易心杨,李卫丽,郑薇,等. 多种抑制剂对热加工荔枝汁风味及营养品质的影响研究 [J]. 食品工业科技,2026,47(1):177−188. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010274

YI Xinyang, LI Weili, ZHENG Wei, et al. Effects of Various Inhibitors on the Flavor and Nutritional Quality of Heat-treated Lychee Juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(1): 177−188. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010274

·研究与探讨·

多种抑制剂对热加工荔枝汁风味及营养品质的影响研究

易心杨[1,2],李卫丽[1,2],郑　薇[2],张媛媛[1],胡腾根[2],徐玉娟[2],安可婧[1,2,*]

(1.华南农业大学食品学院,广东广州 510642;
2.广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所,农业农村部功能食品重点实验室,
广东省农产品加工重点实验室,广东广州 510610)

摘　要:为了减少荔枝汁在加热后产生的“蒸煮”异味，筛选了邻苯三酚、没食子酸、迷迭香酸、儿茶素、抗坏血酸及葡萄糖氧化酶六种抑制剂，从色泽、pH、香气轮廓、电子鼻、挥发性成分、降硫率以及总酚、总黄酮、抗氧化特性等角度去评价六种抑制剂对荔枝汁风味及营养品质的影响。结果显示抗坏血酸和没食子酸抑制剂处理的样品与新鲜汁相比的色差值最小；整体香气轮廓显示葡萄糖氧化酶抑制蒸煮异味效果最佳，其次为迷迭香酸；电子鼻结果显示葡萄糖氧化酶处理的荔枝汁与新鲜汁最为接近，其次是儿茶素和邻苯三酚。挥发性成分的主成分分析结果显示抗坏血酸抑制剂处理的样品与新鲜汁最接近，其次为没食子酸、儿茶素、迷迭香酸。降硫率结果显示葡萄糖氧化酶的降硫效果最为显著，对二甲基硫醚、二甲基三硫醚、甲硫基丙醛的抑制率均达到 100%，对二甲基二硫醚的抑制率为 61.11%。营养品质方面，多酚类抑制剂与抗坏血酸处理的总酚、总黄酮含量和抗氧化性较新鲜汁均显著上升（$P<0.05$），而葡萄糖氧化酶处理的总酚、总黄酮含量较新鲜汁上升但抗氧化活性与新鲜汁无显著差异。综合色泽、pH、香气轮廓、营养品质以及降硫效果等因素进行偏最小二乘判别分析（partial least squares discriminant analysis，PLS-DA），发现葡萄糖氧化酶对荔枝汁整体品质影响最好。本研究可为荔枝以及其他热敏性水果加工过程中品质提升提供参考依据。

关键词:荔枝汁,蒸煮异味,抑制剂,偏最小二乘判别分析（PLS-DA）,全二维气相色谱-四极杆飞行时间质谱（GC×GC-QTOF MS）

中图分类号:TS255.44　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1002−0306(2026)01−0177−12　　本文网刊:

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010274

Effects of Various Inhibitors on the Flavor and Nutritional Quality of Heat-treated Lychee Juice

YI Xinyang[1,2], LI Weili[1,2], ZHENG Wei[2], ZHANG Yuanyuan[1], HU Tenggen[2], XU Yujuan[2], AN Kejing[1,2,*]

(1.College of Food Science, South China Agriculture University, Guangzhou 510642, China;
2.Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Sericultural & Agri-food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510610, China)

Abstract: In order to reduce the cooked off-flavor of lychee juice after thermal processing, six inhibitors were screened, including pyrogallol, gallic acid, rosmarinic acid, catechins, ascorbic acid, and glucose oxidase. These inhibitions were

收稿日期: 2025−01−24

基金项目: 广东省自然科学基金-面上项目（2021A1515011137）;国家自然科学基金（32472379）;广东省自然科学基金-青年提升项目（2024A1515030188）;广东省农业科学院（金颖之星）（R2023PY-JX017）。

作者简介: 易心杨（2002−）,女,硕士研究生,研究方向:食品加工与安全,E-mail:yxyhnld@163.com。

*** 通信作者:** 安可婧（1985−）,女,博士,研究员,研究方向:农产品加工及储藏工程,E-mail:ankejing2008@163.com。

evaluated based on flavor and nutritional properties such as color, pH, flavor profile, electronic nose, volatile components, sulfur-reducing rate, as well as total phenols, flavonoids contents, and antioxidant properties. The results showed that the samples treated with ascorbic acid and gallic acid had the smallest color difference compared to fresh juice. The overall aroma profile indicated glucose oxidase was the most effective inhibitor in reducing cooked off-flavor, followed by rosmarinic acid. The electronic nose results showed that the lychee juice treated with glucose oxidase was closest to fresh juice, followed by catechins and pyrogallol. The principal component analysis of volatile components showed that the sample treated with ascorbic acid was closest to fresh juice, followed by gallic acid, catechins, and rosmarinic acid. The sulfur reduction rate showed that glucose oxidase had the most significant sulfur reduction effect, with inhibition rates of 100% for dimethyl sulfide, dimethyl trisulfide, and methional, and 61.11% for dimethyl disulfide. In terms of nutritional quality, polyphenol and ascorbic acid treatment significantly improved the total phenol, total flavonoid contents as well as antioxidant properties (P<0.05), while the total phenol and total flavonoid contents of glucose oxidase-treated sample were higher than those of fresh juice but the antioxidant activities showed no significant difference compared to fresh juice. Partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) of lychee juice quality, integrating factors such as color, pH, aroma profile, nutritional quality, and sulfur reduction effect, revealed that glucose oxidase had the best effect on the overall quality. The findings of this study can provide references for quality improvement in lychee and other subtropical fruits processing industry.

Key words: lychee juice; cooked off-flavor; inhibitors; partial least squares discriminant analysis (PLS-DA); comprehensive two-dimensional gas chromatography-time of flight mass spectrometry (GC×GC-QTOF MS)

荔枝属无患子科荔枝属植物，果肉晶莹剔透，清甜多汁，是最具特色的热带亚热带水果之一，我国的荔枝种植规模居世界首位，而广东省则是我国荔枝种植的第一大省，种植面积和产量占全国 65% 以上[1−2]。然而由于荔枝成熟期集中、呼吸代谢旺盛，果实采摘后极易发生色变甚至腐烂，严重影响了荔枝的鲜销。因此，利用现代食品加工技术将相对过剩或外观品质不佳的荔枝进行深加工是保障荔枝产业健康发展、改善生态环境的当务之急。然而荔枝加工面临重要的瓶颈问题，就是其香气劣变严重，加热后容易产生明显的“蒸煮”异味。前期预实验发现当加热温度大于 50 ℃ 时，荔枝会产生明显的“蒸土豆”“煮白菜”味，当温度继续升高会产生“洋葱”“大蒜”甚至“臭鸡蛋”味，严重影响了荔枝产品的可接受程度。

目前关于热加工香气裂变的控制技术主要包括非热加工技术、加工参数调控、添加掩蔽剂以及抑制剂等。前期研究发现四种挥发性硫化物：二甲基硫醚（dimethyl sulfide, DMS）、二甲基二硫醚（dimethyl disulfide, DMDS）、二甲基三硫醚（dimethyl trisulfide, DMTS）、甲硫基丙醛（methional, MTP）是荔枝汁蒸煮异味的关键物质[3]。多项研究报道表明挥发性硫化物的产生涉及含硫氨基酸的取代反应、Strecker 降解反应和氧化反应[4−7]。因此本文选择具有降低 pH、淬灭美拉德反应中间产物、捕获中间体以及氧化挥发性硫化物等能力的化合物来抑制挥发性硫化物的生成及释放[8−10]。孙钰清等[9] 使用了儿茶素、染料木黄酮、黄豆苷元、海藻多酚及邻苯三酚处理去除甜瓜汁的热异味，其中儿茶素的效果最好。Luo 等[10] 通过添加酚类物质、维生素、氨基酸和葡萄糖氧化酶来抑制甜瓜汁的热异味，发现葡萄糖氧化酶的效果最好。刘媛媛[11] 尝试了调节 pH、添加葡萄糖氧化酶、多酚物质和环糊精控制番茄汁的热异味，发现芦丁对 DMS 和 DMTS 的抑制效果最好，而调节 pH 可以最有效地控制 MTP 的产生，但葡萄糖氧化酶的效果一般。不同抑制剂的抑制效果会由于基质的不同而存在差异。

目前在荔枝汁中还未见关于“蒸煮”异味控制的应用研究，为了更好地评估抑制剂对荔枝汁“蒸煮”异味的抑制作用以及对风味和营养品质的影响，本文筛选了儿茶素、邻苯三酚、没食子酸、迷迭香酸、抗坏血酸和葡萄糖氧化酶六种抑制剂，考察了上述抑制剂对热加工荔枝汁降硫效果、色泽、香气轮廓、挥发性成分，以及总酚、总黄酮和抗氧化性的影响。在我国最新的食品标准 GB 2760-2024 中，葡萄糖氧化酶是食品可用的酶制剂。此外维生素、酚类物质等多种抗氧化剂已经被列入食品标准，虽然邻苯三酚未被纳入国家标准，但它添加到果汁中的文献已有报道，本文也进一步探讨它的产业应用前景。基于上述内容，通过考察儿茶素、邻苯三酚、没食子酸、迷迭香酸、抗坏血酸和葡萄糖氧化酶抑制剂对果汁的影响从而为新型抑制剂的开发提供思路，也为果蔬加工过程中不良风味的控制提供参考和借鉴。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

妃子笑荔枝　购于海南海口；邻苯三酚、没食子酸、迷迭香酸、儿茶素、芦丁（纯度均为 98%），福林酚、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼（DPPH）、2,2'-联氮-二（3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸）二铵盐（ABTS）、6-羟基-2,5,7,8-四甲基色烷-2-羧酸（Trolox）、2,4,6-三吡啶基三嗪（TPTZ）　上海源叶生物科技有限公司；葡萄糖氧化酶（10000 GODU/g）、己酸乙酯（99%）　阿拉丁试剂公司；$NaNO_2$、$NaCO_3$、过硫酸钾　福晨（天津）化学试剂有限公司；抗坏血酸（分析纯）　天津市大茂化学试剂厂；C5~C20 系列正构烷烃　德国 CNW

Technologies GmbH 公司；氯化钠（分析纯）、盐酸（36%~38%）　天津市科密欧化学试剂有限公司。

CR22GIII 高速冷冻离心机　日本日立公司；WFA2000 榨汁机　美的有限公司；PEN3 电子鼻　德国 AIRSENSE 公司；UltraScan VIS 色差仪　美国 HunterLab 公司；Infinite M200pro 酶标仪　奥地利 TECAN 公司；UV1800 紫外分光光度计　日本岛津公司；FE28-Standard pH 计　梅特勒托利多科技（中国）有限公司；7890B-5977B 气相色谱-质谱联用仪、7890B-7250 气相色谱-四极杆飞行时间质谱联用仪　美国 Agilent 科技公司；50/30 μm DVB/Carboxen/PDMS 萃取针　美国 Sigma-Aldrich 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　荔枝汁的制备　挑选果实饱满的荔枝，洗净后去皮去核，榨汁，将荔枝汁用 4 层纱布过滤后在 4 ℃条件下以 10000 r/min 转速离心 10 min，取上层清汁备用。

1.2.2　抑制剂处理　参考 Luo 等[10] 方法，分别将 60 mL 荔枝汁与 60 mg 的酶粉或邻苯三酚、没食子酸、迷迭香酸、儿茶素以及抗坏血酸粉末混合，由于葡萄糖氧化酶在 30 ℃ 左右酶活较高，选择在 30 ℃ 下振荡反应 40 min，为了控制变量，其他抑制剂均在相同条件下处理，然后沸水浴处理 10 min，待降温后冷藏备用。

1.2.3　色差分析与 pH 测定　pH 采用 pH 计测定。色差参考 Oladunjoye 等[12] 的方法，采用全自动色差仪测定样品的 L^*、a^*、b^*，其中 L^*为明度指数，L^*=0 表示黑色，L^*=100 表示白色；+a 方向颜色接近红色，−a 方向颜色接近绿色；+b 方向接近黄色，−b 方向接近蓝色。总色差△E 的对照为新鲜荔枝汁，计算公式见式（1）。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \qquad 式（1）$$

式中：L_0^*、a_0^*和 b_0^*为新鲜荔枝汁的测定值，L^*、a^*和 b^*为添加不同抑制剂的荔枝汁样品的测定值。

1.2.4　感官评价　感官评价方法参照 Xu 等[13] 的风味轮廓分析方法，感官评价小组由 10 名经过训练的成员组成（5 名女性，5 名男性）。根据小组成员讨论统计出频率最高的感官属性描述词，并选择相应标准参比物质，如表 1 所示；以选取的这些感官分属性为评价指标，采用 5 点强度法（5-很强，3-中等强度，0-无）对样品进行香气特征感官评价。具体操作如下：取 40 mL 荔枝汁样品于 125 mL 带盖嗅闻瓶中，将样品随机排列后进行编号，随后送至感官评价室（25±1 ℃），每位评价员以各属性标准品的香气强度为参照，嗅闻评价三次，每次评价后休息 20 min。

1.2.5　电子鼻分析　荔枝汁的电子鼻分析参考 Zhang 等[14] 的方法。取 10 mL 样品，在 37 ℃ 水浴中平衡 10 min，然后以 300 mL/min 的速度将顶空物引入电子鼻中进行分析，传感器自清洗时间为 120 s，归零时间为 10 s，样品预采样时间为 5 s，采样时间为 120 s，分析时间为 120 s。提取 10 个传感器的特征值，10 个不同传感器及其对应的性能描述见表 2，采用主成分分析（principal component analysis，PCA）对样品进行区分分析。

表 1　荔枝汁样品风味轮廓分析用香气特征感官描述词

Table 1　Sensory descriptors of aroma characteristics for flavor profile analysis of lychee juice samples

香气属性	参比实物	浓度（μg/L）	参比强度值	定义
水果香	3-辛酮	0.1	3	与新鲜成熟水果相关联的混合香气
甜香	乙酸异戊酯	14	3	与蜂蜜、焦糖和棉花糖关联的香气
花香	芳樟醇	6	3	与玫瑰、月季等关联香气
青瓜味	反-2-壬烯醛	0.36	3	与黄瓜西瓜等相关联的清新香气
青草香	苯乙醛	7	3	与新鲜切割青草相关的气息
柑橘香	壬醛	20	3	与柑橘皮等相关的气息
蒸煮味	甲硫基丙醛	0.8	3	与蒸煮鸡蛋或土豆相关联的不良气味

表 2　电子鼻传感器性能描述

Table 2　Sensor performance description of E-nose

阵列序号	传感器名称	性能描述
R1	W1C	芳香成分，苯类
R2	W5S	灵敏度大，对氮氧化合物很灵敏
R3	W3C	芳香成分灵敏，氨类
R4	W6S	主要对氢化物有选择性
R5	W5C	短链烷烃芳香成分
R6	W1S	对甲基类灵敏
R7	W1W	对硫化物灵敏
R8	W2S	对醇类、醛酮类灵敏
R9	W2W	芳香成分，对有机硫化物灵敏
R10	W3S	对长链烷烃灵敏

1.2.6　挥发性物质分析　采用 GC-MS 对整体挥发性成分进行定性和半定量分析，采用 GC×GC-QTOF MS 对荔枝汁“蒸煮”异味的关键贡献物质进行定量分析。

1.2.6.1　挥发性成分萃取　参考 An 等[3] 的方法，采用顶空固相微萃取（headspace solid phase micro-extraction，HP-SPME）提取挥发性物质，吸取 5 mL 荔枝汁于 20 mL 顶空萃取瓶中，加入 1.5 g 氯化钠以及 6 μL 内标己酸乙酯（浓度为 105.2 mg/L），然后于 40 ℃ 水浴中平衡 20 min；平衡结束后萃取针顶空吸附 30 min，随后迅速于 250 ℃ 条件下解析 5 min。

1.2.6.2　GC-MS 条件　GC-MS 分析参考 Feng 等[15] 的方法并略作修改，色谱柱选择 DB-5（30 mm×0.25 mm，0.25 μm），载气为氦气，流速 1.7 mL/min，采用无分流模式。升温程序为：色谱柱初始温度为 30 ℃，以 4 ℃/min 升温至 200 ℃。采用全扫描模式对信号进行采集，电子轰击能量为 70 eV，电离方式

为 EI, 离子源温度为 230 ℃, 扫描质量范围为 40~600 amu。

1.2.6.3 GC×GC-QTOF MS 条件 参考陈颖[16] 的方法并稍作修改, 一维色谱柱为 DB-Wax(30 mm×0.25 mm, 0.25 μm), 二维色谱柱为 DB-17(1.0 mm×0.18 mm, 0.18 μm), 采用选择离子监控模式, DMS、DMDS、DMTS、MTP 的特征离子片段分别为 62.0185、93.9905、125.9626、104.0290。

1.2.6.4 挥发性成分的定性与定量分析 定性分析: 通过质谱信息与标准信息库 NIST16.0 进行比对; 使用 C5~C20 的系列正构烷烃计算各挥发性成分的保留指数(rentation index, RI), 计算公式见式(2)。

$$RI = 100N + 100n(t_{Ra} - t_{RN})/(t_{R(N+n)} - t_{RN}) \quad 式(2)$$

式中: N 是目标物质左侧正构烷烃的碳原子数, n 为位于目标物质两侧的正构烷烃的碳原子数之差, t_{Ra}、t_{RN} 和 $t_{R(N+n)}$分别是待测物质、待测物质左侧和右侧正构烷烃的保留时间。

定量分析: 参考 Mandha 等[17] 的方法, 采用内标法对荔枝汁中所有挥发性物质进行半定量, 根据式(3)计算各挥发性物质的含量。

$$M_S(\mu g/L) = \frac{M_i \times A_s}{A_i} \quad 式(3)$$

式中: M_s 是鉴定的挥发性物质浓度, M_i 是内标物浓度, A_s 是鉴定的挥发性物质峰面积, A_i 是内标物峰面积。

1.2.6.5 硫化物的定量分析 通过内标与外标结合法对硫化物进行定量, 配制 7 个浓度梯度的硫化物混合标准品, 混合标准品原液中 DMS、DMDS、DMTS 以及 MTP 的浓度分别为 100、5、5、100 μg/mL, 然后依次稀释 5、10、50、100、500、1000 倍, 并添加内标己酸乙酯, 根据内标与标准品浓度比值及内标与标准品峰面积比值绘制标准曲线, 4 种硫化物的标准曲线如表 3 所示, 由此计算硫化物的浓度。

表 3 4 种关键异味硫化物的标准曲线

Table 3 Standard curves for four key off-flavor sulfide

硫化物	标准曲线	拟合度
DMS	y=0.1004x+3.5292	R^2=0.9944
DMDS	y=0.8771x+8.5189	R^2=0.9946
DMTS	y=0.6968x+16.737	R^2=0.9891
MTP	y=0.0005x−0.008	R^2=0.997

注: y为标准品的峰面积与内标峰面积之比, x为标准品浓度与内标浓度之比。

1.2.7 总酚和总黄酮的测定

1.2.7.1 总酚的测定 采用 Folin-Ciocalteu 比色法测定总酚含量, 参考 Manzoor 等[18] 的方法并加以修改。吸取 200 μL 稀释 20 倍的荔枝汁加入 400 μL 稀释 10 倍的福林酚溶液, 振荡混匀后加入 400 μL 10% $NaCO_3$ 溶液, 并在室温下避光反应 60 min。用酶标仪在 760 nm 下测定吸光度。样品中总酚含量以没食子酸当量表示, 单位为 mg GAE/100 mL。

1.2.7.2 总黄酮的测定 采用硝酸铝显色法测定总黄酮含量, 参考 Manzoor 等[18] 的方法并稍加修改。取 0.5 mL 荔枝汁样品加入 0.1 mL 的 5% $NaNO_2$ 溶液, 振荡混匀后静置 6 min, 随后加入 10% $Al(NO_3)_3$ 溶液 0.1 mL 振荡混匀, 静置 6 min 后, 最后加入 1 mol/L 的 NaOH 溶液 2 mL, 混匀后静置 15 min, 在 505 nm 下测定吸光度。样品中总黄酮含量以芦丁当量表示, 单位为 mg RE/100 mL。

1.2.8 抗氧化能力测定 采用 DPPH 自由基清除能力、$ABTS^+$自由基清除能力、FRAP 铁离子还原能力评估荔枝汁的抗氧化能力, 参考 Moreira 等[19] 的方法并稍作修改。

DPPH 自由基清除能力: 以无水乙醇为溶剂配制 200 μmol/L 的 DPPH 溶液, 取稀释 50 倍的荔枝汁 50 μL 与 150 μL DPPH 溶液混合, 避光反应 15 min, 采用酶标仪在 517 nm 处测定吸光度。以 Trolox 为标准品绘制标准曲线, 样品的 DPPH 自由基清除能力以 Trolox 当量表示, 单位为 μmol TE/mL。DPPH 自由基清除能力按公式(4)计算。

$$DPPH自由基清除率(\%) = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100 \quad 式(4)$$

式中: A_1 表示样品加 DPPH 吸光度, A_0 表示无水乙醇加 DPPH 吸光度。

$ABTS^+$自由基清除能力: 将 7 mmol/L 的 ABTS 溶液和 2.45 mmol/L 的过硫酸钾溶液 1∶1 混合, 在室温、避光的条件下静置 12~16 h, 使用前用无水乙醇稀释至 734 nm 波长处吸光度为 0.7±0.02。测试时将 50 μL 样品与 3 mL ABTS 工作液混合, 避光静置 20 min, 在 734 nm 下测定吸光度, 同样以 Trolox 为标准品绘制标准曲线, 样品的 $ABTS^+$自由基清除能力以 Trolox 当量表示, 单位为 μmol TE/mL。$ABTS^+$自由基清除能力计算公式如下。

$$ABTS^+自由基清除率(\%) = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100 \quad 式(5)$$

式中: A_1 表示样品加 ABTS 吸光度, A_0 表示无水乙醇加 ABTS 吸光度。

FRAP 铁离子还原能力: 将乙酸缓冲液(0.1 mol/L, pH3.6)、TPTZ 溶液(10 mmol/L, 以 40 mmol/L HCl 为溶剂)、$FeCl_3$ 溶液(20 mmol/L)以 10∶1∶1 的比例混合得到 FRAP 工作液, 测试时取 2 mL FRAP 工作液与 50 μL 样品混合, 在 593 nm 下测定吸光度。样品的 FRAP 以抗坏血酸当量表示, 单位为 mg V_C/100 mL。

1.3 数据处理

使用 SPSS 27 软件(IBM, 197 USA)进行单因素方差分析(ANOVA)和 Duncan 多重比较分析, 不同小写字母表示组内差异显著(P<0.05)。采用 Origin 2021(Origin Lab, USA)绘制雷达图和柱状图, 采用电子鼻自带软件 Winmuster(AIRSENSE Analytics GmbH, German)对电子鼻结果进行 PCA 处理, 采用

SIMCA 14.1（Umetrics, Sweden）进行 PCA 和 PLS-DA 分析。所有实验均重复 3 次以上，数据表示为平均值±标准差（SD）。

2　结果与分析

2.1　多种抑制剂处理对荔枝汁颜色及 pH 的影响

2.1.1　色差分析　颜色是影响消费者购买欲以及影响果汁品质的重要指标。图 1 展示了抑制剂处理对荔枝汁颜色的影响。经处理后荔枝汁颜色由深到浅依次为儿茶素>葡萄糖氧化酶≈邻苯三酚>迷迭香酸>没食子酸>抗坏血酸，其中抗坏血酸和没食子酸处理的样品颜色更加接近新鲜汁。表 4 中显示的 L^*、a^*、b^*值及色差 $\triangle E$ 值和图片相符，没食子酸和抗坏血酸处理汁的颜色与新鲜汁色差最小，添加了迷迭香酸的样品与加热处理荔枝汁颜色相似，而儿茶素、葡萄糖氧化酶、邻苯三酚处理的样品色差变化较热处理更大，且排序为儿茶素>邻苯三酚>葡萄糖氧化酶，它们导致 L^*值降低，a^*和 b^*值升高，使荔枝汁亮度降低，颜色向红黄转变。

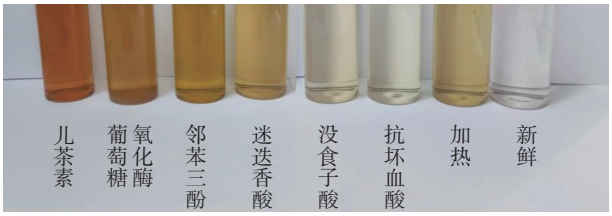


图 1　抑制剂处理对荔枝汁颜色的影响

Fig.1　Effect of inhibitor treatments on the color of lychee juice

表 4　抑制剂处理对荔枝汁颜色及 pH 的影响

Table 4　Effect of inhibitor treatments on color and pH of lychee juice

处理	pH	颜色			
		L^*	a^*	b^*	$\triangle E$
新鲜	5.00±0.01^{a}	27.85±0.61^{a}	1.72±0.02^{e}	2.64±0.09^{e}	–
加热	4.88±0.01^{c}	26.12±0.90^{b}	1.06±0.09^{f}	6.63±0.74^{a}	4.46±0.69^{c}
没食子酸	4.76±0.01^{f}	26.15±0.07^{b}	0.65±0.04^{g}	3.92±0.15^{c}	2.38±0.09^{d}
抗坏血酸	4.70±0.01^{g}	28.29±0.19^{a}	−0.29±0.02^{h}	3.80±0.14^{cd}	2.37±0.09^{d}
迷迭香酸	4.82±0.01^{e}	24.83±0.06^{c}	2.07±0.02^{d}	5.80±0.06^{b}	4.39±0.08^{c}
儿茶素	5.00±0.01^{a}	21.10±0.36^{e}	4.28±0.04^{a}	3.18±0.06^{de}	7.23±0.34^{a}
葡萄糖氧化酶	4.85±0.01^{d}	23.25±0.58^{d}	3.11±0.09^{b}	4.03±0.18^{c}	5.00±0.58^{bc}
邻苯三酚	4.90±0.01^{b}	22.52±0.10^{d}	2.54±0.11^{c}	4.27±0.29^{c}	5.63±0.16^{b}

注：同列肩标不同的字母表示具有显著性差异（P<0.05），表6~表7同。

添加抑制剂导致荔枝汁颜色变化的原因包括两个方面：一是抑制剂本身颜色的影响，如儿茶素的颜色偏红黄，从而导致添加儿茶素组的色差最大；二是处理过程中发生的一系列反应，酚类物质容易氧化成醌同时还能与果汁中的金属离子、有机酸等反应发生非酶褐变；而葡萄糖氧化酶催化葡萄糖氧化生成的过氧化氢是强氧化剂，可以将酚类物质氧化成醌类物质，同时会促进色素的氧化，因此也会促使荔枝汁发生褐变[20−21]。从颜色结果分析，抗坏血酸和没食子酸的效果最佳。

2.1.2　pH 变化　研究表明 pH 对果汁中酚类、色素等物质的稳定性有影响，在一定范围内较低的 pH 有助于颜色稳定并且会降低美拉德反应速率[22−23]。不同抑制剂处理的荔枝汁 pH 如表 4 所示。新鲜汁的 pH 为 5.00±0.01，经处理后 pH 从低到高依次为抗坏血酸<没食子酸<迷迭香酸<葡萄糖氧化酶<加热<邻苯三酚<儿茶素。抗坏血酸是食品中常见的低 pH 酸，常被用于保护食品的颜色和风味[24]；没食子酸、迷迭香酸属于酚酸类，结构中均有羧基，因此溶于水后能明显降低 pH；葡萄糖氧化酶能将葡萄糖氧化成葡萄糖酸，从而降低基质 pH[21]。对比荔枝汁色差结果发现，不同抑制剂处理后 pH 越小荔枝汁颜色变化越小，这可能是由于较低的 pH 抑制了美拉德反应，同时更好地保护了荔枝汁中多酚、花色苷等色素的稳定性[25−26]。

2.2　抑制剂处理对荔枝汁风味品质的影响

2.2.1　风味轮廓　通过感官分析，评估了不同抑制剂对热加工荔枝汁整体风味的影响，图 2 显示了经不同抑制剂处理后荔枝汁风味轮廓雷达图。结果显示热处理后产生了明显的蒸煮味，抑制剂处理使蒸煮异味减弱的能力大小依次为：葡萄糖氧化酶>迷迭香酸>儿茶素>邻苯三酚>没食子酸>抗坏血酸，其中葡萄糖氧化酶对蒸煮味的抑制效果最显著。

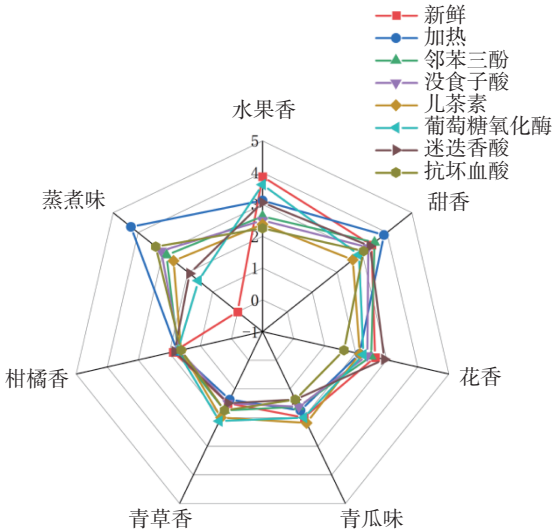


图 2　不同抑制剂对荔枝汁风味轮廓的影响

Fig.2　Effect of different inhibitors on the sensory profile of lychee juice

在其他风味方面，加热和邻苯三酚处理荔枝汁的甜香较为突出，葡萄糖氧化酶和儿茶素处理荔枝汁的青草香、青瓜味较为突出，同时葡萄糖氧化酶和迷迭香酸分别在保留水果香和花香方面效果好，而经抗坏血酸处理后荔枝汁青瓜味、花香、水果香、柑橘香均减弱。因此总体而言葡萄糖氧化酶在抑制蒸煮异味和保留新鲜荔枝特征香气成分方面效果最好，其次是迷迭香酸。由于感官评价受主观影响较大，无法解释不同抑制剂对具体香气成分的影响，需要采用电子

鼻、GC-MS 和 GC×GC-QTOF MS 对硫化物以及其他挥发性化合物进行具体分析。

2.2.2 电子鼻分析 电子鼻采用 10 个传感器快速检测样品的挥发性成分，建立响应曲线，模拟人类对气味的感知。采用电子鼻 PCA 结果表征不同抑制剂处理对荔枝汁风味的影响，主成分总贡献率为 99.37%，图 3B 表明，W1W 硫化物对 PC1 贡献最大，W5S 氮氧化合物对 PC2 贡献最大。通过图 3A 可知，同一处理组的点聚集，说明电子鼻处理效果稳定，各处理之间互不重叠，说明电子鼻可以较好地区分不同处理的荔枝汁风味。添加抑制剂处理与热处理相对分离，且与热处理在第一主成分上差异较大，说明添加抑制剂能一定程度保留荔枝汁的风味，且能减少挥发性硫化物的含量。此外，图中结果显示葡萄糖氧化酶处理组的荔枝汁整体香气更接近新鲜荔枝汁，其次是邻苯三酚和儿茶素，而抗坏血酸、迷迭香酸和没食子酸处理与新鲜汁距离较远。结合感官分析，葡萄糖氧化酶与新鲜汁的香气特征最为接近。

2.2.3 基于 GC-MS 的不同抑制剂处理的荔枝汁挥发性物质变化 GC-MS 共鉴定出 62 种物质(表 5)，不同处理荔枝汁挥发性物质的相对含量和种类如图 4 所示，新鲜荔枝汁共检测到 31 种挥发性物质，加热荔枝汁共检测到 41 种挥发性物质，而添加没食子酸、葡萄糖氧化酶、邻苯三酚、抗坏血酸、儿茶素、迷迭香酸处理的荔枝汁分别检测到 26、32、36、29、26、34 种挥发性物质。其中醇类是荔枝汁的最主要的挥发性物质，此外醛类、烯类、酯类物质也是荔枝汁中重要的挥发性成分，与文献描述相符[1,27−28]。

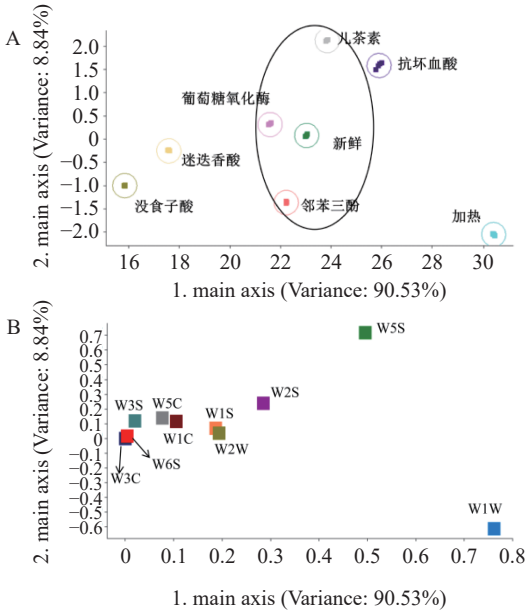


图 3 不同抑制剂处理后荔枝汁电子鼻 PCA 结果

Fig.3 E-nose PCA results of lychee juice after treatment with different inhibitors

注：A：各抑制剂处理的 PCA 图，B：各传感器的载荷图。

表 5 不同处理荔枝汁挥发性成分

Table 5 Volatile components of lychee juice in different treatments

编号	物质名称	RI		浓度(μg/L)							
		参考值	实际值	新鲜	加热	没食子酸	葡萄糖氧化酶	邻苯三酚	抗坏血酸	儿茶素	迷迭香酸
	醇类										
X1	乙醇	489	500	67.99±3.81^{bc}	53.02±10.41^{cd}	49.69±3.72^{d}	97.26±10.92^{a}	56.98±14.44^{cd}	65.06±2.09^{bcd}	62.12±4.67^{bcd}	74.71±9.61^{b}
X12	3-甲基-3-丁烯-1-醇	734	734	17.02±3.32^{a}	12.98±2.90^{ab}	5.75±0.38^{d}	9.31±1.01^{bcd}	9.18±3.20^{bcd}	9.82±0.94^{bcd}	7.56±0.09^{cd}	12.05±4.07^{bc}
X13	异戊醇	743	740	–	6.16±0.97^{a}	6.29±2.09^{a}	–	–	–	–	6.12±3.16^{a}
X14	2-甲基-1-丁醇	742	742	7.09±0.85	–	–	–	–	–	–	–
X15	3-甲基-2-丁烯-1-醇	772	778	14.88±2.00^{b}	14.83±2.71^{b}	9.60±2.58^{c}	17.44±2.28^{b}	13.98±0.78^{b}	15.04±0.10^{b}	–	19.36±4.49^{a}
X18	正己醇	869	865	–	5.09±1.40^{a}	–	–	–	–	–	5.20±0.04^{a}
X25	1-辛烯-3-醇	964	968	4.40±0.44^{bc}	5.97±0.94^{a}	2.04±0.13^{e}	5.47±0.74^{ab}	3.04±1.22^{de}	3.45±0.28^{cd}	2.72±0.32^{de}	5.06±0.70^{ab}
X29	2-乙基己醇	1025	1014	10.22±1.29^{a}	7.49±1.04^{bc}	8.96±0.35^{ab}	5.58±0.77^{d}	6.14±0.91^{cd}	5.93±0.72^{d}	7.58±0.29^{bc}	8.39±0.86^{b}
X34	芳樟醇	1080	1086	6.97±1.15^{e}	22.78±2.41^{cd}	21.39±1.42^{d}	42.20±4.20^{a}	20.05±1.43^{d}	27.60±3.18^{b}	10.99±1.24^{e}	26.40±2.67^{bc}
X37	苯乙醇	1117	1099	–	5.04±1.05^{a}	–	3.41±0.35^{b}	2.82±0.15^{c}	–	–	–
X42	4-萜烯醇	1160	1166	1.89±0.12^{ab}	1.43±0.53^{bc}	2.28±0.10^{a}	1.90±0.33^{ab}	0.63±0.17^{d}	1.81±0.04^{ab}	1.13±0.10^{cd}	1.55±0.56^{bc}
X45	2-(4-甲基苯基)丙-2-醇	1183	1174	1.47±0.10^{b}	–	–	–	2.29±0.87^{a}	–	–	–
X46	alpha-松油醇	1189	1181	2.34±0.30^{c}	–	4.54±0.52^{b}	6.36±0.19^{a}	–	4.43±0.34^{b}	2.45±0.19^{c}	3.76±0.18^{c}
X47	L-alpha-松油醇	1192	1181	–	4.10±0.05^{a}	–	–	2.63±1.08^{b}	–	1.99±0.16^{b}	–
X51	橙花醇	1220	1213	21.84±6.54^{bcd}	26.46±5.26^{ab}	8.36±1.92^{e}	14.74±3.83^{de}	22.58±1.06^{bc}	17.44±4.18^{cd}	–	31.69±5.53^{a}
X52	香茅醇	1212	1215	172.36±10.56^{a}	168.47±26.85^{a}	91.13±8.91^{c}	94.63±7.33^{c}	109.77±11.92^{c}	138.35±13.56^{b}	93.09±6.15^{c}	171.29±20.33^{a}
X54	异香叶醇	1232	1227	9.59±2.58^{ab}	9.41±2.15^{ab}	–	7.79±0.41^{bc}	11.21±0.96^{a}	9.23±0.43^{ab}	6.26±1.09^{c}	11.40±1.63^{a}
X55	香叶醇	1247	1237	26.85±4.67^{cd}	46.41±8.51^{a}	20.83±2.89^{d}	24.62±0.33^{cd}	43.17±7.24^{ab}	35.43±2.72^{bc}	24.47±3.63^{cd}	52.93±10.16^{a}
X61	3,4-二羟基苯甘醇	/	1644	–	0.98±0.15^{b}	1.01±0.10^{b}	–	1.25±0.06^{a}	0.92±0.12^{b}	–	0.87±0.09^{b}
	醇类总量			364.91	390.62	231.87	330.71	305.72	334.51	220.36	430.78
	醛类										
X3	丁醛	589.5	582	–	–	–	5.37±2.82	–	–	–	–
X8	异戊醛	664	666	3.32±0.40^{c}	6.52±0.70^{b}	1.67±0.32^{cd}	13.29±1.81^{a}	1.21±0.09^{d}	2.03±0.89^{cd}	1.58±0.30^{cd}	2.66±1.58^{cd}

续表 5

编号	物质名称	RI		浓度（μg/L）							
		参考值	实际值	新鲜	加热	没食子酸	葡萄糖氧化酶	邻苯三酚	抗坏血酸	儿茶素	迷迭香酸
X9	2-甲基丁醛	664	677	4.25±0.60^{b}	4.34±1.74^{b}	2.50±0.28^{bc}	7.17±0.46^{a}	–	2.37±1.02^{bc}	–	4.90±3.16^{ab}
X16	3-甲基-2-丁烯醛	796	789	7.72±0.34^{bc}	10.19±2.08^{a}	5.39±0.91^{d}	–	–	8.58±0.08^{b}	6.26±0.39^{cd}	11.31±1.21^{a}
X17	己醛	798	797	2.66±0.53^{ab}	3.42±0.10^{a}	1.53±0.34^{cd}	2.03±0.98^{bc}	–	1.82±0.08^{cd}	1.14±0.15^{d}	2.64±0.43^{ab}
X22	苯甲醛	961	950	–	–	–	19.75±2.81	–	–	–	–
X23	5-甲基呋喃醛	954	953	–	–	–	–	4.24±0.47	–	–	–
X30	苯乙醛	1043	1029	–	5.72±2.09^{ab}	–	7.49±0.98^{a}	4.39±0.20^{b}	3.34±0.93^{b}	3.55±1.24^{b}	7.26±2.27^{a}
X35	壬醛	1101	1091	1.68±0.22^{b}	2.21±0.09^{ab}	3.21±0.43^{a}	3.52±0.79^{a}	3.43±1.34^{a}	3.49±1.47^{a}	3.04±0.53^{ab}	3.60±0.54^{a}
X49	癸醛	1203	1193	–	0.85±0.05^{b}	–	–	–	–	–	1.54±0.22^{a}
X53	5-羟甲基糠醛	1224	1225	–	–	–	–	30.83±3.68	–	–	–
X56	柠檬醛	/	1255	3.56±1.18^{b}	1.94±0.26^{c}		1.94±0.37^{c}	7.52±0.42^{a}			1.93±0.04^{c}
	醛类总量			23.19	35.19	14.30	60.56	51.62	21.63	15.57	35.84
	醚类										
X4	乙烯基乙醚	/	588	–	–	–	–	8.60±0.93^{a}	–	5.96±1.09^{b}	–
X36	（2S, 4R）-顺式氧化玫瑰醚	/	1095	21.38±1.76^{d}	48.03±4.96^{b}	34.71±1.22^{c}	84.49±9.25^{a}	31.90±4.81^{c}	51.22±5.58^{b}	22.77±1.20^{d}	53.39±2.92^{b}
X39	3,6-二氢-4-甲基-2-(2-甲基-1-丙烯基)-2氢-吡喃	1153	1137	2.54±1.12^{e}	10.91±1.86^{b}	6.03±0.31^{d}	17.08±1.27^{a}	–	9.02±0.75^{bc}	3.97±1.88^{e}	8.69±0.53^{c}
X41	莳萝醚	1181	1140	–	–	–	–	–	2.72±0.43^{a}	–	3.05±0.45^{a}
X48	橙花醇甲醚	/	1184	8.64±0.15^{a}	3.43±0.38^{b}	–	2.90±0.08^{b}	2.72±0.61^{b}	3.21±0.11^{b}	1.95±0.12^{b}	3.03±0.21^{b}
	醚类总量			32.56	62.37	40.74	104.47	43.22	66.17	34.65	68.16
	烯类										
X19	苯乙烯	888	884	2.97±0.98^{a}	2.39±0.49^{ab}	–	–	2.68±0.86^{ab}	1.90±0.10^{c}	–	–
X26	月桂烯	987	975	–	8.61±0.79	–	–	–	–	–	–
X31	（Z）-β-罗勒烯	1031	1031	2.45±1.57^{a}	–	–	–	–	–	1.72±0.04^{b}	–
X32	1,3-环庚二烯	/	1071	–	–	–	1.71±0.38	–	–	–	–
X33	2,4-二甲基苯乙烯	1076	1075	3.01±1.37^{ab}	4.17±0.76^{a}	–	1.60±0.12^{cd}	3.21±1.03^{ab}	2.72±0.76^{bc}	–	1.09±0.19^{d}
X40	1,6-二甲基庚-1,3,5-三烯	/	1140	3.15±0.72	–	–	–	–	–	–	–
X50	3-蒈烯	1031	1191	–	–	2.07±0.13^{b}	5.32±2.74^{a}	–	–	1.63±0.30^{b}	–
	烯类总量			11.58	15.17	2.07	8.63	5.89	4.62	3.35	1.09
	酯类										
X7	乙酸乙酯	612	626	26.26±6.72^{a}	18.45±1.98^{b}	12.40±3.46^{b}	18.31±1.48^{b}	11.99±1.10^{b}	13.46±1.78^{b}	12.01±2.11^{b}	14.45±3.28^{b}
X20	丁内酯	908	909	–	–	–	–	3.95±0.40	–	–	–
X59	2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯	/	1591	–	–	–	–	–	–	1.04±0.17^{a}	0.82±0.17^{b}
X62	戊二酸丁酯异丁酯	/	1675	–	–	–	–	2.22±0.76	–	–	–
	酯类总量			26.26	18.45	12.40	18.31	18.16	13.46	13.05	15.27
	酚类										
X44	百里香酚	1290	1274	–	3.21±0.20^{b}	–	8.58±0.27^{a}	–	–	–	3.32±0.60^{b}
X58	2,4-二叔丁基苯酚	1502	1489	152.1±2.32^{cd}	161.16±5.32^{cd}	299.48±67.45^{a}	99.93±10.64^{d}	247.00±30.90^{ab}	255.50±4.38^{ab}	297.44±43.82^{a}	212.60±17.51^{bc}
	酚类总量			152.10	164.37	299.48	108.51	247.00	255.50	297.44	215.92
	酮类&酸类										
X11	乙酸	663	716	–	18.80±3.71^{b}	–	–	33.98±6.17^{a}	–	–	–
X21	1,3-环戊二酮	/	921	–	–	–	–	2.77±0.20	–	–	–
X38	2,3-二氢-3, 5-二羟基-6-甲基-4氢-吡喃-4-酮	1134	1134	–	12.63±10.59^{b}	–	–	16.32±1.26^{a}	–	–	–
X57	香叶基丙酮	1444	1430	–	1.05±0.03^{b}	–	–	2.20±0.99^{a}	–	–	–
	酮类&酸类总量			0	32.48	0	0	55.27	0	0	0
	硫化物										
X2	二甲基硫醚	544	545	–	38.94±5.37^{a}	24.12±2.39^{c}	–	31.81±4.72^{b}	38.91±4.95^{a}	30.74±3.96^{b}	21.78±3.59^{c}
X5	硫代氨基甲酸乙酯	/	600	–	7.29±2.34	–	–	–	–	–	–
X24	二甲基三硫醚	962	954	–	0.88±0.44	–	–	–	–	–	–
	硫化物总量			0	47.11	24.12	0	31.81	38.91	30.74	21.78
	其他类										
X6	正己烷	/	613	–	–	2.93±0.05	–	–	–	–	–
X10	2,2-二甲基己烷	/	701	2.17±0.10^{b}	–	3.23±0.81^{a}	3.06±0.97^{a}	–	–	–	–
X27	苄基氯		997	–	–	–	18.99±3.67	–	–	–	–

续表 5

编号	物质名称	RI		浓度(μg/L)							
		参考值	实际值	新鲜	加热	没食子酸	葡萄糖氧化酶	邻苯三酚	抗坏血酸	儿茶素	迷迭香酸
X28	间异丙基甲苯	1026	1008	1.75±0.28^{a}	1.88±0.37^{a}	–	–	–	0.90±0.13^{b}	–	–
X43	3-己炔	/	1172	–	–	–	–	–	–	–	2.19±0.60
X60	十六烷	/	1609	–	0.62±0.06^{b}	–	–	1.58±0.77^{a}	–	–	–
	其他类总量			3.92	2.50	6.16	22.05	1.58	0.90	0	2.19

注: 同行肩标不同字母表示有显著性差异(P<0.05), “–”表示未检出该物质, “/”表示在NIST中未查询到RI。

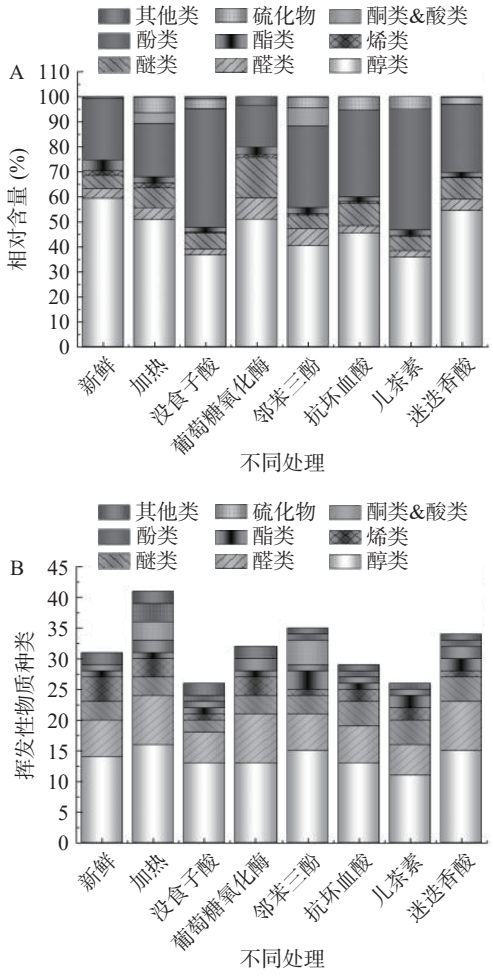


图 4 不同处理荔枝汁挥发性物质相对含量(A)和种类(B)

Fig.4 Relative content (A) and type (B) of volatile substances in lychee juice of different treatments

各类挥发性物质种类和含量的结果如图 4 所示, 醇类物质经各抑制剂处理后相对含量均下降, 迷迭香酸处理后下降幅度最小且种类增多, 多种醇类物质如芳樟醇、橙花醇、香茅醇等表现出花香, 这与迷迭香酸在感官评价中花香突出结果相似, 其次葡萄糖氧化酶处理组的醇类相对含量下降幅度也较小。醛类经加热、葡萄糖氧化酶、邻苯三酚、迷迭香酸处理后明显上升且种类增多, 其中增加的醛类有壬醛、苯乙醛, 壬醛呈现柑橘香、花香, 苯乙醛呈现花香。除了邻苯三酚外, 各处理均使荔枝汁的醚类相对含量增加, 尤其是葡萄糖氧化酶处理后醚类总含量增加了 2.21 倍。烯类成分含量和种类经各种抑制剂处理后均下降, 而其中葡萄糖氧化酶处理的下降程度最小。葡萄糖氧化酶在保留酯类挥发性成分含量方面同样较为良好, 酯类通常在水果中表现出水果香, 这与感官评价中葡萄糖氧化酶对水果香保留较好的结论一致。因此在保留各类重要挥发性物质的含量和种类方面葡萄糖氧化酶具有显著的效果。

对 GC-MS 结果进行 PCA 分析, 如图 5 所示。前 2 个主要成分累计贡献为 44.80%。PCA 得分图显示加热处理位于 PC1 和 PC2 的负半轴, 与其他处理相隔较远, 而经过抑制剂处理的样品(除邻苯三酚)与新鲜汁距离接近, 其中抗坏血酸处理与新鲜汁之间差异最小, 没食子酸、儿茶素及迷迭香酸次之。

PCA 分析中将各处理组区分开的物质主要有 3,4-二羟基苯甘醇(X61)、香茅醇(X52)、丁内酯(X20)、苯甲醛(X22)、苯乙烯(X19)、2,2-二甲基己烷(X10)、2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯(X59)、柠檬醛(X56)、2,3-二氢-3, 5-二羟基-6-甲基-4 氢-吡喃-4-酮(X38)、2-(4-甲基苯基)丙-2-醇(X45)、丁醛(X3)、橙花醇(X51)、己醛(X17)、二甲基三硫醚(X24)、香叶基丙酮(X57)、异香叶醇(X54)、3-蒈烯(X50)等。其中丁醛、苯甲醛仅在葡萄糖氧化酶处理的荔枝汁中检测到, 丁内酯仅在邻苯三酚处理中检测到。苯乙烯具有塑料味[29], 经处理后均下降, 在没食子酸、葡萄糖氧化酶、儿茶素、迷迭香酸处理后未检测到; 香茅醇具有花香、柑橘香[3], 经加热以及抑制剂处理后含量均下降, 迷迭香酸处理组的下降幅度最小; 柠檬醛具有柠檬、柑橘味, 经邻苯三酚处理后显著上升, 经其他处理后下降, 没食子酸、抗坏血酸以及儿茶素处理后消失; 己醛具有青草味, 经加热处理后含量上升, 但各种抑制剂处理后含量均下降, 邻苯三酚处理后消失; 二甲基三硫醚具有腐烂的白菜以及洋葱、大蒜的气味, 仅在加热处理中检测到; 橙花醇具有花香气味, 经加热、邻苯三酚和迷迭香酸处理后含量上升, 经没食子酸、葡萄糖氧化酶、抗坏血酸处理后含量下降, 儿茶素处理后消失。GC-MS 的 PCA 结果显示抗坏血酸处理组最接近新鲜汁, 而感官和电子鼻显示葡萄糖氧化酶处理组与新鲜汁最相似, GC-MS 的 PCA 结果与感官和电子鼻结果之间存在差异是因为 GC-MS 的 PCA 区分的是挥发性化合物, 并不是呈香化合物。

2.2.4 基于 GC×GC-QTOF MS 的不同抑制剂对关键挥发性硫化物的抑制作用 由于 GC-MS 无法检测到全部的硫化物, 本文采用检测限较低的 GC×

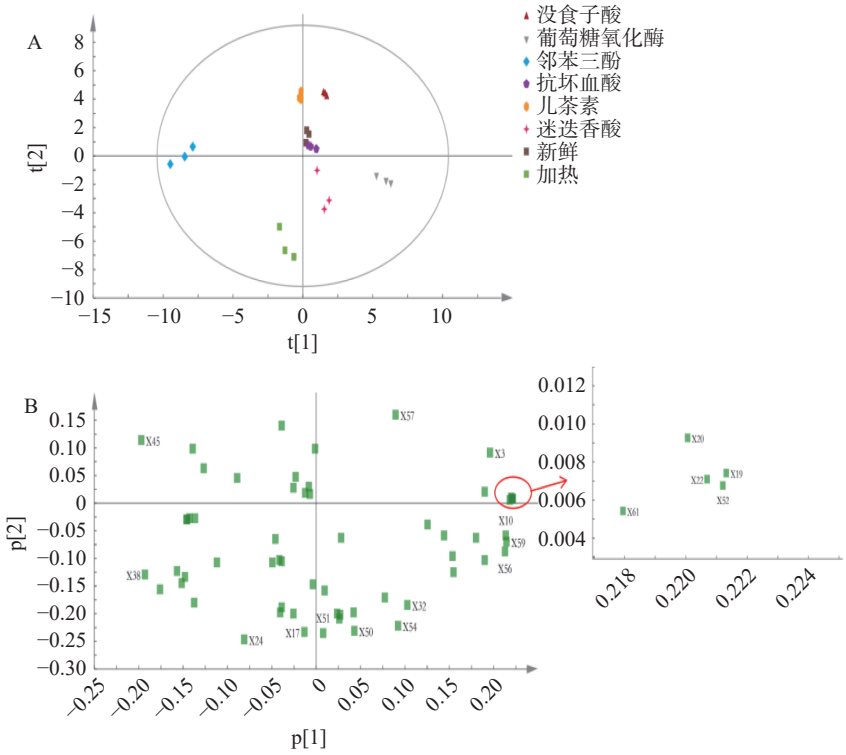


图 5　添加抑制剂热处理荔枝汁香气成分 PCA

Fig.5　PCA of aroma components of heat-treated lychee juice with added inhibitors

注：A：得分图，B：载荷图。

GC-QTOF MS 技术分析不同抑制剂对四种挥发性硫化物的抑制作用。结果如表 6 所示，新鲜汁中的 DMS、DMDS、MTP 浓度分别为 3.63±0.28、0.76±0.12、0.036±0.004 μg/mL，未检测到 DMTS；加热后 DMS、DMDS、MTP 分别提高 78.51%、42.10%、50.00%，并新产生了 0.23±0.04 μg/mL 的 DMTS。多酚类化合物已被证实可以通过还原美拉德反应前体、与前体形成加合物等机制抑制牛奶、果汁中蒸煮异味物质的生成[8,30]，但由于酚类物质结构不同对异味抑制效果也不相同。四种酚类物质处理的荔枝汁中 DMS、DMDS 的含量无显著差异，就 MTP 而言，迷迭香酸和邻苯三酚的抑制效果最好，就 DMTS 而言，儿茶素和没食子酸对 DMTS 起抑制作用，其中没食子酸的抑制效果更好，而邻苯三酚和迷迭香酸对 DMTS 的产生起促进作用。这可能是由于邻苯三酚和迷迭香酸在热加工过程中容易被氧化成醌类，作为亲电试剂与甲硫醇反应，促进 MTP 氧化成 DMTS[10,31]。葡萄糖氧化酶对四种异味物质的抑制效果最好，对 DMS、DMTS、MTP 的抑制率达到 100%，对 DMDS 的抑制率为 61.11%，这一结果与感官评价中添加葡萄糖氧化酶后蒸煮味最低相符合。由于葡萄糖氧化酶可以与葡萄糖反应生成葡萄糖酸和过氧化氢，葡萄糖酸可以降低基质 pH，从而使硫化物前体 S-甲基蛋氨酸（S-methylmethionine，SMM）质子化，减少被水中羟基的亲核取代；而过氧化氢可以氧化 DMS，生成溶解度较高的亚砜和砜类化合物；反应产物同样可以与前体蛋氨酸（methionine，Met）反应，能与之形成更加稳定的化合物，从而减少 MTP、

表 6　抑制剂处理对加热荔枝汁关键异味物质浓度影响

Table 6　Effect of inhibitor treatment on the concentration of key odorants in heated litchi juice

样品	硫化物含量及抑制率							
	DMS（μg/mL）	抑制率（%）	DMDS（μg/mL）	抑制率（%）	DMTS（μg/mL）	抑制率（%）	MTP（μg/mL）	抑制率（%）
新鲜	3.63±0.28^{d}		0.76±0.12^{b}		–		0.036±0.004^{bc}	
加热	6.48±0.82^{a}		1.08±0.11^{a}		0.23±0.04^{ab}		0.054±0.004^{a}	
迷迭香酸	4.17±0.07^{cd}	35.65	1.04±0.04^{a}	3.70	0.30±0^{a}	−30.43	0.033±0.003^{cd}	42.31
邻苯三酚	4.31±0.16^{c}	33.49	1.05±0.08^{a}	2.78	0.32±0.06^{a}	−39.13	0.031±0.002^{cd}	37.82
抗坏血酸	5.74±0.14^{b}	11.42	1.01±0.02^{a}	6.48	0.25±0.09^{ab}	−8.69	0.029±0.002^{d}	46.28
儿茶素	4.12±0.1^{cd}	36.42	1.00±0.04^{a}	7.40	0.19±0.03^{b}	17.39	0.038±0.001^{b}	28.63
没食子酸	3.89±0.21^{cd}	39.97	1.02±0.05^{a}	5.56	0.08±0.03^{c}	65.22	0.035±0.001^{bc}	34.20
葡萄糖氧化酶	–	100	0.42±0.08^{c}	61.11	–	100	–	100

注：–表示未检出，抑制率表示抑制剂处理相对加热荔枝汁硫化物浓度的变化。

DMDS 和 DMTS 的生成[10]。但葡萄糖氧化酶并不适用于所有的果蔬，如在番茄中葡萄糖氧化酶的抑制效果并不理想[11]，这说明抑制剂的作用效果与果汁的基质有较大关系。抗坏血酸对 DMS 的抑制效果在六种抑制剂中最差，对 DMTS 的生成有一定的促进作用，但对 MTP 的抑制效果仅次于葡萄糖氧化酶，这可能与抗坏血酸可以降低基质酸度、清除自由基的特性有关[32]。综上所述，葡萄糖氧化酶对四种关键硫化物生成的抑制效果最好，其次是没食子酸。

2.3 多种抑制剂处理对荔枝汁营养品质的影响

2.3.1 总酚及总黄酮含量变化 添加抑制剂后，对各处理荔枝汁的总酚、总黄酮含量进行了测定。如表 7 所示，新鲜荔枝汁中总酚、总黄酮含量分别为 12.59 mg GAE/100 mL、25.33 mg RE/100 mL，加热后总酚和总黄酮含量上升，这一现象可归因于两个方面：一是加热使多酚氧化酶失活，阻止了酚类化合物的氧化，二是高温促进了共价键的断裂，使得更多结合酚向游离酚转化[33]。

添加抑制剂的荔枝汁总酚含量均显著提高（P<0.05），尤其是添加了四种多酚类抑制剂的处理组：没食子酸、邻苯三酚、儿茶素、迷迭香酸处理的荔枝汁总酚含量较新鲜汁分别提高了 2.30、5.45、3.48、4.32 倍，较加热荔枝汁分别增加了 0.61、2.14、1.18、1.59 倍，其中邻苯三酚处理组的总酚含量最高；葡萄糖氧化酶处理组的总酚含量较新鲜汁、加热汁分别提高了 1.55、0.24 倍；抗坏血酸处理的总酚含量较新鲜汁上升了 0.49 倍，但较加热汁则下降了 27.20%。同样抑制剂的添加使荔枝汁总黄酮含量上升，其中以添加迷迭香酸的荔枝汁总黄酮含量最高；其次是儿茶素和邻苯三酚。葡萄糖氧化酶、没食子酸处理的荔枝汁的总黄酮相较于新鲜汁分别上升了 1.23、1.06 倍，但与加热处理无显著差异，抗坏血酸处理组的总黄酮较新鲜汁提高了 0.36 倍，但较加热荔枝汁下降了 39.13%。综上，针对总酚、总黄酮的提升来说，添加多酚抑制剂的贡献显著大于葡萄糖氧化酶和抗坏血酸。直接添加多酚类抑制剂会使总酚、总黄酮含量增加。添加葡萄糖氧化酶降低 pH、消耗氧气从而增加酚类物质的稳定性，有文献报道添加葡萄糖氧化酶可以减缓百香果汁中花色苷、缩合单宁等多酚物质的降解[34]。而抗坏血酸具有强还原性，可以减少酚类物质的氧化[35]。

2.3.2 抗氧化能力变化 抗氧化能力是评价果蔬汁品质的重要指标，综合三种抗氧化能力评价方法，六种抑制剂中邻苯三酚展现出最显著的抗氧化效果，其次是没食子酸，这可能归因于邻苯三酚与没食子酸均有三个直接连在苯环上的羟基，从而使其具有更高的反应活性，此外儿茶素、迷迭香酸和抗坏血酸也能有效提升荔枝汁的抗氧化性，这是因为多酚和抗坏血酸本身具有抗氧化性。整体来看，添加多酚类抑制剂较抗坏血酸可以更大程度地提升荔枝汁的抗氧化性，而葡萄糖氧化酶则对抗氧化性影响不显著。

2.4 基于荔枝汁综合品质的 PLS-DA 分析

由于六种抑制剂在各个方面表现均有差异，为了评估抑制剂对荔枝汁综合品质的影响，综合色泽、感官评价、电子鼻、挥发性硫化物变化以及营养品质等因素进行 PLS-DA 处理，结果如图 6 所示。PLS-DA 模型的参数 R_x^2、R_y^2 和 Q^2 分别为 0.942、0.842、0.605，符合 $R_x^2-R_y^2$<0.3，且 Q^2>0.5，所有样本均在 95% 的置信区间内，说明该模型具有高稳定性及良好的预测能力[36]。图 6A 得分图显示处理组内聚集，处理组间明显分离，其中葡萄糖氧化酶处理的样品与新鲜样品均位于第一象限，距离最近，证明葡萄糖氧化酶处理汁与新鲜荔枝汁综合品质较为接近，其次是儿茶素。

变量投影重要性（variable importance in the projection, VIP）通常用于解释变量对模型的贡献，一般 VIP 值>1 的变量可以认为是重要的[29]。图 6B 中红色部分表示 VIP>1 的变量，包括营养品质中总黄酮及总酚含量、硫化物中 MTP 和 DMTS 浓度、所有感官品质、总色差以及电子鼻中长链烷烃结果，这 13 个变量对于区分不同处理之间荔枝汁品质是重要的。

通过载荷图可以将变量与样品聚类之间的相关性可视化[16]，如图 6C 所示，加热处理对荔枝汁的电子鼻、MTP、DMS 等指标有较大影响；与此同时，抗坏血酸处理与加热处理的整体性质接近，对蒸煮味、硫化物含量的影响较大；添加没食子酸、迷迭香酸、邻苯三酚对总酚、总黄酮以及抗氧化性的提升具有较大影响，儿茶素处理则对总色差以及甜香的影响较

表 7 不同抑制剂处理对荔枝汁总酚、总黄酮含量以及抗氧化能力的影响

Table 7 Effects of different inhibitor treatments on total phenol and total flavonoid contents and antioxidant capacity of lychee juice

样品	总酚（mg GAE/100 mL）	总黄酮（mg RE/100 mL）	DPPH（μmol TE/mL）	ABTS（μmol TE/mL）	FRAP（mg V_C/100 mL）
新鲜	12.59±0.11^{h}	25.33±0.35^{g}	121.79±18.41^{d}	68.95±13.84^{de}	6.64±2.19^{f}
加热	25.85±0.55^{f}	56.61±1.97^{de}	177.55±24.41^{d}	89.00±2.82^{cd}	14.11±0.53^{f}
没食子酸	41.58±0.69^{d}	52.15±0.62^{e}	363.55±27.87^{a}	119.14±7.1^{b}	183.91±7.73^{b}
抗坏血酸	18.82±0.15^{g}	34.46±0.19^{f}	300.71±14.39^{b}	95.41±10.35^{bc}	85.05±13.56^{d}
邻苯三酚	81.20±0.59^{a}	134.87±2.12^{c}	381.17±38.37^{a}	154.55±21.3^{a}	350.74±44.08^{a}
儿茶素	56.40±1.44^{c}	181.99±0.91^{b}	239.97±52.48^{c}	111.97±3.27^{bc}	56.34±5.83^{de}
迷迭香酸	66.99±0.39^{b}	485.45±13.36^{a}	322.43±43.24^{ab}	103.32±12.95^{bc}	149.44±18.62^{c}
葡萄糖氧化酶	32.12±0.6^{e}	61.51±1.52^{d}	159.49±25.44^{d}	61.08±15.63^{e}	27.72±5.06^{ef}

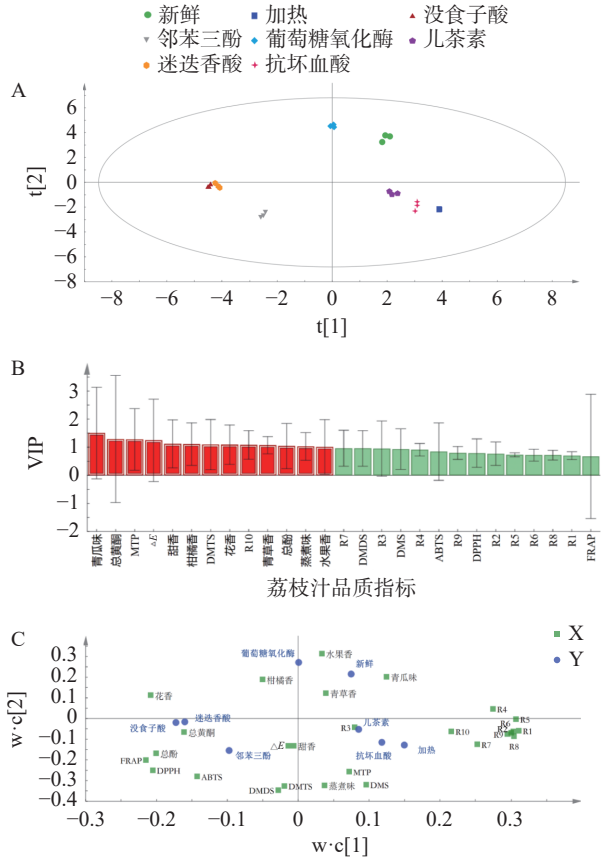


图 6　多种抑制剂处理荔枝汁综合品质 PLS-DA

Fig.6　PLS-DA of the comprehensive quality of lychee juice from multiple inhibitor treatments

注：A 为得分图；B 为 VIP，C 为载荷图。

大；葡萄糖氧化酶处理组与水果香、柑橘香指标呈正相关，且整体性质与新鲜荔枝汁的特征最为相似。这些结果与前文所得出的结果一致，既证明了 PLS-DA 模型良好的预测能力，也进一步说明了葡萄糖氧化酶在这几种抑制剂中表现最好。

3　结论

本文采用添加抑制剂的方法去除热加工荔枝汁的“蒸煮”异味，除对挥发性硫化物的抑制作用外，也对加热后荔枝汁色泽、风味及营养品质进行了综合评估。颜色结果显示抗坏血酸和没食子酸对荔枝汁颜色品质保留更好。风味轮廓图显示抑制剂对“蒸煮”异味的抑制从强到弱依次为：葡萄糖氧化酶>迷迭香酸>儿茶素>邻苯三酚>没食子酸>抗坏血酸。电子鼻结果显示葡萄糖氧化酶处理的荔枝汁与新鲜汁最为接近。GC-MS 共鉴定出 62 种挥发性成分，总体挥发性成分的 PCA 结果表明抗坏血酸与新鲜汁更加接近。硫化物抑制率结果显示葡萄糖氧化酶对四种硫化物的抑制效果最好，对 DMS、DMTS、MTP 的抑制率均达到 100%，对 DMDS 的抑制率为 61.11%。此外，营养品质方面，添加的全部抑制剂均可以使荔枝汁总酚、总黄酮含量上升，多酚类抑制剂对总酚、总黄酮的提升效果大于葡萄糖氧化酶和抗坏血酸。抗氧化能力显示邻苯三酚和没食子酸较大程度地提高了抗氧化能力，而葡萄糖氧化酶对荔枝汁抗氧化能力的影响较小。综合品质进行 PLS-DA 分析发现葡萄糖氧化酶处理后的荔枝汁在感官及营养品质方面与新鲜荔枝汁最接近，表现最为突出。但由于葡萄糖氧化酶在色泽品质方面表现有待提高，后期可开展多种抑制剂的协同作用研究，以期最大程度地减少热加工对荔枝汁的不利影响。

© 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] 付丽宇，李艳兰，张昭其，等. 荔枝鲜果及其加工品香气物质研究进展[J]. 广东农业科学，2022，49(8)：120−128. [FU Liyu, LI Yanlan, ZHANG Zhaoqi, et al. Research progress of aroma compounds in litchi fruit and its processed products[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2022, 49(8): 120−128.]

[2] 农业农村部南亚热带作物中心. 中国荔枝、龙眼产业发展报告[J]. 中国热带农业，2024(3)：5−7. [South Subtropical Crops Center, Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Report on the development of China's litchi and longan industries[J]. China Tropical Agriculture, 2024(3): 5−7.]

[3] AN Kejing, LIU Haocheng, FU Manqin, et al. Identification of the cooked off-flavor in heat-sterilized lychee (*Litchi chinensis* Sonn.) juice by means of molecular sensory science[J]. Food Chemistry, 2019, 301: 125282.

[4] 王蓓，韩兆盛，杨智杰，等. 6 类常见食品中含硫化合物风味特征及形成机理研究进展[J]. 食品科学技术学报，2022，40(6)：13−25. [WANG Bei, HAN Zhaosheng, YANG Zhijie, et al. Research progress on flavor characteristics and formation mechanism of sulfur compounds in six common foods[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 40(6): 13−25.]

[5] CHENG Y J ROUSEFF R, LI G J, et al. Methanethiol, an off-flavor produced from the thermal treatment of mandarin juices: A study of *Citrus* sulfur volatiles[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(4): 1030−1037.

[6] YU Pei, YANG Yini, SUN Jinyuan, et al. Identification of volatile sulfur-containing compounds and the precursor of dimethyl sulfide in cold-pressed rapeseed oil by GC-SCD and UPLC-MS/MS[J]. Food Chemistry, 2022, 367: 130741.

[7] PAN Xin, ZHANG Wentao, LAO Fei, et al. Isolation and identification of putative precursors of the volatile sulfur compounds and their inhibition methods in heat-sterilized melon juices [J]. Food Chemistry, 2021, 343: 128459.

[8] KOKKINIDOU S, PETERSON D G. Control of Maillard-type off-flavor development in ultrahigh-temperature-processed bovine milk by phenolic chemistry[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(32): 8023−8033.

[9] 孙钰清，孔凡玉，吴继红，等. 多酚对热处理甜瓜汁挥发性关键异味组分的抑制作用[J]. 食品科学，2020，41(16)：21−28. [SUN Yuqing, KONG Fanyu, WU Jihong, et al. Inhibitory effect of polyphenols on key off-odors in thermally processed muskmelon juice[J]. Food Science, 2020, 41(16): 21−28.]

[10] LUO Dongsheng, XU Xinxing, BI Shuang, et al. Study of the inhibitors of cooked off-flavor components in heat-treated Xizhou melon juice[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(37): 10401−10411.

[11] 刘媛媛. 热加工番茄汁关键异味物质的鉴定及控制措施研

究[D]. 无锡: 江南大学, 2022. [LIU Y Y. Identification and control measures of key cooked off-flavor compounds in hot processed tomato juice[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.]
[12] OLADUNJOYE A O, ADEBOYEJO F O, OKEKUNBI T A, et al. Effect of thermosonication on quality attributes of hog plum (*Spondias mombin* L.) juice[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 70: 105316.
[13] XU Sujuan, HE Wanying, YAN Jinting, et al. Volatomics-assisted characterization of aroma and off-flavor contributors in fresh and thermally treated kiwifruit juice[J]. Food Research International, 2023, 167: 112656.
[14] ZHANG Wentao, LAO Fei, BI Shuang, et al. Insights into the major aroma-active compounds in clear red raspberry juice (*Rubus idaeus* L. cv. Heritage) by molecular sensory science approaches [J]. Food Chemistry, 2021, 336: 127721.
[15] FENG Shi, HUANG Mingyang, CRANE J H, et al. Characterization of key aroma-active compounds in lychee (*Litchi chinensis* Sonn.)[J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2018, 26(2): 497−503.
[16] 陈颖. 热加工杨梅汁香气变化规律及多酚调控机制[D]. 杭州: 浙江大学, 2022. [CHEN Y. Changes of aroma components in thermallytreated Chinese bayberry (*Myrica rubra*) juice andits regulation mechanism by polyphenol[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.]
[17] MANDHA J, SHUMOY H, DEVAERE J, et al. Effect of lactic acid fermentation on volatile compounds and sensory characteristics of mango (*Mangifera indica*) juices[J]. Foods, 2022, 11(3): 383.
[18] MANZOOR M F, XU Bin, KHAN S, et al. Impact of high-intensity thermosonication treatment on spinach juice: Bioactive compounds, rheological, microbial, and enzymatic activities[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 78: 105740.
[19] MOREIRA S A, PINTADO M E, SARAIVA J A. Effect of a winter savory leaf extract obtained using high hydrostatic pressure on the quality of carrot juice[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(1): 74−81.
[20] XU Zijing, YANG Zihan, JI Junfu, et al. Polyphenol mediated non-enzymatic browning and its inhibition in apple juice[J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134504.
[21] LUO Dongsheng, PAN Xin, ZHANG Wentao, et al. Effect of glucose oxidase treatment on the aroma qualities and release of cooked off-odor components from heat-treated Hami melon juice[J]. Food Chemistry, 2022, 371: 131166.
[22] PHAM H T T, KITYO P, BUVÉ C, et al. Influence of pH and composition on nonenzymatic browning of shelf-stable orange juice during storage[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(19): 5402−5411.
[23] ANDRÉS-BELLO A, BARRETO-PALACIOS V, GARCÍA-SEGOVIA P, et al. Effect of pH on color and texture of food products[J]. Food Engineering Reviews, 2013, 5(3): 158−170.
[24] 吕莹. 冻干胡萝卜片褪色调控机制及风味变化规律研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023. [LÜ Y. Studies on the color regulation mechanism and flavor changes of freeze-dried carrot slices[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023.]
[25] XUE Hongkun, ZHAO Jianduo, WANG Yu, et al. Factors affecting the stability of anthocyanins and strategies for improving their stability: A review[J]. Food Chemistry: X, 2024, 24: 101883.
[26] EKICI L, SIMSEK Z, OZTURK I, et al. Effects of temperature, time, and pH on the stability of anthocyanin extracts: Prediction of total anthocyanin content using nonlinear models[J]. Food Analytical Methods, 2014, 7(6): 1328−1336.
[27] WU Yuwen, PAN Qiuhong, QU Wenjun, et al. Comparison of volatile profiles of nine litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) cultivars from Southern China[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(20): 9676−9681.
[28] CHYAU C C, KO P T, CHANG C H, et al. Free and glycosidically bound aroma compounds in lychee (*Litchi chinensis* Sonn.) [J]. Food Chemistry, 2003, 80(3): 387−392.
[29] 杨帆. 西瓜汁关键异味化合物与果糖相互作用及其释放规律的研究[D]. 北京: 北京工商大学, 2021. [YANG F. Study on the interaction of key peculiar compounds in watermelon juice and fructose and their release[D]. Beijing: Beijing Technology and Business University, 2021.]
[30] TROISE A D, FIORE A, COLANTUONO A, et al. Effect of olive mill wastewater phenol compounds on reactive carbonyl species and Maillard reaction end-products in ultrahigh-temperature-treated milk[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(41): 10092−10100.
[31] OANCEA A M, TURTURICĂ M, BAHRIM G, et al. Phytochemicals and antioxidant activity degradation kinetics during thermal treatments of sour cherry extract[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 82: 139−146.
[32] TROISE A D, VITIELLO D, TSANG C, et al. Encapsulation of ascorbic acid promotes the reduction of Maillard reaction products in UHT milk[J]. Food & Function, 2016, 7(6): 2591−2602.
[33] 王丹, 王智能, 董丽红, 等. 灭菌和贮藏温度对荔枝汁中多酚化合物组成、含量及其抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(11): 275−280. [WANG Dan, WANG Zhineng, DONG Lihong, et al. Effect of sterilization and storage temperature on the composition, content and antioxidant activity of polyphenol compounds in lychee juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(11): 275−280.]
[34] 周晶晶.葡萄糖氧化酶对百香果浑浊果汁储藏过程中褐变的抑制研究[D]. 柳州: 广西科技大学, 2013. [ZHOU J J. Inhibition of browning in passion turbid fruit juice during storage by glucose oxidase[D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2013.]
[35] DERARDJA A E, PRETZLER M, KAMPATSIKAS I, et al. Inhibition of apricot polyphenol oxidase by combinations of plant proteases and ascorbic acid[J]. Food Chemistry: X, 2019, 4: 100053.
[36] 徐艳群, 黄静, 吴梓青, 等. 羟丙基-*β*-环糊精对肉桂乌龙茶香气的保护[J]. 食品工业科技, 2024, 45(16): 129−137. [XU Yanqun, HUANG Jing, WU Ziqing, et al. Preservation of aroma in Rougui oolong tea by hydroxypropyl-*β*-cyclodextrin[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(16): 129−137.]