1 345.1	0.33±0.01b	0.38±0.01a	0.38±0.02a
	7	庚酸乙酯(D)	果味、朗姆酒味	C106309	1 344.6	0.06±0.01a	0.07±0.01a	0.07±0a
	8	丁酸戊酯	甜果香味	C540181	1 328.1	0.15±0.01b	0.17±0a	0.18±0a
	9	反式-2-己烯酸乙酯	果味、蔬菜味	C27829727	1 355.5	0.07±0.01a	0.07±0a	0.07±0a
	10	异戊酸异戊酯(M)	甜果味	C659701	1 304.5	2.28±0.05a	2.19±0.02b	2.24±0.01ab
	11	异戊酸异戊酯(D)	甜果味	C659701	1 304.5	5.77±0.66a	6.10±0.03a	6.21±0.01a
	12	2-甲基丁酸-3-甲基丁酯(M)	果香味	C27625350	1 286.6	0.90±0.03b	0.94±0.01ab	0.97±0.01a
	13	2-甲基丁酸-3-甲基丁酯(D)	果香味	C27625350	1 286.6	0.58±0.01b	0.66±0.01a	0.66±0.01a
	14	乙酸己酯(M)	果香味	C142927	1 277.1	0.61±0.01c	0.63±0.01b	0.65±0a
	15	乙酸己酯(D)	果香味	C142927	1 277.1	0.20±0.02a	0.21±0a	0.21±0a
	16	正己酸乙酯(M)	甜味、果味	C123660	1 246.6	1.33±0.04a	1.26±0b	1.31±0a
	17	正己酸乙酯(D)	甜味、果味	C123660	1 247.1	5.54±0.03a	5.39±0.03c	5.48±0.02b
	18	异戊酸异丁酯(M)	甜果味	C589593	1 203.8	0.39±0.01b	0.49±0a	0.48±0a
	19	异戊酸异丁酯(D)	甜果味	C589593	1 203.2	0.40±0.02b	0.54±0a	0.55±0a
	20	乙酸戊酯(M)	香蕉味、梨味	C628637	1 168.1	1.27±0.09a	1.35±0.01a	1.37±0a
	21	乙酸戊酯(D)	香蕉味、梨味	C628637	1 168.1	0.77±0.18a	0.94±0.01a	0.91±0a
	22	戊酸乙酯(M)	苹果味、菠萝味	C539822	1 149.6	0.83±0.01b	0.90±0.01a	0.89±0.01a
	23	戊酸乙酯(D)	苹果味、菠萝味	C539822	1 149.6	0.44±0.02c	0.56±0a	0.51±0b
	24	乙酸异戊酯(M)	香蕉味	C123922	1 136.9	0.84±0.02a	0.81±0.01b	0.80±0.01b
	25	乙酸异戊酯(D)	香蕉味	C123922	1 137.2	0.43±0.02a	0.42±0a	0.39±0b
	26	异戊酸乙酯	菠萝味、什锦水果味	C108645	1 080.7	7.02±0.10b	7.20±0.07a	7.17±0.01a
	27	2-甲基丁酸乙酯	青苹果味	C7452791	1 066.7	5.06±0.10a	5.07±0.03a	5.08±0.01a
	28	丁酸乙酯	苹果味、菠萝味	C105544	1 051.5	4.09±0.01b	4.14±0.02a	4.07±0.01b
	29	异戊酸甲酯	浓果香味	C556241	1 035.1	0.48±0.01c	0.68±0.01a	0.57±0b
	30	2-甲基丁酸甲酯	酯类味、水果味	C868575	1 025.5	0.33±0.01b	0.39±0.01a	0.32±0c
	31	异丁酸乙酯	酒香味	C97621	979.6	2.26±0.23b	2.70±0.01a	2.54±0a
	32	丙酸乙酯	甜果味、朗姆酒味、葡萄味	C105373	969.3	0.27±0.06a	0.09±0b	0.09±0b
	33	乙酸乙酯	果香味	C141786	894.7	1.60±0.16a	1.42±0.01a	1.13±0b
	34	乙酸甲酯	微辛味、甘味	C79209	847.1	0.07±0c	0.59±0.02a	0.20±0b
醇类	35	4-萜烯醇	胡椒木质混合味	C562743	1 717.4	0.16±0.02a	0.14±0.01a	0.13±0a
	36	正己醇	温和的甜味	C111273	1 383.5	0.15±0.03a	0.17±0.01a	0.16±0.01a
	37	正戊醇	杂醇油味	C71410	1 265.9	0.29±0.04b	0.35±0a	0.34±0ab
	38	2-甲基丁醇	酒精味	C137326	1 239.1	0.61±0b	0.62±0.01ab	0.64±0.01a
	39	异戊醇(M)	轻微酒精味	C123513	1 222.1	1.18±0.01ab	1.16±0b	1.19±0a
	40	异戊醇(D)	轻微酒精味	C123513	1 222.1	1.66±0.07a	1.70±0.01a	1.70±0.01a
	41	正丁醇	强烈的酒精味	C71363	1 161.0	0.25±0.02a	0.13±0b	0.13±0b

续表2 Continued2

类型	编号	化合物名称	气味特征	CAS	RI	相对含量(%)		
						对照	酶解后的沙棘原浆	灭菌后的沙棘原浆
醛类	42	异丁醇	刺激性味道	C78831	1 110.1	0.26±0.02a	0.27±0a	0.25±0a
	43	仲丁醇(M)	葡萄酒味	C78922	1 039.0	0.35±0.01a	0.32±0.01b	0.34±0.01ab
	44	仲丁醇(D)	葡萄酒味	C78922	1 039.5	0.78±0.04a	0.55±0.01b	0.58±0b
	45	乙醇	酒精味	C64175	943.3	8.74±0.14b	8.65±0.02b	9.07±0.04a
	46	2,4-二甲基苯甲醛(M)	樱桃味、杏仁香料味、香草味	C15764166	1 804.5	4.23±0.05a	3.73±0.02c	3.85±0.03b
	47	2,4-二甲基苯甲醛(D)	樱桃味、杏仁香料味、香草味	C15764166	1 805.2	0.34±0.03a	0.29±0.02b	0.30±0.01ab
	48	苯甲醛	杏仁味	C100527	1 552.0	0.85±0.07a	0.54±0.01c	0.69±0.01b
	49	香茅醛	甜干花草本味	C106230	1 503.4	0.98±0.02a	0.96±0.01a	0.99±0.02a
	50	壬醛(M)	腊味、豌豆味	C124196	1 406.7	0.54±0.04a	0.22±0c	0.27±0.01b
	51	壬醛(D)	腊味、豌豆味	C124196	1 406.2	0.07±0.01a	0.04±0.01b	0.05±0.01b
	52	反-2-辛烯醛	香蕉蜡质味	C2548870	1 439.8	0.20±0a	0.11±0b	0.12±0b
	53	(E)-2-庚烯醛	绿色蔬菜味	C18829555	1 333.6	0.14±0a	0.09±0c	0.11±0b
	54	庚醛(M)	醛脂肪味	C111717	1 196.8	0.66±0.03a	0.45±0c	0.59±0b
	55	庚醛(D)	醛脂肪味	C111717	1 196.8	0.77±0.08a	0.50±0.01c	0.63±0.01b
	56	正己醛(M)	刺鼻的气味	C66251	1 101.4	0.82±0.01a	0.63±0.01c	0.74±0.01b
	57	正己醛(D)	刺鼻的气味	C66251	1 101.4	0.70±0.04a	0.40±0.01c	0.46±0.01b
	58	正戊醛	发酵面包味、果味	C110623	1 003.1	0.62±0.01a	0.45±0.01b	0.47±0b
	59	异戊醛	巧克力味、桃子味	C590863	928.3	0.70±0.01a	0.28±0b	0.27±0b
	60	正丁醛	辛辣而强烈	C123728	884.3	0.42±0.01a	0.36±0.01c	0.40±0b
	61	丙醛(M)	泥土味、坚果味	C123386	812.9	1.15±0.03a	0.96±0b	0.97±0.01b
酮类	62	丙醛(D)	泥土味、坚果味	C123386	814.1	0.66±0.02a	0.44±0.01b	0.46±0b
	63	异丁醛	刺鼻的气味	C78842	823.8	0.04±0a	0.03±0b	0.03±0b
	64	反式-2-己烯醛	奶酪味	C6728263	1 233.2	0.05±0a	0.03±0c	0.03±0b
	65	反式-2-戊烯醛	辛辣味	C1576870	1 149.9	0.09±0a	0.05±0c	0.05±0b
	66	乙缩醛	绿色、泥土味、甜味	C105577	903.8	0.91±0.02c	2.45±0.02b	2.63±0.01a
	67	甲基庚烯酮	柑橘味、果香味	C110930	1 350.0	0.21±0a	0.17±0c	0.18±0b
	68	2-丁酮	薄荷味	C78933	911.8	1.11±0.07a	0.46±0b	0.41±0b
	69	丙酮	薄荷味	C67641	832.1	2.83±0.06a	2.07±0.02c	2.38±0.02b
	70	2-戊酮	甜果香味、酒香味、木质香味	C107879	998.8	0.48±0.05b	1.57±0.10a	0.28±0.01c
	71	2-庚酮	果味、草本木香味	C110430	1 192.2	0.06±0b	0.19±0.01a	0.05±0b
萜烯类	72	(E,E)- α -法尼烯	柑橘草药味、薰衣草味	C502614	1 851.7	0.47±0.07b	0.69±0.07a	0.68±0.02a
	73	蒎品油烯(M)	柑橘味	C586629	1 318.9	0.85±0.07a	0.85±0.02a	0.90±0.01a
	74	蒎品油烯(D)	柑橘味	C586629	1 318.4	0.25±0.03a	0.24±0.01a	0.25±0.01a
	75	γ -松油烯	柑橘味、柠檬味	C99854	1 263.9	0.20±0.05a	0.25±0.01a	0.26±0a
	76	柠檬烯	柠檬味	C138863	1 239.6	0.95±0.08a	0.98±0.01a	0.93±0a
吡嗪类	77	2-乙基-3,5-二甲基吡嗪(M)	坚果味	C13925070	1 446.2	1.50±0.09a	1.48±0.01a	1.50±0.01a
	78	2-乙基-3,5-二甲基吡嗪(D)	坚果味	C13925070	1 446.2	0.23±0.05a	0.23±0a	0.23±0a
	79	2,3-二甲基-5-乙基吡嗪(M)	烧焦的爆米花味	C15707343	1 426.3	2.17±0.05b	2.23±0.03b	2.34±0.02a
	80	2,3-二甲基-5-乙基吡嗪(D)	烧焦的爆米花味	C15707343	1 426.9	0.51±0.04b	0.55±0.01ab	0.60±0.01a
酸类	81	丙酸	酸性奶酪味、醋味	C79094	1 636.4	0.18±0.04a	0.16±0.01a	0.14±0a
	82	醋酸	白醋味	C64197	1 503.4	1.45±0.08a	1.26±0.02b	1.20±0.02b
含硫化化合物	83	二甲基硫醚	异臭味	C75183	786.3	0.22±0c	0.24±0b	0.28±0a

CAS:化学物质的唯一识别码;RI:保留指数;M:单体;D:二聚体;同一行数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

为更加直观地观察不同加工环节之间沙棘原浆挥发性物质相对含量的变化,对其进行统计归类。如图 3 所示,脂类化合物在沙棘原浆整体香气物质中占比最大,这与前人研究结果一致^[23-25]。与对照相比,酶解处理后的沙棘原浆中醛类物质相对含量从 14.94% 降至 13.01%,酯类化合物相对含量从 56.00% 升至 58.32%。与对照相比,酶解处理后的沙棘原浆中乙缩醛和 2-戊酮的含量显著增加,乙缩醛具有绿色、泥土味和甜味特征,2-戊酮则呈现甜果香味、酒香味和木质香味,表明酶解处理可赋予沙棘原浆独特的香气。与酶解处理后的沙棘原浆相比,灭菌处理后的沙棘原浆中醛类物质相对含量上升,而脂类和吡嗪类物质的相对含量下降。

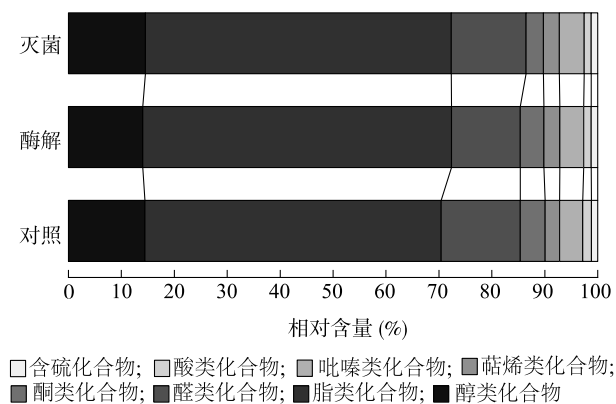


图 3 关键加工环节沙棘原浆中挥发性成分相对含量变化

Fig.3 Changes in the relative contents of volatile components in sea buckthorn puree at key processing stages

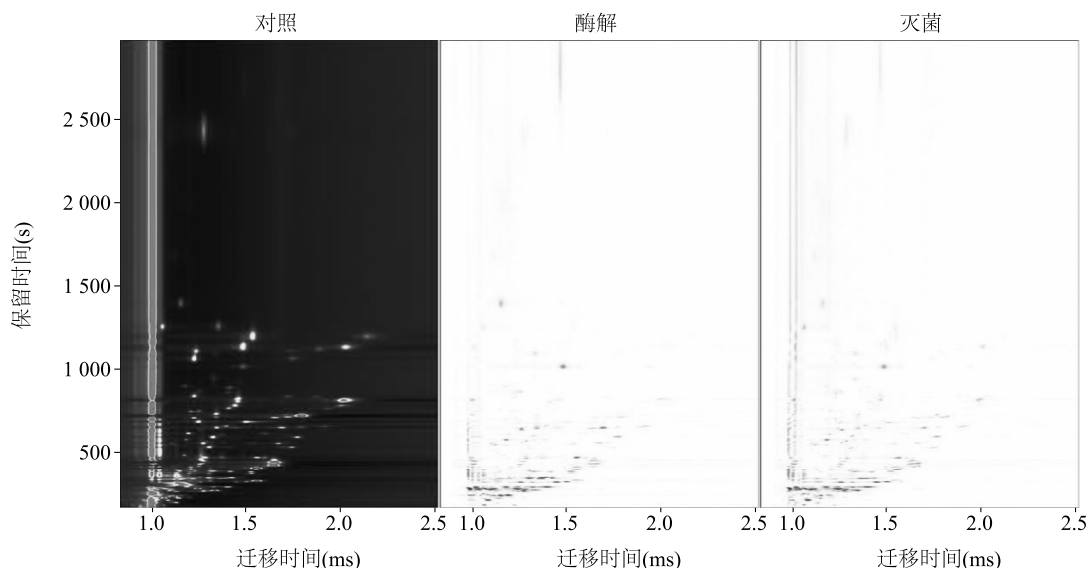
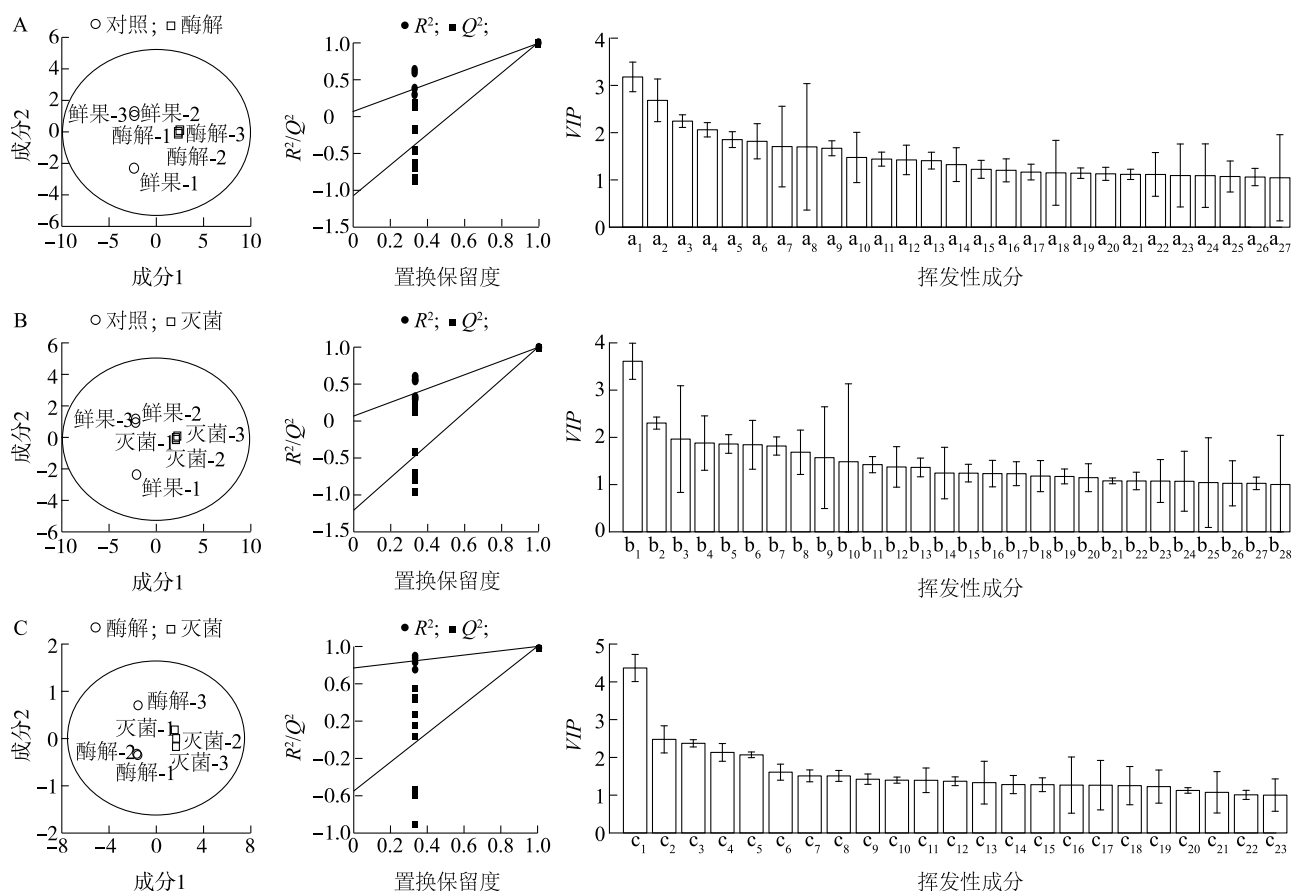


图 4 关键加工环节沙棘原浆中挥发性成分的差异光谱

Fig.4 Differential spectra of volatile components in sea buckthorn puree at key processing stages

2.4.2 关键加工环节沙棘原浆挥发性成分差异分析 为明确沙棘原浆风味物质的具体成分,揭示关键加工环节对挥发性物质的影响,基于 GC-IMS 技术,对沙棘鲜果、酶解、灭菌环节样品的挥发性物质进行分析。图 4 为 GC-IMS 差异图谱,当酶解处理后的沙棘原浆中挥发性有机物含量、灭菌处理后的沙棘原浆中挥发性有机物含量和对照相同时,背景为白色,而颜色越深表示酶解处理后的沙棘原浆中挥发性有机物含量、灭菌处理后的沙棘原浆中挥发性有机物含量和对照差异越大。尽管差异谱图能够直观展示不同加工环节沙棘原浆中挥发性成分含量差异,但尚未经过精确验证,还需要对挥发性成分含量进行模型校准。

正交偏最小二乘法判别分析 (OPLS-DA) 是一种有监督的判别分析统计方法,用于建立挥发性化合物与样品类别之间的关系模型,并实现样品分类^[26]。如图 5 所示,各加工环节沙棘原浆中挥发性物质区分度明显,3 组预测模型的参数分别为: $R_X^2 = 0.98, R_Y^2 = 1.00, Q^2 = 1.00$ (图 5A); $R_X^2 = 0.98, R_Y^2 = 1.00, Q^2 = 1.00$ (图 5B); $R_X^2 = 0.93, R_Y^2 = 1.00, Q^2 = 1.00$ (图 5C)。3 组模型的 R^2 和 Q^2 均接近或等于 1,说明 OPLS-DA 模型拟合精度较高。此外,对 3 个模型进行 200 次的置换检验,回归线与 y 轴相交且斜率较大, $Q_{intercept}^2$ 均小于 0,表明模型可靠。



A: 鲜果与酶解后的沙棘原浆对比图; B: 鲜果与灭菌后的沙棘原浆对比图; C: 酶解后的沙棘原浆与灭菌后的沙棘原浆对比图。a₁: 乙缩醛; a₂: 2-戊酮; a₃: 丙酮; a₄: 2-丁酮; a₅: 乙酸甲酯; a₆: 2,4-二甲基苯甲醛; a₇: 异戊酸异丁酯(D); a₈: 异乙酸乙酯; a₉: 异戊醛; a₁₀: 辛酸乙酯(D); a₁₁: 壬醛(M); a₁₂: 苯甲醛; a₁₃: 正己醛(D); a₁₄: 庚醛(D); a₁₅: 仲丁醇(D); a₁₆: 丙醛(D); a₁₇: 庚醛(M); a₁₈: α -法尼烯; a₁₉: 异戊酸甲酯; a₂₀: 丙醛(M); a₂₁: 正己醛(M); a₂₂: 醋酸; a₂₃: 乙酸乙酯; a₂₄: 乙酸戊酯(D); a₂₅: 丙酸乙酯; a₂₆: 正戊醛; a₂₇: 异戊酸乙酯。b₁: 乙缩醛; b₂: 2-丁酮; b₃: 异戊酸异戊酯(D); b₄: 乙酸乙酯; b₅: 丙酮; b₆: 辛酸乙酯(D); b₇: 异戊醛; b₈: 2,4-二甲基苯甲醛; b₉: 乙醇; b₁₀: 异丁酸乙酯; b₁₁: 王醛(M); b₁₂: 醋酸; b₁₃: 正己醛(D); b₁₄: α -法尼烯; b₁₅: 仲丁醇(D); b₁₆: 丙醛(D); b₁₇: 2-戊酮; b₁₈: 丙酸乙酯; b₁₉: 丙醛(M); b₂₀: 2,3-二甲基-5-乙基吡嗪; b₂₁: 异戊酸异丁酯(D); b₂₂: 正戊醛; b₂₃: 苯甲醛; b₂₄: 乙酸戊酯(D); b₂₅: 异戊酸乙酯; b₂₆: 庚醛(D); b₂₇: 乙酸甲酯; b₂₈: 辛酸乙酯(M)。c₁: 2-戊酮; c₂: 乙醇; c₃: 乙酸甲酯; c₄: 丙酮; c₅: 乙酸乙酯; c₆: 乙缩醛; c₇: 异丁酸乙酯; c₈: 苯甲醛; c₉: 2-庚酮; c₁₀: 庚醛(M); c₁₁: 醋酸辛酯(M); c₁₂: 庚醛(D); c₁₃: 2,4-二甲基苯甲醛; c₁₄: 辛酸乙酯(M); c₁₅: 正己醛(M); c₁₆: 异戊酸甲酯; c₁₇: 2,3-二甲基-5-乙基吡嗪; c₁₈: 辛酸乙酯(D); c₁₉: 异戊酸异戊酯(D); c₂₀: 乙酸叶醇酯; c₂₁: 正己酸乙酯(D); c₂₂: 丁酸乙酯; c₂₃: 2-甲基丁酸甲酯。VIP: 变量重要性投影值。

图5 关键加工环节沙棘原浆中挥发性成分正交偏最小二乘法判别分析(OPLS-DA)得分图、置换检验及变量重要性投影值排序

Fig.5 Orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA) score plot, permutation test and variable importance in projection value ranking of volatile components in sea buckthorn puree at key processing steps

通过 OPLS-DA 分析,每个化合物可以得到一个变量投影重要性值(VIP),VIP>1 的挥发性化合物在样品区分中起关键作用^[27]。如图 5A 所示,对照和酶解处理后的沙棘原浆的差异性化合物包括乙缩醛、2-戊酮、丙酮、2-丁酮、乙酸甲酯等 27 种化合物。如图 5B 所示,对照和灭菌处理后的沙棘原浆的差异性化合物包括乙缩醛、2-丁酮、异戊酸异戊酯

(D)、乙酸乙酯、丙酮等 28 种化合物。如图 5C 所示,酶解处理后的沙棘原浆和灭菌处理后的沙棘原浆的差异性化合物包括 2-戊酮、乙醇、乙酸甲酯、丙酮、乙酸乙酯、乙缩醛等 23 种化合物。综上,乙缩醛、2-戊酮、丙酮、2-丁酮、乙酸甲酯是区分对照、酶解处理后的沙棘原浆和灭菌处理后的沙棘原浆的关键差异性化合物。

基于最近邻算法计算 3 组样品之间的欧氏距离。如图 6 所示,各加工环节沙棘原浆中挥发性化合物在空间分布上存在显著差异,表明酶解处理后

的沙棘原浆和灭菌处理后的沙棘原浆中挥发性化合物的组成发生显著变化,相似度较低。这一结果与 OPLS-DA 分析结果一致。

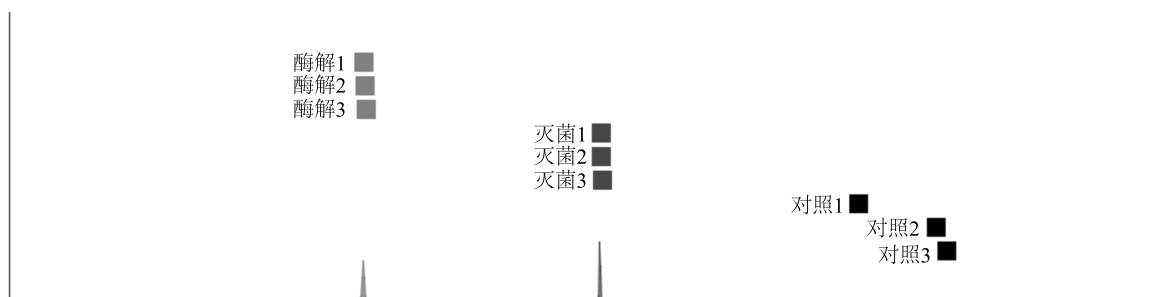


图 6 关键加工环节沙棘原浆中挥发性成分的最近邻算法的欧氏距离

Fig.6 Euclidean distance of volatile components in sea buckthorn puree at key processing stages based on the nearest neighbor algorithm

3 结论

各加工环节均会对沙棘原浆的品质产生影响。与对照相比,破壁处理后的沙棘原浆中抗坏血酸含量显著降低($P<0.05$);与破壁处理后的沙棘原浆相比,酶解处理后的沙棘原浆总酚含量、抗坏血酸含量、抗氧化能力显著提高($P<0.05$);与均质处理后的沙棘原浆相比,灭菌处理后的沙棘原浆总酚含量、抗坏血酸含量、抗氧化能力显著降低($P<0.05$)。双边检验结果表明,酶解处理和灭菌处理是影响沙棘原浆风味的关键加工环节。利用 GC-IMS 技术,在对照、酶解处理后的沙棘原浆和灭菌处理后的沙棘原浆中共鉴定出 34 种酯类化合物、11 种醇类化合物、21 种醛类化合物、5 种酮类化合物、5 种萜烯类化合物、4 种吡嗪类化合物、2 种酸类化合物和 1 种含硫化合物,这些化合物在加工过程中一直存在,但含量随着不同加工环节发生变化。其中乙缩醛、2-戊酮、丙酮、2-丁酮、乙酸甲酯是区分对照、酶解处理后的沙棘原浆和灭菌处理后的沙棘原浆的关键挥发性化合物。本研究不仅揭示了加工过程中沙棘原浆品质的动态变化规律,同时为优化沙棘原浆加工工艺及提升产品品质提供了理论依据。

参考文献:

- [1] JHAJHARIYA M, MANGLA Y, CHANDRA A, et al. Variable resource allocation pattern, biased sex-ratio, and extent of sexual dimorphism in subdioecious *Hippophae rhamnoides* [J]. PLoS One, 2024, 19(4): 302211.
- [2] 全小丽,屈宏斌. 阿勒泰大果沙棘产业发展现状[J]. 新疆林

- 业, 2022(5): 30-33.
- [3] 劳斐,李杰,王翻红. 阿勒泰地区大果沙棘营养成分研究[J]. 食品安全导刊, 2021(21): 122-123.
- [4] SUN R, ZHANG M X, ZHAO J, et al. Anti-atherosclerotic effect of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) and its molecular mechanism[J]. Journal of Functional Foods, 2024, 117: 106248.
- [5] 王磊. 新疆沙棘产业发展现状分析及建议[J]. 新疆林业, 2024(3): 25-27.
- [6] XU H G, HAO Q F, YUAN F, et al. Nonenzymatic browning criteria to sea buckthorn juice during thermal processing[J]. Journal of Food Process Engineering, 2015, 38(1): 67-75.
- [7] AABY K, MARTINSEN B K, BORGE G I A, et al. Bioactive compounds and color of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) purees as affected by heat treatment and high-pressure homogenization[J]. International Journal of Food Properties, 2020, 23(1): 651-664.
- [8] 高文涛,贾艺彬,温艳斌,等. 酶解法制备黄花菜汁工艺优化及抗氧化性分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(12): 164-171.
- [9] ZHU D S, KOU C C, SHEN Y S, et al. Effects of different processing steps on the flavor and colloidal properties of cloudy apple juice[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(9): 3819-3826.
- [10] 宋自娟,徐怀德,高锦明,等. 冷打浆法沙棘浓缩浊汁加工过程中挥发性成分的变化[J]. 中国食品学报, 2015, 15(10): 263-274.
- [11] RONG Y T, XIE J L, YUAN H B, et al. Characterization of volatile metabolites in Pu-erh teas with different storage years by combining GC-E-Nose, GC-MS, and GC-IMS[J]. Food Chemistry, 2023, 18: 100693.
- [12] GOU M, BI J F, CHEN Q Q, et al. Advances and perspectives in fruits and vegetables flavor based on molecular sensory science[J]. Food Reviews International, 2023, 39(6): 3066-3079.
- [13] LIU X, ZHANG C, WANG H, et al. Ultrasonic treatment maintains the flavor of the melon juice[J]. Ultrasonics Sonochemistry,

- 2023,92:106284.
- [14] LIU S X, LOU Y, LI Y X, et al. Comparison of anthocyanin and volatile organic compounds in juices and fruit wines made from blood oranges [*Citrus sinensis* (L.) Osbeck] at different maturity stages[J]. Food Bioscience,2023,56:103194.
- [15] 郭加艳,崔 燕,宣晓婷,等. 基于原料成熟度的水蜜桃果汁风味演变[J]. 食品工业科技,2023,44(13):299-307.
- [16] 付 勋,张海彬,聂青玉,等. 猕猴桃品质指标差异分析及 GC-IMS 分析果汁中挥发性物质[J]. 食品科学,2022,43(10):247-254.
- [17] 范利君,王志鹏,宋安康,等. 赤霞珠葡萄籽多酚稳定性和体外生物活性研究[J]. 食品工业科技,2023,44(16):107-115.
- [18] FAWOIE O A, OPARA U L. Changes in physical properties, chemical and elemental composition and antioxidant capacity of pomegranate (cv. Ruby) fruit at five maturity stages[J]. Scientia Horticulturae,2013,150:37-46.
- [19] SANTI L, BEYS-DA-SILVA W O, BERGER M, et al. Penicillium oxalicum secretomic analysis identify plant cell wall degrading enzymes important for fruit juice extraction[J]. Journal of Food Science and Technology,2021,58(5):1764-1775.
- [20] ATENCIO S, VERKEMPINCK S H E, BERNAERTS T, et al. Impact of processing on the production of a carotenoid-rich *Cucurbita maxima* cv. Hokkaido pumpkin juice[J]. Food Chemistry, 2022,380:132191.
- [21] TIAN Y, SUN L J, YANG Y L, et al. Changes in the physico-chemical properties, aromas and polyphenols of not from concentrate (NFC) apple juice during production[J]. Cyta-Journal of Food,2018,16(1):755-764.
- [22] NJUS D, KELLEY P M, TU Y J, et al. Ascorbic acid:the chemistry underlying its antioxidant properties[J]. Free Radical Biology and Medicine,2020,159:37-43.
- [23] 任婧楠,贾 潇,张智锋,等. 新鲜沙棘果汁和沙棘原浆的风味和营养品质分析[J]. 食品科学,2024,45(4):164-170.
- [24] MA X Y, YANG W, MARSOL-VALL A, et al. Analysis of flavour compounds and prediction of sensory properties in sea buckthorn (*Hippophaë rhamnoides* L.) berries[J]. International Journal of Food Science & Technology,2019,55(4):1705-1715.
- [25] WU D, XIA Q, CHENG H, et al. Changes of volatile flavor compounds in sea buckthorn juice during fermentation based on gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Foods, 2022, 11(21):3471.
- [26] 丁 健,阮成江,杨 红,等. 基于 UPLC-MS 技术分析沙棘果肉成熟过程中生物活性成分差异[J]. 食品科学,2023,44(22):276-286.
- [27] GOU Y Z, HAN Y P, LI J, et al. Discriminant analysis of aroma differences between cow milk powder and special milk powder (donkey, camel, and horse milk powder) in Xinjiang based on GC-IMS and multivariate statistical methods[J]. Foods,2023,12(21):4036.

(责任编辑:成纾寒)