刘格格, 陈芹芹, 毕金峰. 基于挥发性组学结合化学计量学动态解析浓缩桃浆加工过程中的香气演变 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(13): 1−10. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090002
LIU Gege, CHEN Qinqin, BI Jinfeng. Dynamic Profiling of Aroma in Concentration Peach Puree Processing via Volatilomics and Chemometrics[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(13): 1−10. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090002

·特邀主编专栏—果蔬基料制造: 基础理论、新型加工、质量控制与智能制造（客座主编: 徐贞贞、王永涛、李涛; 产业顾问: 李仁杰）·

基于挥发性组学结合化学计量学动态解析浓缩桃浆加工过程中的香气演变

刘格格, 陈芹芹, 毕金峰*
（中国农业科学院农产品加工研究所, 农业农村部农产品加工与贮藏重点实验室, 北京 100193）

摘　要: 不同加工阶段对浓缩桃浆的香气品质产生显著影响，明确各加工阶段香气演变规律对于改善产品品质具有重要意义。本研究以商业化浓缩桃浆 4 个加工阶段（破碎、离心、浓缩和灭菌）的原料为研究对象，通过风味组学结合化学计量学分析，明确浓缩桃浆关键香气发生转变的关键环节及差异香气活性成分。结果表明：4 个阶段桃浆中共检测到 89 种挥发性成分，包含 γ-癸内酯、丁酸乙酯、异戊酸乙酯、乙酸异戊酯、乙酸己酯、乙酸叶醇酯、己醛、辛醛、（E,Z）-2, 6-壬二烯醛、正己醇、苯甲醇、大马士酮、异戊酸、茶香螺烷和 2-乙酰基-1-吡咯啉共 15 种关键香气活性成分（relative odor activity value，rOAV≥1），其中破碎、离心、浓缩和灭菌后的桃浆分别鉴定出 11、8、4 和 2 种关键香气活性成分。结合主成分分析，发现浓缩过程是桃浆产品香气劣变的关键环节，与破碎桃浆相比，浓缩桃浆中果香酯和青香醇的相对含量分别减少了 100.00% 和 97.95%。此外，通过变量重要性投影（variable influence on projection，VIP）分析，筛选出 4 种区分不同加工阶段桃浆的差异香气活性成分，包括果香的乙酸叶醇酯（VIP：1.16）、青香和花香的正己醇（VIP：2.41）和苯甲醇（VIP：1.82）以及酸败味的异戊酸（VIP：1.93），它们的含量变化是造成浓缩阶段桃浆特征香气丧失的关键因素，因此桃浆连续生产过程中的浓缩阶段是导致关键香气发生不良转变的关键步骤。本研究为桃浆加工企业通过优化浓缩技术生产高保留特征风味的桃浆产品提供了理论支撑。

关键词: 商业浓缩桃浆, 气相色谱-串联质谱法, 相对气味活性值, 特征香气, 差异香气活性成分
中图分类号: TS255.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)13−0001−10
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090002
本文网刊:

Dynamic Profiling of Aroma in Concentration Peach Puree Processing via Volatilomics and Chemometrics

LIU Gege, CHEN Qinqin, BI Jinfeng*
（Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Agro-products Processing and Storage, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China）

Abstract: The aromatic quality of concentrated peach puree was significantly influenced by different processing stages. To improve product quality, it was vital to elucidate the patterns of aroma evolution at each processing stage. Flavoromics combined with chemometrics were used to clarify the stage and differential aroma-active components of peach puree after commercial crushing, centrifugation, concentration and sterilization. A total of 89 volatile components were determined in the peach puree throughout the four stages. Among them, 15 volatiles, with relative odor activity value (rOAV) ≥ 1, were defined as the key aroma-active components: γ-decalactone, ethyl butyrate, ethyl isovalerate, isoamyl acetate, hexyl acetate,

收稿日期: 2025−09−01
基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项（CARS-30-5-02）; 中国农业科学院科技创新工程项目（CAAS-ASTIP-2025-IFST）。
作者简介: 刘格格（1999−）（ORCID: 0000−0001−7302−9814）, 女, 博士研究生, 研究方向: 食品化学与营养, E-mail: liugg0423@163.com。
*** 通信作者:** 毕金峰（1970−）（ORCID: 0000−0001−8664−8788）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 果蔬加工制造与营养科学, E-mail: bjfcaas@126.com。

(Z)-3-hexenyl acetate, hexanal, octanal, (E,Z)-2,6-nonadienal, 1-hexanol, benzyl alcohol, damascenone, isovaleric acid, theaspirane, and 2-acetyl-1-pyrrolidine. Specifically, 11, 8, 4 and 2 key aroma-active components were identified in the crushed, centrifuged, concentrated and sterilised peach puree, respectively. Furthermore, principal component analysis (PCA) revealed that the concentration step was identified as the crucial stage responsible for the changes and deterioration of the aroma quality in peach purees. Compared to the peach puree after crushing, fruity esters and green alcohols in the peach puree after concentration decreased by 100.00% and 97.95%, respectively. In addition, four differential aroma-active compounds were screened out using variable influence on projection (VIP) analyses to distinguish peach puree across processing stages: leaf acetate (fruity, VIP: 1.16), 1-hexanol (green/floral, VIP: 2.41), benzyl alcohol (floral, VIP: 1.82), and isovaleric acid (rancid, VIP: 1.93). The concentration-induced changes in these compounds contributed significantly to the loss of the characteristic peach aroma at the concentration stage. Hence, concentration is the key step inducing undesirable variations in characteristic aroma compounds during the continuous production of peach puree. This study provides a theoretical basis for peach puree processing enterprises to produce products with highly preserved characteristic aromas through the optimization of concentration technologies.

Key words: commercial concentrated peach puree; gas chromatography-tandem-mass spectrometry; relative odor activity value; characteristic aroma; differential aroma-active components

桃子(*Prunus persica* (L.) Batsch)因其多汁的口感和独特的香气颇受消费者青睐[1],其香气品质直接影响消费者接受度[2]。鲜桃中富含内酯类、酯类等挥发性成分[3],其中 γ-癸内酯、乙酸己酯、芳樟醇等是关键香气物质,共同赋予桃果实独特果香与花香属性[4]。桃浆作为鲜桃的主要加工形式,这些关键香气成分的共同作用赋予了其独一无二的感官属性。

然而,桃子作为呼吸跃变型果实,夏季高温高湿条件成熟的果实易受机械损伤,进而由于微生物的污染出现腐败变质现象,造成了鲜桃品质损失[3,5]。而热处理作为传统的浓缩桃浆加工手段,有效降低了桃采后损失率,还解决了货架期较短的问题[6]。热浓缩作为常用的浓缩手段,是影响香气品质的关键环节,产生以“蒸煮味”为主的热异味现象[7],降低了消费者的购买欲。本团队之前的研究表明,鲜桃浆经 50 ℃浓缩 1 h 后,桃浆的酯类显著减少,且产生了 1-辛烯-3-酮、异戊酸、1-戊烯-3-酮等异味成分,赋予了浓缩后桃浆“蒸煮味”“酸败味”等引起香气劣变的不愉快属性[6]。此外,热杀菌桃浆对其特征香气变化产生了一定的影响,如产品的色泽[8]、关键香气成分[9]的变化。具体而言,85 ℃、30 min 得到的蟠桃汁中醛类和酯类物质明显下降,造成了样品清香和果香属性的减弱,而 β-大马士酮和戊醛成为热杀菌样品中主要的优势成分,增强了蟠桃汁中包括“蒸煮味”在内的异味属性比例,进而导致其香气品质的劣变[10]。与鲜蟠桃汁相比,Wang 等[11]发现热杀菌蟠桃汁中的关键酯类降低了 26.86%,果香属性减弱。目前的研究仅是针对桃浆热加工的某一个环节或模拟加工企业的条件进行关键香气变化的探索,而对于实际生产全链条中香气动态变化规律尚不明确,因此解析桃浆加工过程中关键香气的演变机制,对提升产品质量具有重要意义。

为了追踪浓缩桃浆实际生产全链条过程中关键香气的演变规律,本研究通过顶空固相微萃取-气相色谱质谱联用(headspace-solid microextraction-gas chromatography-tandem-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS/MS)结合相对气味活性值(relative odor activity value, rOAV),明确浓缩桃浆在破碎、离心、浓缩和灭菌阶段的关键香气活性成分,并通过偏最小二乘判别分析(partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)下的变量重要性投影(variable importance in projection, VIP),解析不同加工阶段浓缩桃浆关键香气的动态变化规律。本研究结果可为桃浆加工过程香气品质调控提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

商用浓缩桃浆 由北京汇源饮料食品集团公司提供,分别从同一批生产线上随机抽取破碎后、离心后、浓缩后和灭菌后的桃浆样品(各 2 kg);2-辛醇(色谱纯,≥98%) 德国 Sigma-Aldrich 公司;氯化钠(NaCl) 上海源叶生物科技有限公司;甲醇(分析纯) 北京广达恒益科技有限公司。

CTC PAL RSI 自动进样机械臂 广州智达实验室科技有限公司;TRACE 1310-TSQ9000 气相色谱串联质谱联用仪 美国 Thermo Fisher 公司;DB-WAX(30 m×0.25 mm×0.25 μm)极性毛细管柱 美国 Agilent 公司;三相萃取纤维头(二乙烯基苯/碳分子筛/聚二甲基硅氧烷, DVB/CAR/PDMS, 50/30 μm) 美国 Supelco 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 HS-SPME 参考团队研究方法[3],称取 2.0 g 桃浆样品于 20 mL 洁净无味的顶空玻璃瓶中,并向瓶中加入 0.6 g 氯化钠,混合均匀。测试前添加 5 μL 的 2-辛醇(25 μg/mL,溶于超纯水中)于顶空瓶中并密封,样品在 40 ℃ 条件下使用 DVB/CAR/PDMS 萃取头(50/30 μm)萃取 30 min 后,再平衡 40 min,并在 250 ℃ 进样口处解吸 5 min,完成香气成分的萃取。

1.2.2 色谱条件 色谱柱:DB-WAX 石英毛细柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm);升温程序:40 ℃ 保持

2 min，以 3 ℃/min 升至 150 ℃，再以 10 ℃/min 升至 230 ℃，保持 3 min；载气（He，纯度 99.999%）流速 1.0 mL/min。

1.2.3　质谱条件　电子轰击离子源；电子能量 70 eV；传输线温度 230 ℃；离子源温度 250 ℃；质量扫描范围 m/z 35~500。

1.2.4　挥发性成分定性及定量分析

1.2.4.1　定性分析　基于 MS 数据库和保留指数（retention index，RI）筛选得到挥发性成分。首先，样品离子流图与 NIST 数据中的峰图信息进行比对，选择相似度大于 75% 的成分；其次，基于正构烷烃（C7~C40）的峰图计算挥发性成分的实际 RI 值（式（1）），并通过查阅文献中该成分的理论 RI 值[1,6]，二者差值≤20 的成分即为最后鉴定的挥发性成分。同时，挥发性成分的筛选参照已发表的文献中关于桃浆香气嗅闻的相关结果[6,12]。

$$RI = 100 \times n + \frac{100 \times (T_i - T_n)}{T_{n+1} - T_n} \quad 式（1）$$

式中：n 和 n+1 表示正构烷烃的碳数；T_i 表示某组分的实际保留时间；T_n 和 T_{n+1} 分别表示正构烷烃 C_n 和 C_{n+1} 的实际保留时间，三者关系为：$T_n \leqslant T_i \leqslant T_{n+1}$。

1.2.4.2　定量分析　采用内标半定量法（2-辛醇）计算桃浆中挥发性成分的相对含量，具体计算参考 Liu 等[6] 的方法，根据被测成分与内标物峰面积的比值，求得各组分的相对含量，具体公式如下：

$$C_i = \frac{A_i \times C_{内标}}{A_{内标}} \quad 式（2）$$

式中：$C_{内标}$和 C_i 分别为内标物（2-辛醇）和某组分的相对含量，μg/kg；$A_{内标}$和 A_i 分别代表内标峰和某组分的峰面积。

1.2.5　香气活性成分分析　采用 rOAV 法对桃浆中的香气活性成分进行分析，具体参考陈盛相等[13] 的方法。气味活性值用来分析挥发性成分对桃浆香气的贡献程度，rOAV≥1 的挥发性成分则认为是浓缩桃浆中的香气活性成分，其值越高，表明该成分对样品最终释放的香气贡献作用越大。

$$rOAV = \frac{C}{T} \quad 式（3）$$

式中：C为某组分的相对含量，μg/kg；T为该组分的感觉阈值，mg/kg。

1.3　数据处理

基于 1.2.5 部分筛选出来的香气活性成分（rOAV≥1），分析其含量在浓缩桃浆破碎、离心、浓缩及灭菌阶段的差异，进一步解析关键香气变化最为显著的或鲜桃特征香气损失最为严重的关键阶段。参考之前的方法[1]，使用 rOAV≥1 香气活性成分的相对含量构建 PLS-DA 模型，并计算每个成分的 VIP 值，VIP>1 的成分定义为差异香气活性成分。

挥发性成分的相对定量结果以均值（Mean）±标准差（SD）的形式呈现，并使用 IBM SPSS Statistics 26.0 软件对其进行单因素显著性分析（邓肯检验，Duncan test），$P<0.05$ 表示显著性差异。采用 TBtools v2.210 软件 Origin Pro 2021 软件分别绘制挥发性成分的圆形聚类热图、柱状图与极性坐标图以及香气活性成分的弦图。另外，通过 SIMCA 14.1 软件绘制 PCA 得分图，同时 VIP 得分图由 MetaboAnalyst 6.0 平台（https://www.metaboanalyst.ca/）绘制得到。所有样品均重复测定 3 次。

2　结果与分析

2.1　挥发性成分分析

基于 HS-SPME-GC-MS/MS 技术，在 4 个阶段桃浆样品中共检测到 89 种挥发性成分，包括 5 种内酯类、27 种酯类、10 种醛类、18 种醇类、8 种酮类、3 种酸类、4 种呋喃类和 14 种其他类，结果见表 1。破碎（二级破碎筛网尺寸：1.5 mm 和 0.6 mm）、离心（3500 r/min）、浓缩（50 ℃，40 min）和灭菌（108~112 ℃，80 s）桃浆中分别检测到 52、54、39 和 38 种挥发性成分，基于各成分的相对含量绘制圆形聚类热图。如图 1 所示，浓缩后的桃浆在挥发性成分组成与灭菌后的桃浆较为相似，而破碎桃浆和离心桃浆的挥发性成分组成与它们之间存在显著性差异，这表明浓缩桃浆加工过程中总体风味的变化与破碎、离心、浓缩及杀菌等关键工艺参数的差异有关[6,11]。

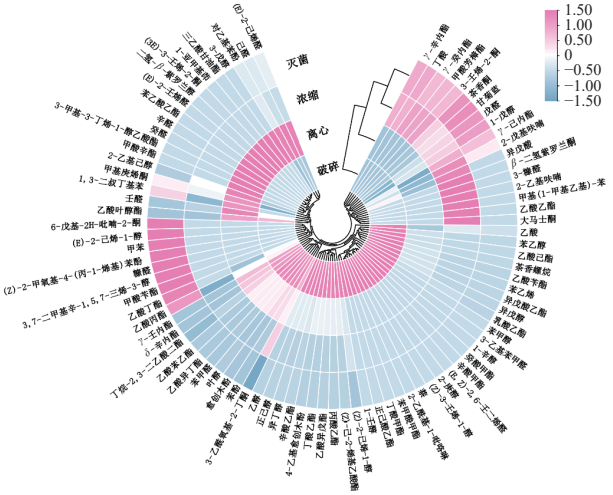


图 1　浓缩桃浆热加工过程挥发性成分圆形聚类热图

Fig.1　Circle clustered heatmap of volatiles of concentrated peach puree during commercial processing

内酯类物质包括 γ-己内酯、γ-辛内酯、γ-癸内酯、δ-辛内酯和 γ-壬内酯是桃浆中的特征化合物，是桃子味的主要来源物质[1]。γ-己内酯是在所有样品中均检测到的成分，相对含量分布在 11.16（离心）~12.89（浓缩）μg/kg 范围内。此外，δ-辛内酯和 γ-壬内酯作为破碎和离心桃浆的关键酯类物质在浓缩和灭菌后未检测到，而是由 γ-辛内酯和 γ-癸内酯所代替，这说明浓缩桃浆离心和浓缩过程桃子味变化较为

表 1 浓缩桃浆不同加工阶段挥发性成分的相对含量

Table 1 Relative content of volatiles in concentrated peach puree during different processing stages

CAS	中文名称	香气描述	RI	相对含量(μg/kg 2-辛醇)				定性方式
				破碎后	离心后	浓缩后	灭菌后	
	内酯类							
695-06-7	γ-己内酯	甜香, 果香	1714	12.13±0.31^{a}	11.16±0.19^{b}	12.89±0.12^{a}	12.75±0.24^{a}	MS/RI
104-50-7	γ-辛内酯	椰子香味	1933	–	–	1.07±0.02^{b}	1.11±0.01^{a}	MS/RI
706-14-9	γ-癸内酯	桃子味	2169	–	–	4.99±0.26^{a}	4.22±0.13^{b}	MS/RI
698-76-0	δ-辛内酯	桃子味	1986	0.46±0.04^{a}	0.33±0.01^{b}	–	–	MS/RI
104-61-0	γ-壬内酯	椰子味, 桃子味	2049	3.96±0.11^{a}	3.26±0.09^{b}	–	–	MS/RI
	酯类							
141-78-6	乙酸乙酯	果香, 菠萝味	831	–	–	27.5±0.49	–	MS/RI
123-86-4	乙酸丁酯	梨, 果香	1067	1.00±0.08^{b}	0.55±0.10^{c}	0.76±0.02^{bc}	1.72±0.09^{a}	MS/RI
97-64-3	乳酸乙酯	果香	1352	9.12±0.24^{a}	0.65±0.03^{b}	0.60±0.01^{b}	–	MS/RI
1114-92-7	丁烷-2,3-二乙酸二酯	果香	1533	65.11±0.09^{a}	47.36±0.26^{b}	20.15±0.01^{c}	10.25±0.20^{d}	MS/RI
115-99-1	甲酸芳樟酯	柑橘, 小茴香	1557	–	–	0.55±0.01^{a}	0.48±0.01^{b}	MS/RI
105-37-3	丙酸乙酯	果香	933	2.34±0.22^{a}	0.53±0.08^{b}	–	–	MS/RI
109-60-4	乙酸丙酯	果香	954	10.92±0.71^{b}	10.19±0.81^{b}	–	18.51±1.47^{a}	MS/RI
110-19-0	乙酸异丁酯	苹果味, 香蕉味	1004	13.52±1.09^{a}	6.12±0.20^{b}	–	–	MS/RI
105-54-4	丁酸乙酯	苹果味	1029	4.66±0.35^{a}	1.14±0.05^{b}	–	–	MS/RI
108-64-5	异戊酸乙酯	果香	1062	1.91±0.11^{a}	0.20±0.01^{b}	–	–	MS/RI
123-92-2	乙酸异戊酯	香蕉味	1124	30.51±1.88^{a}	6.93±0.22^{b}	–	–	MS/RI
5205-07-2	3-甲基-3-丁烯-1-醇乙酸酯	果香	1202	–	0.36±0.01	–	–	MS/RI
142-92-7	乙酸己酯	水果味, 愉快气味	1280	33.27±0.37^{a}	1.80±0.01^{b}	–	–	MS/RI
3681-71-8	乙酸叶醇酯	香蕉味	1327	24.13±0.98^{b}	28.01±0.82^{a}	–	–	MS/RI
56922-75-9	(Z)-己-2-烯基乙酸酯	果香	1344	8.63±0.17^{a}	1.92±0.01^{b}	–	–	MS/RI
106-32-1	辛酸乙酯	果香	1447	1.18±0.09^{a}	0.18±0.01^{b}	–	–	MS/RI
112-32-3	甲酸辛酯	果香	1569	–	1.49±0.03	–	–	MS/RI
140-11-4	乙酸苄酯	清新, 煮蔬菜味	1740	7.13±0.03^{a}	0.85±0.01^{b}	–	–	MS/RI
101-97-3	苯乙酸乙酯	果香, 甜香	1797	–	0.20±0.01	–	–	MS/RI
103-45-7	乙酸苯乙酯	玫瑰花香, 蜂蜜香	1834	8.91±0.09^{a}	3.88±0.07^{b}	–	–	MS/RI
102-76-1	三乙酸甘油酯	特异气味	2087	–	0.12±0.01	–	–	MS/RI
93-58-3	苯甲酸甲酯	李子味, 香料味, 甜香	1636	4.52±0.20	–	–	–	MS/RI
623-42-7	丁酸甲酯	果香, 甜香	967	0.32±0.04	–	–	–	MS/RI
110-42-9	癸酸甲酯	酒香	1608	0.30±0.01	–	–	–	MS/RI
123-66-0	正己酸乙酯	苹果皮味, 果香	1242	0.74±0.01	–	–	–	MS/RI
111-11-5	辛酸甲酯	橘子味	1401	1.11±0.23	–	–	–	MS/RI
104-57-4	甲酸苄酯	强烈果味	1699	–	–	–	0.12±0.01	MS/RI
	醛类							
110-62-3	戊醛	杏仁, 麦芽气味	959	–	3.12±0.04^{c}	6.61±0.21^{b}	9.71±0.05^{a}	MS/RI
66-25-1	己醛	青草, 绿色	1079	1.13±0.02^{b}	16.37±1.81^{a}	3.35±0.02^{b}	4.49±0.18^{b}	MS/RI
6728-26-3	(E)-2-己烯醛	苹果, 青草, 绿色	1226	6.24±0.22^{d}	24.82±1.09^{a}	8.95±0.01^{c}	11.37±0.36^{b}	MS/RI
124-19-6	壬醛	柑橘味, 脂肪为, 绿色	1405	2.14±0.02^{b}	4.13±0.03^{a}	1.21±0.02^{c}	0.93±0.05^{d}	MS/RI
100-52-7	苯甲醛	苦杏仁味, 花香	1534	173.78±12.41^{a}	84.64±2.58^{b}	15.17±0.05^{c}	10.29±0.06^{c}	MS/RI
124-13-0	辛醛	脂肪味, 柠檬, 绿色	1299	–	2.19±0.01	–	–	MS/RI
112-31-2	癸醛	肥皂, 橘子皮, 牛脂	1511	–	0.36±0.01	–	–	MS/RI
18829-56-6	(E)-2-壬烯醛	肥皂, 脂肪味, 杏仁味	1547	–	0.10±0.01	–	–	MS/RI
557-48-2	(E,Z)-2,6-壬二烯醛	黄瓜味, 绿色	1595	0.65±0.07	–	–	–	MS/RI
34246-54-3	3-乙基苯甲醛	/	1721	0.18±0.03	–	–	–	MS/RI
	醇类							
123-51-3	异戊醇	轻微酒精气味	1215	61.75±3.99^{a}	6.99±0.96^{b}	0.53±0.01^{b}	0.58±0.01^{b}	MS/RI
71-41-0	1-戊醇	香脂味	1259	–	1.08±0.17^{c}	2.00±0.14^{b}	2.65±0.05^{a}	MS/RI
111-27-3	正己醇	愉快气味, 花香, 绿色	1364	258.81±12.68^{a}	53.31±1.17^{b}	5.51±0.10^{c}	7.75±0.13^{c}	MS/RI
928-96-1	叶醇	青草气味	1396	18.31±0.55^{a}	10.28±0.4^{b}	3.11±0.01^{c}	3.82±0.12^{c}	MS/RI
928-94-9	(Z)-2-己烯-1-醇	绿叶, 绿色气味	1418	22.1±0.68^{a}	5.48±0.18^{b}	4.91±0.74^{b}	–	MS/RI
104-76-7	2-乙基己醇	玫瑰花香, 绿色气味	1502	–	1.09±0.06^{a}	0.39±0.02^{b}	–	MS/RI

续表 1

CAS	中文名称	香气描述	RI	相对含量(μg/kg 2-辛醇)				定性方式
				破碎后	离心后	浓缩后	灭菌后	
100-51-6	苯甲醇	甜香，花香	1892	145.24±1.16^{a}	0.32±0.08^{b}	0.54±0.01^{b}	0.63±0.01^{b}	MS/RI
60-12-8	苯乙醇	蜂蜜香，玫瑰花香	1929	28.49±0.73^{a}	3.52±0.34^{b}	1.51±0.01^{c}	1.47±0.03^{c}	MS/RI
64-17-5	乙醇	甜香	908	294.61±18.76^{a}	58.64±2.77^{b}	–	–	MS/RI
78-83-1	异丁醇	酒精气味，苦味	1093	10.93±0.71^{a}	2.30±0.30^{b}	–	0.24±0.03^{c}	MS/RI
584-02-1	3-戊醇	水果	1110	–	0.56±0.09	–	–	MS/RI
3293-47-8	二氢-β-紫罗兰醇	琥珀木香味	1984	–	0.12±0.01	–	–	MS/RI
143-08-8	1-壬醇	脂肪味，绿色气味	1675	2.27±0.16	–	–	–	MS/RI
111-87-5	1-辛醇	金属味，燃烧气味	1569	1.82±0.01	–	–	–	MS/RI
543-49-7	2-庚醇	蘑菇味	1330	2.77±0.13	–	–	–	MS/RI
10340-23-5	(Z)-3-壬烯-1-醇	蘑菇味	1699	5.70±0.03	–	–	–	MS/RI
928-95-0	(E)-2-己烯-1-醇	绿色，绿叶气味	1418	–	–	–	5.33±0.22	MS/RI
29957-43-5	3,7-二甲基辛-1,5,7-三烯-3-醇	发霉气味	1621	–	–	–	0.12±0.01	MS/RI
	酮类							
110-93-0	甲基庚烯酮	胡椒，蘑菇，橡胶	1348	–	1.49±0.04^{a}	0.70±0.06^{c}	0.87±0.04^{b}	MS/RI
4906-24-5	3-乙酰氧基-2-丁酮	辛辣、甜腻，奶油味	1390	14.62±0.54^{a}	12.43±0.30^{b}	13.53±0.14^{ab}	7.22±0.05^{c}	MS/RI
14309-57-0	3-壬烯-2-酮	果味，辛辣味，甘草气味	1524	–	–	1.03±0.01^{a}	0.89±0.02^{b}	MS/RI
1125-21-9	茶香酮	发霉木香味	1705	–	–	0.84±0.01^{b}	1.33±0.08^{a}	MS/RI
23726-93-4	大马士酮	蒸煮味，苹果，玫瑰味	1842	–	–	0.16±0.01	–	MS/RI
17283-81-7	β-二氢紫罗兰酮	花香，泥土味	1853	–	–	0.05±0.01	–	MS/RI
18402-83-0	(3E)-3-壬烯-2-酮	/	1524	–	0.41±0.01	–	–	MS/RI
27593-23-3	6-戊基-2H-吡喃-2-酮	椰子味	2214	–	–	–	0.29±0.03	MS/RI
	酸类							
64-19-7	乙酸	酸味	1465	63.46±0.05^{a}	–	14.56±0.02^{b}	10.76±0.01^{c}	MS/RI
107-92-6	丁酸	酸臭，奶酪，汗味	1668	–	–	1.34±0.02^{a}	1.42±0.06^{a}	MS/RI
503-74-2	异戊酸	酸败味	1690	18.27±0.40^{b}	–	39.56±0.38^{a}	7.62±0.04^{c}	MS/RI
	呋喃类							MS/RI
3208-16-0	2-乙基呋喃	坚果味	928	–	–	0.7±0.07	–	MS/RI
3777-69-3	2-戊基呋喃	青豆，黄油味	1239	1.37±0.05^{c}	0.98±0.01^{d}	2.28±0.09^{a}	1.69±0.01^{b}	MS/RI
498-60-2	3-糠醛		1473	–	–	11.91±0.21	–	MS/RI
98-01-1	糠醛	烤面包味，甜香	1473	–	–	–	10.08±0.43	MS/RI
	其他类							
108-95-2	苯酚	酚味	2019	0.51±0.11^{a}	0.34±0.02^{ab}	0.15±0.01^{b}	0.13±0.01^{b}	MS/RI
123-07-9	对乙基苯酚	酚味，香料	2192	–	0.53±0.04^{a}	0.16±0.01^{b}	0.15±0.01^{b}	MS/RI
90-05-1	愈创木酚	烟味，甜香，药草味	1876	0.09±0.01^{a}	0.05±0.01^{b}	–	–	MS/RI
2785-89-9	4-乙基愈创木酚	烟熏味	2048	2.91±0.06^{a}	0.73±0.06^{b}	–	–	MS/RI
5912-86-7	(Z)-2-甲氧基-4-(丙-1-烯基)苯酚	/	2188	–	–	–	0.08±0.01	MS/RI
108-88-3	甲苯	化学试剂，刺激味道	1033	–	–	–	1.49±0.02	MS/RI
1014-60-4	1, 3-二叔丁基苯	/	1440	30.45±0.47^{c}	68.84±0.40^{a}	17.01±1.20^{d}	52.13±0.45^{b}	MS/RI
25155-15-1	甲基(1-甲基乙基)-苯	/	1280	–	–	0.24±0.03	–	MS/RI
91-20-3	萘	辛辣味	1752	1.07±0.42	–	–	–	MS/RI
100-42-5	苯乙烯	汽油味	1264	1.25±0.02^{a}	0.12±0.01^{b}	–	–	MS/RI
36431-72-8	茶香螺烷	花香，茶香	1518	8.57±0.43^{a}	0.56±0.01^{b}	0.10±0.01^{b}	–	MS/RI
275-51-4	甘菊蓝	芳香	1752	–	–	0.38±0.03^{b}	0.70±0.03^{a}	MS/RI
2471-84-3	1-亚甲基茚	焦油气味	1752	–	0.60±0.01	–	–	MS/RI
85213-22-5	2-乙酰基-1-吡咯啉	爆米花，熟米饭香气	1335	0.21±0.01	–	–	–	MS/RI

注：“–”和“/”表示未被检出和未查阅到相关信息；挥发性成分的香气描述参考之前的文献[6]和在线网站(Flavornet和ChemicalBook)；RI，保留指数；同行不同小写字母表示有显著性差异(P<0.05)。

明显，这主要是由于长时间的热浓缩(50 ℃，40 min)影响了饱和脂肪酸的酯化过程。与离心、浓缩和灭菌后的桃浆相比，破碎后的桃浆具有最高浓度的酯类(229.35 μg/kg)、醛类(184.12 μg/kg)、醇类(852.80 μg/kg)和酸类物质(81.73 μg/kg)(图 2)，说明其具有突出的果香、青香和酸香属性。但是，这些物质的总含量随着离心、浓缩和灭菌过程的进行呈现逐渐降低的趋势，尤其是与破碎后桃浆相比，灭菌后桃浆中的醇类和酯类物质含量急剧降低，之前的研究表明桃子热杀菌后未检测到正己醇、乙酸己酯和

乙酸叶醇酯[14]，与该结果趋势保持一致。此外，醇类、醛类和酯类成分在离心到浓缩阶段显著降低（P<0.05），说明长时间的热处理（商业条件：50 ℃、40 min）导致浓缩桃浆的果香和青香属性丧失，而浓缩工艺则成为改变浓缩桃浆总体香气的关键环节。酸类物质如乙酸和异戊酸在破碎后的桃浆相对含量较高（表 1），分别为 63.46 μg/kg 和 18.27 μg/kg，而这两种物质在离心桃浆中未被检出。但是，随着热处理工艺的不断进行，乙酸、丁酸和异戊酸均在浓缩和灭菌后的桃浆中检出，这可能是由于加热影响了氨基酸尤其是丝氨酸和异亮氨酸的代谢途径，促使这些酸类物质尤其是丁酸和异戊酸的产生[6]。另外，呋喃类物质在浓缩后的桃浆中总含量最高，为 14.88 μg/kg，与破碎桃浆之间存在显著性差异（P<0.05）。而对于浓缩过程出现的 3-糠醛和灭菌工艺出现的糠醛，都表明了在浓缩桃浆加工后期，美拉德反应成为影响挥发性成分的重要因素，同时是浓缩桃浆色泽和风味改变的主要原因之一[15]。

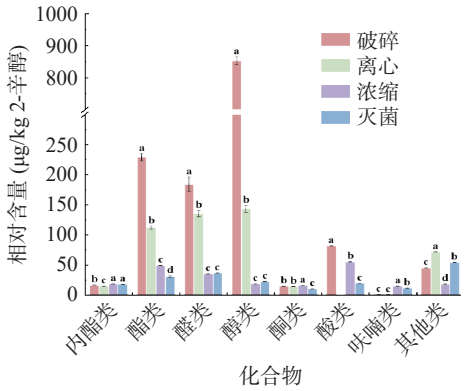


图 2　浓缩桃浆热加工过程挥发性成分含量

Fig.2　Volatiles content in commercial concentrated peach puree during processing

注：不同小写字母表示有显著性差异（P<0.05）。

为了进一步分析浓缩桃浆热加工过程挥发性成分种类的变化情况，绘制了浓缩桃浆热加工过程挥发性成分种类柱状图，见图 3。破碎和离心后的桃浆在挥发性成分种类上较为相似，同时，浓缩和灭菌后的挥发性物质种类相似，这说明了离心到浓缩的过程，是挥发性成分显著变化的阶段，也是影响脂肪酸、氨基酸、碳水化合物等风味前体代谢的重要步骤[6]，进而成为桃浆最终产品风味劣变的关键一环。此外，酯类物质是所有成分中种类最多的挥发性物质，在破碎和离心后的桃浆中高达 19 种，醇类物质次之（12 种）。但是经过长时间的热处理后，浓缩的桃浆和灭菌的桃浆中种类最多的挥发性成分为醇类物质。与离心桃浆相比，酯类物质的种类均显著减少了 84%。长时间的热处理对醇类物质的种类影响次于酯类物质，其中破碎和离心的桃浆种类最多，为 12 种，而在后续的浓缩和灭菌环节分别减少了 4 种和 3 种。破碎和离心桃浆的优势挥发性香气种类由酯类物质转变为浓缩和灭菌后的醇类物质，这可能与后期桃浆加工产品果香属性的降低具有紧密联系，这与文献中报道的热处理后桃浆的酯类物质减少的趋势保持一致[6,10]。综上，浓缩环节是引起浓缩桃浆总体风味改变的主要环节，尤其是造成了果香酯类成分的显著减少。

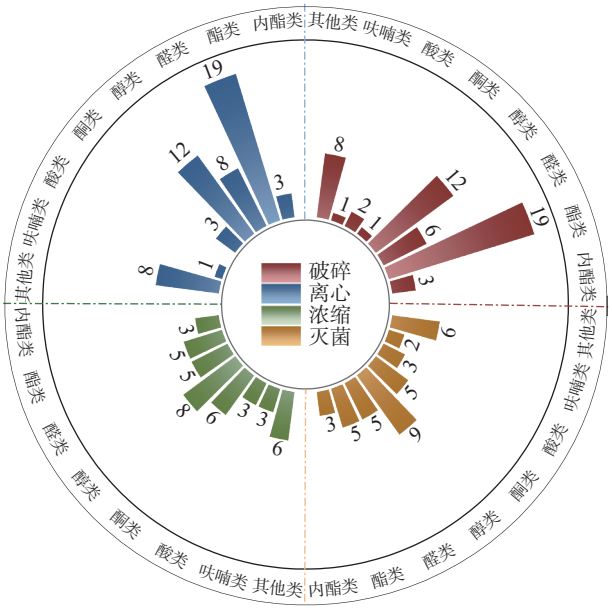


图 3　浓缩桃浆热加工过程挥发性成分种类极坐标

Fig.3　Volatiles types polar coordinates in commercial concentrated peach puree during processing

2.2　香气活性成分分析

rOAV 的计算能够进一步分析挥发性成分对浓缩桃浆总体香气的贡献程度，rOAV≥1 的成分被定义为香气活性成分，它们对桃浆的总体香气具有突出的贡献作用[12]。数值越大，表明贡献程度越大[16]。而 rOAV<1 的挥发性成分则对浓缩桃浆的总体香气具有辅助修饰的作用。这些物质的共同作用下形成了浓缩桃浆的最终香气。

基于 rOAV≥1，四种桃浆中共筛选出 15 种香气活性成分（表 2），包括内酯类 1 种（γ-癸内酯）、酯类 5 种（丁酸乙酯、异戊酸乙酯、乙酸异戊酯、乙酸己酯、乙酸叶醇酯）、醛类 3 种（己醛、辛醛、（E,Z）-2,6-壬二烯醛）、醇类 2 种（正己醇、苯甲醇）、酮类 1 种（大马士酮）、酸类 1 种（异戊酸）和其他类 2 种（茶香螺烷、2-乙酰基-1-吡咯啉）。破碎、离心、浓缩和灭菌后的桃浆分别鉴定出 11、8、4 和 2 种香气活性成分，随着浓缩桃浆热加工的进行，香气活性成分的数量逐渐降低，桃子中的愉快香气属性（如果香）呈现不断减弱的趋势。破碎桃浆中对总体香气具有优势贡献作用的香气活性物质为茶香螺烷（42.86）、正己醇（25.88）、异戊酸乙酯（19.09）和乙酸异戊酯（15.25），该样品的突出香气属性为果香、花香和青香。且该样品中检出 2-乙酰基-1-吡咯啉，丰富了破碎桃浆的香气属性如糯米香气[17]。离心后的桃浆优势香气属性为青香和花香，主要与己醛（6.82）和正己醇（5.33）的突出贡献有关。同时酯类物质也对离心

表 2　浓缩桃浆不同加工阶段关键香气活性成分

Table 2　Key aroma-active compounds in concentrated peach puree during different processing stages

中文名称	阈值(mg/kg)	相对气味活性值			
		破碎	离心	浓缩	灭菌
γ-癸内酯	0.00179	–	–	2.79	2.36
丁酸乙酯	0.001	4.66	1.14	–	–
异戊酸乙酯	0.0001	19.09	2.02	–	–
乙酸异戊酯	0.002	15.25	3.47	–	–
乙酸己酯	0.01	3.33	0.18	–	–
乙酸叶醇酯	0.013	1.86	2.15	–	–
己醛	0.0024	0.47	6.82	1.40	1.87
辛醛	0.0008	–	2.74	–	–
(E,Z)-2,6-壬二烯醛	0.00014	4.62	–	–	–
正己醇	0.01	25.88	5.33	0.55	0.77
苯甲醇	0.1	1.45	0.00	0.01	0.01
大马士酮	0.000002	–	–	82.12	–
异戊酸	0.01	1.83	–	3.96	0.76
茶香螺烷	0.0002	42.86	2.81	0.52	–
2-乙酰基-1-吡咯啉	0.0001	2.13	–	–	–

注：“–”表示未检出，阈值参考相关文献中香气成分在水中的阈值[23]。

桃浆的果香起到一定程度的贡献作用，尤其乙酸己酯被证实为桃子中果香和甜香的关键香气成分[18]，其在破碎桃浆中贡献作用较大(3.33)，在后续的桃浆中对总体香气没有贡献作用或未被检出。离心桃浆经浓缩后，大马士酮代替酯类、醇类等物质，成为此阶段桃浆的优势香气活性成分，其 rOAV 高达 82.12，在所有香气活性成分中占据最高水平，这可能是由于长时间的热处理促使甲羟戊酸代谢途径产物的积累[19]。浓缩桃浆在破碎、离心、浓缩及灭菌过程中特征香气成分逐步损失，其中浓缩阶段损失尤为显著；而大马士酮的生成对总体香气具有一定贡献，已有研究表明，该物质是热处理桃汁产生不良气味(如“蒸煮味”)的关键标志物[10,20]。然而，在浓缩阶段，异戊酸(3.96)的生成增强了浓缩桃浆的酸败味，同时青香属性由于醛类物质的减少而降低，这些现象促使鲜桃的特征香气发生进一步的劣变，这可能是因为长时间的热处理改变了丝氨酸、亚麻酸和亚油酸代谢途径的产物，新生成了具有不良属性的挥发性成分或原有的特征香气成分转变为其他物质[6,21]。团队前期研究成果表明桃浆经热浓缩处理(50 ℃、1 h)后生成的异戊酸、异丁酸是酸败味的主要来源，与本研究结果保持一致[6]，证实了浓缩阶段产生的异戊酸是引起桃浆香气劣变的关键香气活性成分。此时，γ-癸内酯作为桃子味的关键成分之一，在浓缩和灭菌阶段对桃浆的总体香气起到重要的贡献作用，尤其成为灭菌桃浆的优势香气活性成分，相比于其它香气成分，浓缩和灭菌处理对其影响较小，由此可能推断热处理对饱和脂肪酸代谢途径的醇酰基转移酶或脂氧合酶的酯化活性影响相对较小[22]。由图 4 可知，破碎后的桃浆总体香气较为丰富，且香气活性成分的贡献程度较大，而随着离心、浓缩和灭菌的不断进行，关键香气活性成分对浓缩桃浆总体香气的贡献程度减弱，导致桃子的特征香气浓郁度降低。此外，浓缩过程新生成了大马士酮，此时桃浆的总体香气发生了一定程度的转变，这可能是浓缩桃浆产品总体香气与鲜桃存在显著差异的一个重要因素，该结论与挥发性成分的总体变化趋势一致。

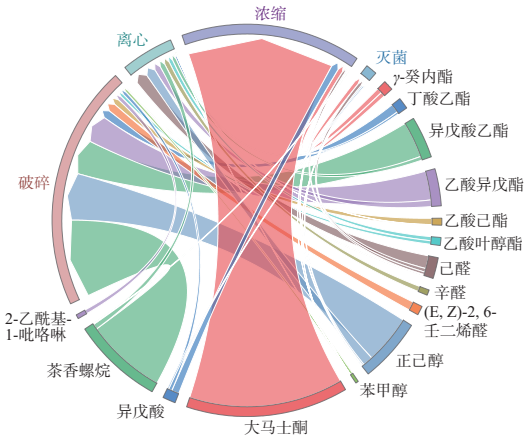


图 4　浓缩桃浆热加工过程香气活性成分弦图

Fig.4　Chord plot of aroma-active components in commercial concentrated peach puree during processing

2.3　香气活性成分 PCA

热加工工艺参数(如温度)通过调控前体代谢过程，显著影响浓缩桃浆中香气活性成分的种类和含量，进而改变其总体香气特征。因此，对不同桃浆中香气活性成分的相对含量进行 PCA，明确香气活性成分在破碎、离心、浓缩和灭菌四个环节的变化情况，见图 5。主成分 1 和主成分 2 的贡献率分别为 67.20% 和 26.60%，累计贡献率占总体信息的 93.80%，能够代表 4 个加工阶段桃浆样品香气特征的基本信息[24]。由图 5 可知，4 个阶段后的桃浆之间没有发生重合，这说明基于 rOAV≥1 筛选的香气活性成分能

够较好地区分破碎、离心、浓缩和灭菌后的桃浆。另外，4 个桃浆在图中分为三组：破碎桃浆为第 1 组，位于第 2 象限；离心桃浆为第 2 组，位于第 4 象限；浓缩和灭菌桃浆为第 3 组，位于第 1 象限，它们之间的香气活性成分特征存在显著性差异（P<0.05），而浓缩桃浆和灭菌桃浆由于距离较近，在香气特征上具有相似性，与挥发性成分结果一致。这说明，破碎到离心、离心到浓缩的过程是浓缩桃浆样品关键香气改变的重要步骤，是食品企业改善其香气品质的关键突破点。

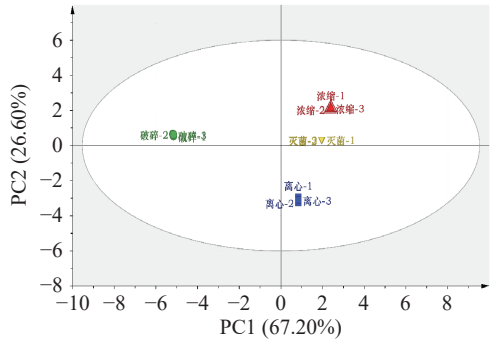


图 5　浓缩桃浆热加工过程香气活性成分 PCA

Fig.5　PCA of aroma-active components in commercial concentrated peach puree during processing

2.4　差异香气活性成分分析

由图 5 可知，破碎、离心、浓缩和灭菌后的桃浆在香气活性成分上存在显著性差异，而具体引起差异的关键成分尚不明确。因此，基于浓缩桃浆不同加工阶段的 GC-MS/MS 数据构建 PLS-DA 模型（图 6A），其中 R^2Y=0.997，Q^2=0.996，接近 1.0，说明该模型稳定性和预测能力较好。此外，该模型经过 200 次置换后，R^2=0.0467，Q^2=−0.424，Q^2 与 Y 轴的交点为负值（图 6B），说明该模型未发生过拟合现象。分析各个香气成分的 VIP 值，能够得到对不同桃浆关键香气差异具有贡献作用的成分。如图 6C 所示，通过 VIP>1，筛选得到正己醇、异戊酸、苯甲醇和乙酸叶醇酯是造成 4 个阶段香气属性存在差异的关键因子，它们的相对含量变化是区分破碎、离心、浓缩和灭菌桃浆的重要因素。正己醇和苯甲醇在 4 个桃浆样品中均被检出，它们是浓缩桃浆中青香和花香的主要贡献者。其中，正己醇对破碎（rOAV=25.88）与离心阶段（rOAV=5.33）桃浆的关键香气具有显著贡献，但在浓缩（rOAV=0.55）及灭菌阶段（rOAV=0.77）对其青香或花香特征贡献减弱[25]。这主要归因于热处理通过影响亚麻酸和亚油酸的脂氧合酶途径[26]，改变了己醛与正己醇的相互转化。另外，以 NADPH 为辅助因子，苯乙醛还原酶可以将苯甲醛还原为苯甲醇[27]，进而对破碎后的桃浆香气产生一定的贡献作用。桃浆在浓缩与灭菌过程中出现的花香与果香减弱现象[28−29]，可归因于热处理对莽草酸代谢途径的影响，该过程改变了其关键风味产物的构成，其可能与热处理改变了莽草酸代谢途径的产物有关[30]。低浓度的乙酸叶醇酯作为果香的贡献者[30−31]，主要通过脂肪酸氧化降解产生[32]，其在破碎（rOAV=1.86）和离心（rOAV=2.15）后桃浆中鉴定为关键香气的贡献者，但浓缩和灭菌桃浆未检出该物质，这表明果香属性是引起浓缩桃浆热加工过程关键香气变化的另一重要因素。而浓缩后桃浆中异戊酸的生成是其关键香气劣变的标志物之一，赋予桃浆不愉快的气味，影响了其香气品质。综上，果香的乙酸叶醇酯、花香或青香的正己醇和苯甲醇与酸败味的异戊酸是标志 4 个阶段桃浆关键香气变化的主要因子。因此，在浓缩桃浆连续生产过程中，监测关键特征酯类、醇类及具有不良气味属性的成分的动态变化，可作为后续桃浆加工工艺优化进而调控香气品质的有效策略。

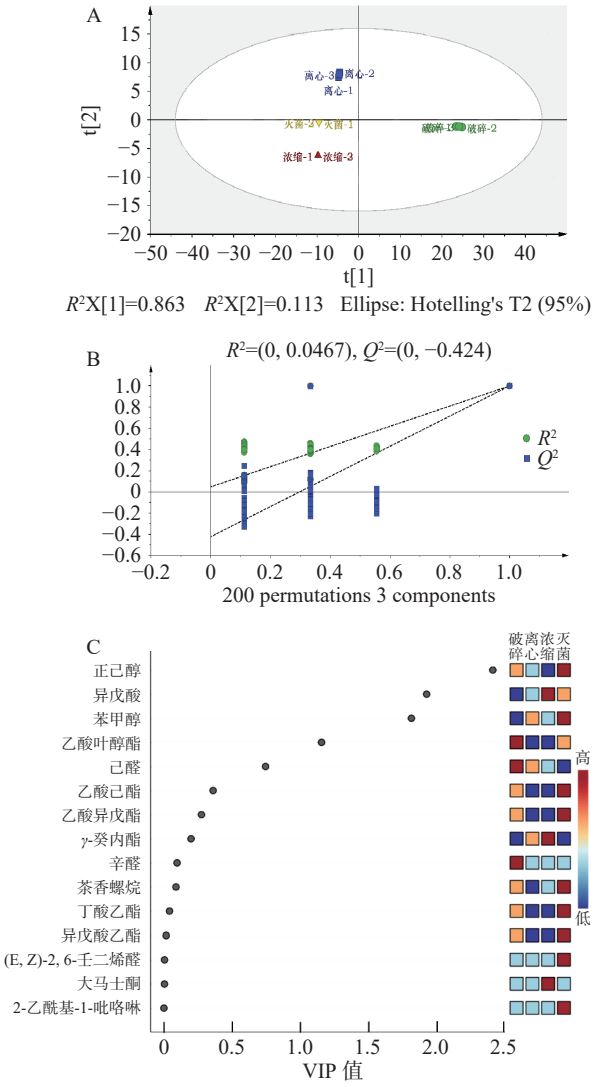


图 6　浓缩桃浆不同加工阶段的 GC-MS/MS 的 PLS-DA 模型分析

Fig.6　PLS-DA model analysis of GC-MS/MS data of concentrated peach puree during processing

注：（A）PLS-DA 得分图；（B）置换检验图；（C）VIP 值。

3　结论

基于风味组学结合多元数据统计分析对商业化加工过程中破碎、离心、浓缩和灭菌后的桃浆样品的

关键香气成分进行动态追踪。结果表明，4 个样品中共检出 89 种挥发性成分，其中 15 种物质鉴定为香气活性成分（rOAV≥1），包括内酯类 1 种、酯类 5 种、醛类 3 种、醇类 2 种、酮类 1 种、酸类 1 种和其他类 2 种。此外，浓缩是引起桃浆关键香气如果香、花香属性减弱的关键步骤，通过监测果香的乙酸叶醇酯、花香的正己醇和苯甲醇与酸败味的异戊酸水平的变化，成为不断优化浓缩工艺、精准控制香气品质的有效策略。通过工艺调控以保留特征香气酯类、醇类并抑制不良香气成分的生成，是提升桃浆产品风味品质的关键。本研究仅针对一条桃浆生产线进行连续取样进行关键香气的分析，为实现香气品质的精准控制，后续工作可进一步开展香气调控的生产验证，通过实证研究明确桃浆不同加工阶段的调控关键点，从而构建有效的定向调控策略，为高品质桃浆产品的产业化提供核心技术支持。

© 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］ 刘格格, 毕金峰, 苟敏, 等. 基于 GC-MS 及电子鼻技术结合化学计量法表征 8 种白桃关键香气的差异[J]. 食品科学, 2023, 44(18): 277−285. ［LIU Gege, BI Jinfeng, GOU Min, et al. Gas chromatography and electronic nose combined with chemometrics to investigate differences in key aroma components in eight white-fleshed peach cultivars[J]. Food Science, 2023, 44(18): 277−285.］

［2］ 吕靖芳, 黄雅丽, 戴芬, 等. 基于 HS-SPME-GC/MS 对湖景蜜露和白丽桃香气成分分析[J]. 中国果树, 2024(8): 24−31,38. ［LÜ Jingfang, HUANG Yali, DAI Fen, et al. HS-SPME-GC/MS analysis of aroma components in 'Hujingmilu' and 'Baili' peach[J]. China Fruits, 2024(8): 24−31,38.］

［3］ LIU Gege, BI Jinfeng, CHEN Qinqin. Impact of postharvest ripening on peach quality: Aroma release and formation mechanism[J]. Food Chemistry, 2025, 479: 143743.

［4］ LIU Gege, BI Jinfeng, CHEN Qinqin. Recent advances on peach aroma: Key aroma-active compounds and their metabolic pathways, analysis strategies, and innovative processing tools[J]. Trends in Food Science & Technology, 2025, 159: 104992.

［5］ 郝浩然, 刘思含, 周宏胜, 等. 1-MCP 结合 ClO_2 处理对水蜜桃保鲜效果的影响[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(5): 1−9. ［HAO Haoran, LIU Sihan, ZHOU Hongsheng, et al. Effects of combined treatment of 1-methylcyclopropene and chlorine dioxide on preservation effects of peach[J]. Food Research and Development, 2025, 46(5): 1−9.］

［6］ LIU Gege, CHEN Qinqin, GOU Min, et al. Formation of key aroma-active and off-flavor components in concentrated peach puree[J]. Food Chemistry, 2024, 439: 138105.

［7］ 尹子迎, 关军锋, 刘金龙. 浓缩果汁及其发酵酒的研究进展[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 225−231. ［YIN Ziying, GUAN Junfeng, LIU Jinlong. Research progress of concentrated fruit juice and its fermented wine[J]. Food & Machinery, 2023, 39(4): 225−231.］

［8］ 陈维宁, 李旋, 王文月, 等. 桃酶促褐变机理与调控技术研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(7): 290−298. ［CHEN Weining, LI Xuan, WANG Wenyue, et al. Research progress on the mechanism and regulation of enzymatic browning in peach fruit[J]. Food Science, 2024, 45(7): 290−298.］

［9］ 邓雅妮, 龚诗媚, 张曼, 等. 基于 GC-IMS 和 GC-MS 分析不同杀菌处理荔枝果汁及其发酵汁挥发性物质的特征[J]. 现代食品科技, 2022, 38(11): 276−284. ［DENG Yani, GONG Shimei, ZHANG Man, et al. Characterization of volatiles in pasteurized *Litchi* juice by treatment and fermented *Litchi* juice based on GC-MS and GC-IMS[J]. Modern Food Science & Technology, 2022, 38(11): 276−284.］

［10］ 谭凤玲, 詹萍, 王鹏, 等. 基于感官评价及 GC-MS 结合 OPLS-DA 分析热杀菌对蟠桃汁呈香品质的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(12): 2425−2435. ［TAN Fengling, ZHAN Ping, WANG Peng, et al. Effects of thermal sterilization on aroma quality of flat peach juice based on sensory evaluation and GC-MS combined with OPLS-DA[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(12): 2425−2435.］

［11］ WANG Peng, TIAN Honglei, TAN Fengling, et al. Impact of commercial processing on volatile compounds and sensory profiles of flat peach juices by PLSR and BP network[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(8): e14575.

［12］ LIU Gege, CHEN Qinqin, GOU Min, et al. The potential of glucosidase and glucose oxidase for aroma improvement in concentrated peach puree based on volatilomics and metabolomics[J]. Food Chemistry, 2024, 450: 139375.

［13］ 陈盛相, 徐志颖, 杨雪, 等. 不同杀青方式对‘白牛早’绿茶风味品质的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(13): 274−282. ［CHEN Shengxiang, XU Zhiying, YANG Xue, et al. Effects of different fixation methods on the flavor and quality of 'Bainiuzao' green tea[J]. Food Science, 2025, 46(13): 274−282.］

［14］ NIU Yunwei, DENG Jianming, XIAO Zuobing, et al. Characterization of the major aroma-active compounds in peach (*Prunus persica* L. Batsch) by gas chromatography-olfactometry, flame photometric detection and molecular sensory science approaches[J]. Food Research International, 2021, 147: 110457.

［15］ GAO Xing, DUAN Yue, SONG Huanlu, et al. Unraveling the mechanism of aroma formation in the Maillard reaction of roasted Wuyi rock tea: Focus on furfural, tea pyrrole, and 1-ethyl-1H-pyrrole[J]. Food Bioscience, 2025, 71: 107137.

［16］ 欧阳雪灵, 江新凤, 刘书玲, 等. 基于顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法和相对气味活性值分析不同发酵时间玫瑰花茶香气的差异[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(10): 243−250. ［OUYANG Xueling, JIANG Xinfeng, LIU Shuling, et al. Analyzing aroma components of *Rosa rugose* Thunb black teas processed by different fermentation times based on headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry and relative odor activity value[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(10): 243−250.］

［17］ 李舒畅, 李军, 张新龙, 等. 基于 SIDA-GC-QqQ-MS/MS 的烤烟中痕量香气化合物 2-乙酰基-1-吡咯啉的测定[J]. 中国烟草学报, 2024, 30(5): 30−38. ［LI Shuchang, LI Jun, ZHANG Xinlong, et al. Determination of trace aroma compound 2-acetyl-1-pyrroline in flue-cured tobacco based on SIDA-GC-QqQ-MS/MS[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2024, 30(5): 30−38.］

［18］ TAN Fengling, WANG Peng, ZHAN Ping, et al. Characterization of key aroma compounds in flat peach juice based on gas chromatography-mass spectrometry-olfactometry (GC-MS-O), odor activity value (OAV), aroma recombination, and omission experi-

ments[J]. Food Chemistry, 2022, 366: 130604.
[19] 王雅琛, 韦漪, 潘秋红. C_{13}-降异戊二烯衍生物在葡萄和葡萄酒中积累与调控的研究进展[J]. 果树学报, 2021, 38(2): 264−277. [WANG Yachen, WEI Yi, PAN Qiuhong. Advance in research on the accumulation and regulation of C_{13}-norisoprenoid derivatives in grape berry and wine[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(2): 264−277.]
[20] HUANG Jing, HE Wanying, WANG Peng, et al. Characterization of aroma profiles in flat peach juice post-thermal sterilization: Insights from comprehensive two-dimensional GC with time-of-flight mass spectrometry (GC×GC-TOF-MS), sensory analysis, and chemometric approaches[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 133: 106398.
[21] BENTO C, GONÇALVES A C, SILVA B, et al. Peach (*Prunus persica*): Phytochemicals and health benefits[J]. Food Reviews International, 2022, 38(8): 1703−1734.
[22] 李晓颍, 宋立琴, 李明媛, 等. 果实挥发性成分的生物合成与代谢调控研究进展[J]. 农业生物技术学报, 2023, 31(3): 629−642. [LI Xiaoying, SONG Liqin, LI Mingyuan, et al. Advances in biosynthesis and metabolism regulation of fruit volatile compounds [J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2023, 31(3): 629−642.]
[23] van GEMERT L J. Compilations of odour threshold values in air, water and other media (2nd enlarged and revised ed.)[M]. The Netherlands: Oliemans Punter & Partners BV, 2011.
[24] 曾小峰, 盖智星, 颜蜜, 等. 蒸汽爆破预处理对压榨紫苏籽油品质和风味的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(7): 257−263. [ZENG Xiaofeng, GAI Zhixing, YAN Mi, et al. Effect of steam explosion pretreatment on the quality and flavor of pressed *Perilla* seed oil[J]. Food Science, 2025, 46(7): 257−263.]
[25] 丁嘉丽, 雷春妮, 王波, 等. 基于甘肃河西走廊产区干红葡萄酒中 8 种风味物质的顶空-气相色谱法优化及其风味识别[J]. 核农学报, 2024, 38(5): 919−930. [DING Jiali, LEI Chunni, WANG Bo, et al. Optimization and flavor recognition of 8 flavor compounds in dry red wine from Hexi Corridor of Gansu Province by headspace-gas chromatography[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2024, 38(5): 919−930.]
[26] LIU Hongru, HE Hui, WANG Qiankun, et al. Near-freezing temperature alters ROS metabolism and gene transcription to enhance peach chilling tolerance and aroma quality[J]. Food Research International, 2025, 209: 116297.
[27] WEI Jie, GUO Runfang, ZHOU Yang, et al. Phenylacetaldehyde reductase gene (SpPAR) regulates the biosynthesis of phenylethanol and benzylalcohol in *Syringa pubescens*[J]. Scientia Horticulturae, 2025, 343: 114075.
[28] 刘亚芹, 王辉, 朱林, 等. 茶树品种对祁门红茶挥发性代谢谱及关键呈香物质的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(8): 211−220. [LIU Yaqin, WANG Hui, ZHU Lin, et al. Effect of tea cultivars on the volatile metabolite profile and key odorants of keemun black tea[J]. Food Science, 2025, 46(8): 211−220.]
[29] CHEN Yuan, AN Huimin, HUANG Yiwen, et al. Characterization of key aroma components of jasmine tea with diverse aroma types: Focus on jasmine tea scented with multipetal jasmine[J]. Food Chemistry, 2025, 29: 102734.
[30] 刘越, 刘学梅, 严地澳, 等. 光强与光质对茶鲜叶挥发性与非挥发性品质的影响[J/OL]. 生态学杂志, 1−12 [2025-08-19]. https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20250528.1601.010. [LIUYue, LIU Xuemei, YAN Di'ao, et al. Effects of light intensity and light quality on volatile and non-volatile quality components of fresh tea leaves[J/OL]. Chinese Journal of Ecology, 1−12 [2025-08-19]. https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20250528.1601.010.]
[31] 徐丽丽, 王佳童, 朱荫, 等. 蜜桃乌龙复合茶中“桃香”关键挥发性成分分析[J]. 茶叶科学, 2023, 43(2): 237−249. [XU Lili, WANG Jiatong, ZHU Yin, et al. Identification of key volatile components of "peach fragrance" in blended peach oolong tea[J]. Journal of Tea Science, 2023, 43(2): 237−249.]
[32] 尤秋爽, 石亚丽, 朱荫, 等. 加工工艺对绿茶关键呈香成分的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(8): 194−200. [YOU Qiushuang, SHI Yali, ZHU Yin, et al. Effect of different processing technologies on the key aroma-active compounds of green tea[J]. Food Science, 2023, 44(8): 194−200.]