

不同真空浓缩方式下沃柑浓缩汁感官品质的比较分析

任二芳^{1,2}, 牛德宝³, 李锐⁴, 黄燕婷^{1,2}, 黄小婷⁴, 李建强^{1,2*}, 陈赶林^{1*}

(1. 广西壮族自治区亚热带作物研究所, 广西南宁 530001) (2. 广西亚热带水果加工工程技术研究中心, 广西南宁 530001) (3. 广西大学轻工与食品工程学院, 广西南宁 530004) (4. 广西鲜友食品科技有限公司, 广西百色 531500)

摘要: 为探究不同真空浓缩方式对沃柑浓缩汁感官品质的影响, 本研究对比了真空低温长时间浓缩、真空高温短时间浓缩、真空三级梯度降温浓缩三种浓缩方法, 基于色差计、电子鼻、电子舌及顶空固微萃取-气相色谱质谱联用方法分别对不同沃柑浓缩汁的色泽、滋味和挥发性成分变化进行解析。结果显示: 与沃柑原汁相比, 真空三级梯度降温浓缩组的复原汁 b^* (12.98)、 ΔE (14.97)、YI (57.16) 无显著变化; 3 种沃柑浓缩复原汁的果汁涩味、咸味、甜味均显著降低, 其中真空高温短时间浓缩组沃柑复原汁的甜味下降了 75.00%; 加热浓缩使浓缩汁的挥发性物质相对含量和种类均发生变化, 真空三级梯度降温浓缩的沃柑浓缩汁烃类物质的种类数量和相对含量分别增加了 6 种、22.25%, 新增的 β -蒎烯 (9.08%)、反式石竹烯 (2.22%)、 β -罗勒烯 (1.17%) 等挥发性成分赋予了沃柑汁更加丰富的香气成分。综合评分和聚类分析表明真空三级梯度降温浓缩的沃柑汁评分最高, 与沃柑原汁最为接近。以上研究结果表明, 真空三级梯度降温浓缩能较好地保留沃柑原汁的色泽和风味品质, 是制备沃柑浓缩汁较适宜的方式。

关键词: 沃柑浓缩汁; 真空浓缩方式; 色泽; 滋味; 挥发性物质

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.9.0858

Comparison Analysis of Sensory Quality of Vacuum Concentrated Orah Mandarin Juice under Different Vacuum Concentration Methods

REN Erfang^{1,2}, NIU Debao³, LI Gao⁴, HUANG Yanting^{1,2}, HUANG Xiaoting⁴, LI Jianqiang^{1,2*}, CEHN Ganlin^{1*}

(1.Guangxi Subtropical Crops Research Institute, Nanning 530001, China)

(2.Guangxi Subtropical Fruits Processing Research Center of Engineering Technology, Nanning 530001, China)

(3.College of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

(4.Guangxi xianyou Food Technology Corporate Limited, Baise 531500, China)

Abstract: In order to explore the effect of different vacuum concentration methods on sensory quality of concentrated Orah mandarin juice, the vacuum low-temperature long time concentration, vacuum high-temperature short time concentration, vacuum three-stage gradient cooling concentration were applied in the present work, and changes in color, taste and volatile components of different vacuum concentrated Orah mandarin juice were analyzed based on colorimeter, electronic nose, electronic tongue and headspace solid microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry. It was found that the color indexes b^* (12.98), ΔE (14.97) and YI (57.16) of the restored juice in the vacuum three-stage gradient cooling concentration group were not significantly changed compared with the original juice. However, the astringency, saltiness and sweetness of the three kinds of restored Orah mandarin juice were significantly lower than those of the original juice, and the sweetness of the restored juice in the vacuum high-temperature short time concentration group was reduced by 75.00%. The relative contents and types of volatile substances in the concentrated juice were changed by heating concentration. In the vacuum three-stage gradient cooling concentration group, the quantity and relative content of hydrocarbons increased by 6 kinds and 22.25%, respectively, and the newly added volatile components, such as β -pinene (9.08%), trans-caryophyllene (2.22%) and β -ocimene (1.17%) gave the juice richer aroma

收稿日期: 2024-06-17; 修回日期: 2024-08-21; 接受日期: 2024-08-22

基金项目: 广西重点研发计划项目 (桂科 AB25069217); 广西农业科学院基本科研业务专项项目 (桂农科 2021YT144)

作者简介: 任二芳 (1986-), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: 2110093871@qq.com

通讯作者: 李建强 (1972-), 男, 本科, 教授级工程师, 研究方向: 农产品贮藏与加工。E-mail: 974108174@qq.com; 共同通讯作者: 陈赶林 (1980-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 农产品加工与综合利用, E-mail: ganlin-chen@163.com

components. The results of comprehensive evaluation and cluster analysis showed that the score of the restored juice concentrated by vacuum three-stage gradient cooling was the highest, which was the closest to the original juice. It could be concluded that vacuum three-stage gradient cooling concentration can better retain the color and flavor quality of the original juice, which is a suitable way to prepare concentrated Orah Mandarin juice.

Keywords: concentrated Orah mandarin juice; vacuum concentration method; color; taste; volatile components

沃柑果肉细嫩多汁, 浓甜可口, 深受消费者喜爱, 近年来已逐步成为我国市场热销的晚熟代表柑橘品种之一^[1]。沃柑季节性强, 其成熟期主要集中在每年 1 月至 3 月之间。现行市场销售主要倾向于新鲜沃柑的直接出售, 但因鲜果上市较为集中, 且其不易长期保存, 很可能在高峰期出现饱和状态和滞销现象。因此, 迫切需要探索和发展多种加工方式以减轻鲜销压力。沃柑可食率高达 75.00% 左右, 出汁率高达 60.00%~70.00%^[2], 是适合果汁加工的优质原料。果汁加工是水果采后提升经济价值的重要手段, 而浓缩汁是果汁的一种重要流通形式, 浓缩果汁加工的目的是在保留水果原有风味的基础上, 便于果汁的运输和储存, 同时也可作为果酱、果酒、糕点及新型茶饮等深加工制品的原材料。近年来, 随着新式茶饮业的蓬勃发展, 市场对高品质浓缩果汁的需求量持续增加, 促使研究人员对浓缩技术进行不断研究, 寻找既能保护果汁特性, 又能满足大规模工业生产的浓缩技术^[3,4]。

当前, 浓缩技术主要包括蒸发浓缩、真空浓缩、冷冻浓缩以及膜分离浓缩等。其中, 蒸发浓缩与真空浓缩是在工业化生产中广泛应用的两种方式, 而蒸发浓缩由于操作温度相对较高, 且浓缩过程暴露在有氧环境中, 不适合热敏性强和易氧化的物料^[5]。相较于传统的蒸发浓缩, 真空浓缩采用真空环境和低温处理条件, 具有能耗相对较低^[6]、操作简便易控、浓缩比高等优点^[7]。由于真空浓缩可在较温和条件下进行, 能够最大程度保留产品的风味及营养物质^[8], 从而常应用于果蔬汁的浓缩处理^[9]。柳杰等^[10]对比了真空浓缩、结冰-解冻浓缩、冷冻浓缩、二级冷冻浓缩、一级冷冻联合真空浓缩对荔枝理化品质、挥发性物质及杀菌效果的影响, 综合考虑建议选用真空浓缩作为当前相对较适宜的荔枝浓缩方式。在真空浓缩操作中, 常出现褐变现象、挥发性物质逸散及营养成分流失等问题, 而浓缩温度是影响产品品质变化的关键性因素^[11]。赵尔民等^[12]研究发现随着真空浓缩温度的升高会显著影响浓缩枇杷汁的透光率和浊度, 进而降低产品的感官质量。尹子迎等^[13]比较了不同真空浓缩温度下梨汁的褐变度、挥发性成分及营养物质变化, 发现温度对浓缩梨汁品质有明显影响, 70 °C 是真空浓缩梨汁的最适温度。但是, 目前关于不同真空浓缩方式对沃柑浓缩汁的影响却鲜有研究报道。

本实验选用果蔬汁工业生产上常用的真空浓缩方式, 对比研究真空低温长时间浓缩、真空高温短时间浓缩、真空三级梯度降温浓缩方式下沃柑浓缩汁的色泽、滋味和挥发性成分等感官品质变化, 筛选对沃柑浓缩汁感官品质影响较小的浓缩方式, 为高品质沃柑浓缩汁的生产提供技术指导和理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

沃柑, 2023 年 1 月采于广西武鸣沃柑基地; 氯化钾、酒石酸、氢氧化钾、乙醇、氯化银等, 均为国产分析纯。

色彩色差计 CR-400, 日本 KONICA MINOLTA, INC; LC-2040C 超高效液相色谱仪, 日本岛津公司; 3H20RI 智能高速冷冻离心机, 湖南赫西仪器装备有限公司; RE-52A 旋转蒸发器, 上海亚荣生化仪器厂; UV-1800PC 型紫外可见分光光度计, 上海美谱达仪器有限公司; Pegasus BT 气相色谱高通量飞行时间质谱联用仪, 美国 LECO 公司; 电子舌 (SA-402B 味觉分析系统), 日本 INSENT 公司; PEN3 型电子鼻, 德国 AIRSENSE 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 沃柑原汁制备

首先, 对沃柑进行清洗及风干, 然后进行对半切割, 采用锥式手动压榨机对一半沃柑进行带皮压榨, 直至重力压杆至最低点并完成一次压榨, 制得的沃柑汁储存在 -80 °C 超低温冰箱中以备后续使用。

1.2.2 沃柑复原汁的制备工艺

沃柑原汁采用真空旋转蒸发仪进行浓缩, 真空度为 0.09~0.095 MPa, 沃柑原汁可溶性固形物为 11.20 °Brix, 待可溶性固形物达 55.00~56.00 °Brix 时为终点, 浓缩温度见表 1。在沃柑浓缩汁中加入其浓缩过程中除去的等量

水分，即得沃柑复原汁，采用不同浓缩处理的沃柑复原汁和沃柑原汁进行后续各项指标检测。

表 1 不同真空浓缩温度

Table 1 Different vacuum concentration temperatures		
样品名	浓缩方式	具体操作
W0	沃柑原汁未浓缩	—
W1	真空低温长时间浓缩	50 ℃浓缩 70 min
W2	真空高温短时间浓缩	75 ℃浓缩 40 min
W3	真空三级梯度降温浓缩	先 75 ℃浓缩 10 min，再 60 ℃浓缩 15 min，最后 45 ℃浓缩 25 min
W1-1	真空低温长时间浓缩	50 ℃浓缩 70 min 后复原
W2-1	真空高温短时间浓缩	75 ℃浓缩 40 min 后复原
W3-1	真空三级梯度降温浓缩	先 75 ℃浓缩 10 min，再 60 ℃浓缩 15 min，最后 45 ℃浓缩 25 min 后复原

1.2.3 色泽的检测

采用色差计测定沃柑汁样品在 Lab 色彩空间中的 L^* 、 a^* 、 b^* 值，其中， L^* 值代表样品的亮度，数值范围从 0（黑色）到 100（白色）； a^* 值代表样品的红绿度，正值表示偏红，负值表示偏绿； b^* 值代表样品的黄蓝度，正值偏黄，负值偏蓝，分别对每组样品进行 5 次平行测定，并根据以下公式计算其总色差 ΔE 、黄色指数 YI ^[6]。

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

$$YI = 142.86 \times (b^* / L^*)$$
 (2)

式中：

- L^* ——为沃柑原汁的亮度、红绿度和黄蓝度；
- a^* ——为沃柑浓缩汁的亮度、红绿度和黄蓝度；
- b^* ——为沃柑复原汁的亮度、红绿度和黄蓝度；
- L_0^* ——为蒸馏水的亮度；
- a_0^* ——为蒸馏水的红绿度；
- b_0^* ——为蒸馏水的黄蓝度。

1.2.4 滋味的检测

参照任二芳等^[14]的测定方法并稍作修改。

1.2.4.1 样品前处理

采用电子舌进行滋味检测。首先将不同浓缩汁复原制成复原汁，然后在 8 000 r/min 下对沃柑原汁和复原汁进行 20 min 离心处理，去除下层沉淀物后备用。

1.2.4.2 电子舌检测

分别对 6 个传感器和 3 个参比电极活化 36 h，然后用两步清洗法检测鲜味、咸味、酸味、苦味和涩味，每次样品测试需时 30 s，每个样品重复测试 5 次，将最后 3 次结果保留用于数据分析。

1.2.5 采用电子鼻的挥发性物质检测

参照任二芳等^[2]的测定方法并稍作修改。

1.2.5.1 样品前处理

将 10.00 g 沃柑原汁、浓缩汁及复原汁分别加入 20.00 mL 富集瓶中，室温下密闭富集处理 50 min 后进行检测。

1.2.5.2 电子鼻检测

检测参数设定如下：进样间隔时间 1 s，清洗时间 60 s，零点配平时间 1 s，预进样时间 5 s，测试时间 80 s，进样流速 400.00 mL/min。测试时间 70 s 后趋于稳定，本研究选取 73~78 s 的信号进行数据处理与分析。电子鼻各个传感器的名称及性能描述见表 2。

表 2 电子鼻传感器性能描述

Table 2 Performance description of electronic nose sensors			
阵列信号	传感器名称	传感器性能描述	参考物及检测限
1	W1C	对芳香物质灵敏	甲苯, 10.00 mg/kg
2	W5S	灵敏度大, 对氮氧化合物很灵敏	NO ₂ , 1.00 mg/kg
3	W3C	对氨类、芳香物质灵敏	苯, 10.00 mg/kg
4	W6S	主要对氢化物有选择性	H ₂ , 100.00 μg/kg
5	W5C	对短链烷烃、芳香类物质灵敏	丙烷, 1.00 mg/kg
6	W1S	对甲基类物质灵敏	CH ₄ , 100.00 mg/kg
7	W1W	对无机硫化物、萜烯类物质灵敏	H ₂ S, 1.00 mg/kg
8	W2S	对醇类、醛酮类物质灵敏	CO, 100.00 mg/kg
9	W2W	对有机硫化物、芳香成分、萜烯类物质灵敏	H ₂ S, 1.00 mg/kg
10	W3S	对长链烷烃、高浓度烷烃灵敏	CH ₄ , 10.00 mg/kg

1.2.6 挥发性物质检测

参照任二芳等^[2]的测定方法。

1.2.6.1 顶空固相微萃取

分别称取 5.00 g 沃柑汁置于 20.00 mL 顶空瓶中, 将老化后的 50/30 μm CAR/PDMS/DVB 萃取头插入样品瓶顶空部分, 于 60 ℃ 吸附 30 min, 吸附后的萃取头取出后插入气相色谱进样口, 250 ℃ 解吸 3 min, 同时启动仪器采集数据。

1.2.6.2 气相色谱质谱联用仪 (GC-MS) 检测条件

色谱条件: 赛默飞 HP-5 色谱柱 (30.00 m×0.25 mm×0.25 μm); 升温程序: 温度 40 ℃ 保持 3 min, 以 10.00 deg/min 升温至 230 ℃, 保持 5 min; 进样口温度为 250 ℃; 载气: 氦气, 流量为 1.00 mL/min。

质谱条件: 电离方式为 EI 源, 发射电流 1.00 mA, 电子能量 70.00 eV, 界面温度 250 ℃, 离子源温度 200 ℃, 探测器电压 2 000.00 V。

1.2.6.3 定性定量分析

通过对收集到的总离子流色谱图的分析, 并与 NIST 谱库进行对比确定挥发性成分, 采用峰面积归一法对挥发性成分进行定量, 得到各挥发性组分的相对含量 (即对应组分峰面积在所有已知定性色谱峰总面积中所占的百分比)。

1.2.7 综合评分

采用变异系数法对样品进行综合评分^[15]。首先对实验数据进行标准化处理, 再通过使用加权平均法对样品的综合评分进行计算, 具体计算公式如下:

$$V_i = \frac{\sigma_i}{X_i} \tag{3}$$

$$W_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n X_i} \tag{4}$$

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - X_i}{\sigma_i} \tag{5}$$

$$S = \sum_{i=1}^n Z_{ij} \times W_i \tag{6}$$

式中:

V_i ——为样品第 i 项指标的变异系数;

σ_i ——为样品第 i 项指标的标准差;

X_i ——为样品第 i 项指标的算术平均值;
 W_i ——为样品第 i 项指标的权重;
 Z_{ij} ——为样品第 i 项指标的标准化值;
 X_{ij} ——为样品第 i 项指标的实际变量值;
 S ——为样品第 i 项指标的样品的综合评分。

1.3 数据处理

本研究通过 Excel 2016 和 OriginPro 2016 进行数据处理以及统计分析; 运用 SPSS 22.0 进行单因素方差检测 (Duncan Test, $P<0.05$), 并结合电子鼻数据分析 Winmuster 的主成份分析 (PCA) 及载荷分析 (Loading analysis, LOA) 功能, 对收集的数据进行解析。

2 结果与分析

2.1 不同真空浓缩方式下沃柑浓缩汁色泽的比较

色泽是反映果汁褐变的关键指标, 不同浓缩方式下沃柑浓缩汁及复原汁的色泽相关指标如表 3 所示。由表 3 可知, 与沃柑原汁相比, 3 种沃柑浓缩汁的色泽指标均发生显著性改变, L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE 、YI 均显著增加 ($P<0.05$), 同时各色泽指标随着温度提高而显著增加 ($P<0.05$), 说明温度对浓缩汁的色泽指标影响显著, 经过浓缩和加热处理后, 沃柑浓缩汁的颜色深度加强, 呈现出更鲜艳的红色和黄色, 沃柑浓缩汁颜色加深的机制主要源于两个方面——非酶促褐变及酶促褐变。其中, 非酶促氧化反应如美拉德和焦糖化反应是推动食品颜色变深的关键原因^[3]。与沃柑原汁相比, 三种复原汁的 a^* 均显著增加, W1-1 的 b^* 、 ΔE 、YI 指标均显著降低 ($P<0.05$), W2-1 的 b^* 、 ΔE 指标均显著增加 ($P<0.05$), W3-1 的 b^* (12.98)、 ΔE (14.97)、YI (57.16) 无显著变化 ($P>0.05$), 这种色泽变化可能与不同浓缩方式加热过程发生的美拉德反应和焦糖化反应程度有关。由此可见, 长时间低温真空浓缩或者短时间高温真空浓缩对沃柑浓缩汁的色泽影响较大, 真空三级梯度降温浓缩是对沃柑浓缩汁色泽保护效果较优的处理方式。

表 3 不同沃柑浓缩汁和复原汁的色泽变化

Table 3 Color changes of different concentrated and restored Orah mandarin juice					
样品	L^*	a^*	b^*	ΔE	YI
W0	32.18±0.27 ^d	-2.25±0.10 ^f	13.46±0.35 ^d	15.39±0.22 ^d	59.77±1.87 ^{cd}
W1	35.10±0.80 ^b	1.67±0.04 ^c	19.94±0.18 ^b	21.98±0.33 ^b	81.19±2.53 ^b
W2	38.58±0.20 ^a	2.50±0.05 ^a	26.35±0.11 ^a	29.28±0.14 ^a	97.56±0.79 ^a
W3	34.17±0.37 ^c	2.16±0.11 ^b	20.37±0.27 ^b	21.94±0.15 ^b	85.19±2.07 ^b
W1-1	31.85±0.55 ^d	-0.96±0.13 ^d	10.80±0.94 ^e	12.76±0.64 ^e	48.49±4.80 ^e
W2-1	34.44±0.09 ^{bc}	-1.68±0.17 ^e	15.20±0.62 ^c	17.89±0.41 ^c	63.08±2.72 ^c
W3-1	32.45±0.38 ^d	-1.56±0.09 ^e	12.98±0.37 ^d	14.97±0.11 ^d	57.16±2.25 ^d

注: 表格中各列标注不同字母表示存在显著性差异 ($P<0.05$); 标注相同字母表示差异不显著 ($P>0.05$)。

2.2 不同真空浓缩方式下沃柑浓缩汁滋味的比较

电子舌通过味觉传感器的敏感膜, 模拟人体味觉感受来识别液体样品中的味觉物质并做出响应, 通过“味觉信息的转换过程”可将测试样品的电势值转化为味觉值^[16-18]。利用电子舌对不同沃柑浓缩汁复原后的滋味分析见表 4, 相比较沃柑原汁, 三种沃柑浓缩复原汁的酸味、苦味、鲜味均未发生显著变化 ($P>0.05$), 涩味、咸味、甜味均显著降低 ($P<0.05$), W2-1 组甜味分值最低, 为 0.58, 与沃柑原汁甜味相比较降低了 75.00%, 分析原因可能是浓缩加热过程发生美拉德和焦糖化等反应进而导致还原糖、氨基酸等呈味物质消耗, 由此可见, 不同浓缩方式均改变了沃柑汁的涩味、咸味、甜味三种滋味属性, 其中高温短时间浓缩对沃柑汁的甜味影响最显著。

表 4 电子舌对沃柑浓缩复原汁的响应分析

Table 4 Response analysis of electronic tongue to restored Orah mandarin juice						
样品	酸味	苦味	涩味	鲜味	咸味	甜味
W0	6.26±0.08 ^a	-0.77±0.01 ^b	1.32±0.02 ^a	-0.16±0.06 ^a	8.24±0.01 ^a	2.32±0.02 ^a
W1-1	6.17±0.08 ^a	-0.73±0.02 ^b	1.20±0.03 ^b	-0.15±0.10 ^a	8.04±0.01 ^{bc}	1.00±0.13 ^b
W2-1	6.13±0.08 ^a	-0.74±0.02 ^b	1.22±0.02 ^b	-0.14±0.05 ^a	8.03±0.02 ^c	0.58±0.04 ^c
W3-1	6.17±0.06 ^a	-0.76±0.03 ^b	1.22±0.02 ^b	-0.12±0.06 ^a	8.06±0.01 ^b	0.88±0.03 ^b

注：表格中各列标注不同字母表示存在显著性差异（ $P<0.05$ ）；标注相同字母表示差异不显著（ $P>0.05$ ）。

2.3 不同真空浓缩方式下沃柑浓缩汁挥发性物质的比较

2.3.1 基于电子鼻技术分析不同沃柑浓缩汁的挥发性物质变化

电子鼻是通过气体传感器阵列来辨识不同气味的先进电子系统，具有高效便捷、高灵敏度以及良好的重复性的优点^[19]。图 1 为电子鼻 10 个传感器对沃柑原汁、浓缩汁、复原汁的响应雷达图。由图可以看出，与沃柑原汁相比，不同浓缩温度的沃柑浓缩汁、复原汁在不同传感器上的香气强度各不相同，各样品响应强度均较大的传感器有 W1W（对无机硫化物、萜烯类物质灵敏）、W2W（对有机硫化物、芳香成分、萜烯类物质灵敏）、W5S（对氮氧化合物很灵敏）、W1S（对甲基类物质灵敏）、W2S（对醇类、醛酮类物质灵敏），其中 W1W 传感器的响应值最高，且在不同样品中的差异最大，不同样品 W1W 传感器响应值为 2.21~8.16，其次是 W2W 传感器，不同样品 W2W 传感器响应值为 2.22~7.12，这可能与萜烯类的含量及保留率有关^[20]。沃柑原汁在 10 个传感器上的响应值均大于沃柑浓缩汁和复原汁，说明不同真空浓缩方式均可导致沃柑汁挥发性风味物质不同程度的损失，其中真空高温短时间浓缩组的沃柑浓缩汁 W1W 响应值下降最多，损失率高达 76.96%。

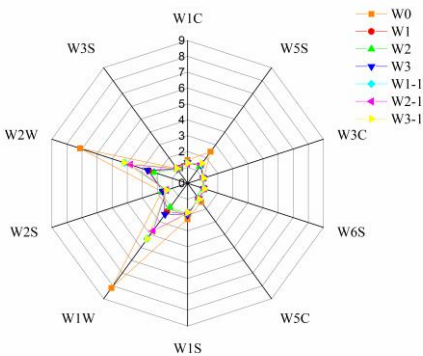


图 1 电子鼻传感器的响应雷达图

Fig.1 Response radar chart of electronic nose sensor

不同真空浓缩方式下所得沃柑浓缩汁的电子鼻 PCA 如图 2 所示。由图可知，电子鼻的 PCA 分析图中横轴为第一主成分（PC1），占据 99.29%的贡献率，而纵轴代表第二主成分（PC2），仅占 0.68%的贡献率，总贡献率占 99.97%，贡献率大于 85.00%，表明 2 个主成分可以反映样品的主要特征信息^[21]，同时 PC1 起主要区分作用，从 PCA 分布图可得出：通过主成分分析，可以明显区分沃柑原汁、浓缩汁和复原汁，表明浓缩后明显改变了沃柑果汁的气味属性，同时发现在第一主成分上 3 组浓缩汁相较于沃柑原汁距离最远，这是由于加热导致沃柑香气损失^[22]，3 组复原汁在第一成分距离沃柑原汁较近，说明浓缩汁复原后的果汁风味与沃柑原汁风味较接近，同时相较于其他浓缩温度，采用真空三级梯度降温浓缩的沃柑浓缩汁和复原汁均与沃柑原汁风味最接近，说明真空三级梯度降温浓缩对沃柑果汁风味较好的保留。

载荷分析（Loading）是一种基于电子鼻传感器 PCA 贡献率大小的评估分析方法^[23]。由图 3 可知，PC1 和 PC2 传感器的贡献率分别为 99.29%和 0.68%，总贡献率为 98.63%，在 PC1 贡献率方面，传感器 W1W 的贡献率最大，其次是传感器 W2W、W5S；而在 PC2 贡献率评估中，传感器 W2S 作出了最大贡献，其次分别为传感器 W5S 与 W1S；说明第一主成分主要反映的是无机硫化物、萜烯类、有机硫化物、芳香成分、氮氧化合物，第二主成分主要反映的是醇类、醛酮类、氮氧化合物及甲基类物质。其中氮氧化合物在第一、二主成分上均有体现，这是由于

氮氧类化合物可能是美拉德反应的中间产物。本研究使用了五个不同的传感器（W1W、W2W、W5S、W2S、W1S）检测沃柑汁的挥发性化合物，结果表明，所检测的挥发性成分可能是构成沃柑汁特征香气的主要成分，但其挥发性物质的定性和定量分析还需进一步结合其他分析方法如气相色谱质谱联用，以确定不同真空浓缩方式下沃柑浓缩汁挥发性物质的变化^[24]。

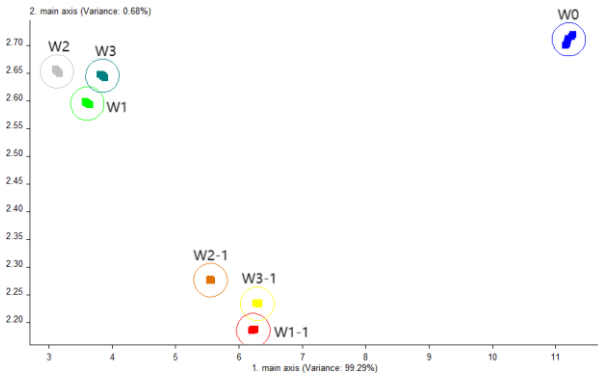


图 2 电子鼻的 PCA 分析

Fig.2 PCA analysis of electronic nose

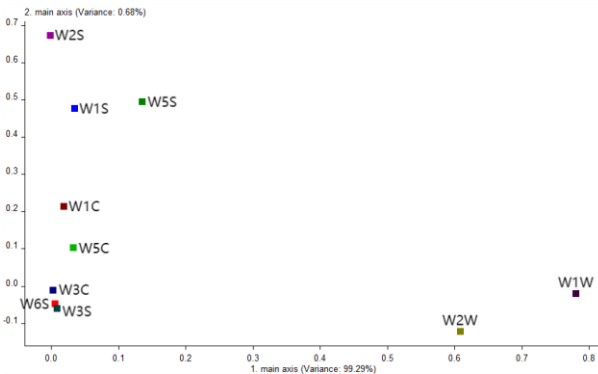


图 3 电子鼻的 Loading 分析

Fig.3 Loading analysis of electronic nose

2.3.2 基于 GC-MS 分析不同沃柑浓缩汁的挥发性成分变化

表 5 沃柑原汁、浓缩汁的主要挥发性成分

Table 5 Main volatile compounds of Orah mandarin juice and concentrated Orah mandarin juice						
序号	挥发性香气成分	保留时间/(min)	相对含量/%			
			W0	W1	W2	W3
1	3,3,6,6-四甲基-1,2,4,5-四氧烷	1.93	1.45	—	—	—
2	β -蒎烯	10.41	—	—	—	9.08
3	2-丁基-1-甲基吡咯烷	11.07	—	0.86	—	—
4	D-柠檬烯	12.33	61.98	68.99	68.75	68.21
5	β -罗勒烯	12.89	—	—	—	1.17
6	十甲基-环戊硅氧烷	17.46	0.08	—	—	—
7	1,2-环氧薄荷烷	18.10	0.24	0.33	—	—
8	十二甲基环己硅氧烷	23.45	0.14	0.09	0.09	0.17
9	(1S, 4S, 4aS)-1-异丙基-4,7-二甲基-1,2,3,4,4a,5-六氢萘	24.68	—	1.76	1.50	0.89
10	(-)- α -萜橙烯	25.51	—	—	—	1.13
11	2-亚甲基-5-(1-甲基乙烯基)-8-甲基-双环癸烷	25.90	—	—	—	0.49
12	(-)- α -柏木烯	26.26	—	—	—	0.11
13	1,1'-双氧-癸烷	26.44	—	0.39	—	—
14	反式石竹烯	26.75	—	—	—	2.22

现代食品科技		Modern Food Science and Technology			2025, Vol.41, No.9		
	15	顺式- α -佛手柑素	27.11	—	—	—	0.75
	16	顺- β -法尼烯	27.61	—	—	—	0.50
	17	1,3-二乙基-1,1,3,3-四甲基-二硅氧烷	27.60	0.16	0.50	0.21	—
	18	(-)-异喇叭烯	28.22	—	—	—	0.42
	19	(+)-表-双环倍半水芹烯	28.39	—	0.28	0.14	—
	20	(Z,E)-3,7,11-三甲基-1,3,6,10-十二碳四烯	28.95	—	—	—	0.53
	21	β -新丁烯	29.05	0.37	—	—	0.49
	22	Δ -杜松烯	29.35	0.68	1.78	1.12	1.34
	23	表芳烃	29.44	0.13	1.59	0.30	0.21
	24	1-(3-甲基丁基)-2,4,6-三甲苯	33.43	0.23	—	0.11	—
		小计		65.46	76.57	72.22	87.71
醇 类 化 合 物	25	二甲基硅烷二醇	3.71	0.95	0.83	—	—
	26	(14 β)-14,15-二氢-乙二胺-14-醇	13.47	—	0.31	—	—
	27	2,6-二甲基-5-庚烯-1-醇	16.92	—	—	—	0.12
	28	($\pm$)-新异胡薄荷醇	17.71	—	—	—	2.31
	29	(-)-蒾品-4-醇	19.02	2.59	2.07	—	—
	30	3-乙氧基-2-溴-1-丙醇	19.58	1.63	0.21	—	—
	31	α -松油醇	19.59	—	—	—	0.26
	32	(+)- β -香茅醇	20.81	2.09	0.78	1.24	2.74
	33	3-甲基-1-辛炔-3-醇	25.53	0.63	0.09	—	—
	34	2-己基-1-癸醇	26.42	0.31	—	1.34	—
	35	1-[[4-(二甲氨基)苄基]氨基]-2-丙醇	34.67	0.18	—	—	—
		小计		8.38	4.29	2.58	5.43
酯 类 化 合 物	36	4-(4-氨基苯基)-4-氧代丁酸甲酯	8.24	—	1.79	—	—
	37	甲基丙烯酸乙烯酯	10.44	—	—	8.62	—
	38	甲酸辛酯	14.11	0.79	—	0.70	—
	39	亚硫酸二戊酯	15.60	3.67	—	0.19	—
	40	2-羟基-2-甲基丙酸羟甲基酯	19.61	—	—	0.17	—
	41	乙酸辛酯	20.21	0.21	—	0.05	—
	42	3,7-二甲基-6-烯基碳酸异丁酯	24.71	1.02	0.49	0.10	—
	43	乙酸香茅酯	24.72	—	—	—	0.81
	44	2-甲基-丙酸 3-羟基-2,2,4-三甲基戊基酯	25.32	0.06	0.23	0.16	0.22
	45	邻甲苯酸环丁酯	27.10	0.46	—	—	—
		小计		6.21	2.51	9.99	1.03
醛 类 化 合 物	46	正辛醛	10.93	2.38	—	—	—
	47	(-)-香茅醛	17.91	—	—	—	0.24
	48	癸醛	20.04	1.96	0.55	0.46	0.52
	49	十二醛	26.45	—	—	0.20	0.37
	50	甜橙醛	33.44	—	—	—	0.19
		小计		4.34	0.55	0.66	1.32
酮 类 化 合 物	51	丙酮	1.93	—	4.06	12.53	4.25
	52	4,6-二甲基-2,7-壬二烯-5-酮	10.38	8.99	11.24	—	—
	53	薄荷酮	17.69	0.70	0.15	0.47	0.15
	54	2-甲基-4-(1-甲基乙基)-2-环己烯酮	19.66	0.12	—	—	—

物	55	香芹酮	21.32	0.90	—	—	—
	56	2H-1-1,3,4,5-四氢-4,7,8-三甲基-5-苯二氮卓-2-酮	27.72	—	0.36	0.21	—
	57	1-(2-羟基-5-甲基苯基)-4-甲基-2-戊烯-1-酮	29.21	—	0.11	—	—
	58	植酮	36.66	0.11	—	—	—
		小计		10.82	15.92	13.21	4.40
	59	甲氧基苯基胍	7.32	0.20	0.14	—	—
	60	N-邻苯二甲酰-N',N'-二甲基脲	8.18	0.45	—	—	—
其	61	N-(1,1-二甲基-2-丙烯基)-4-(1-甲基乙基)-苯胺	12.89	1.74	—	1.16	—
他	62	(+)-异苯胺	13.42	0.33	—	—	—
化	63	5-乙酰基-2-甲基吡啶	13.47	—	—	0.20	—
合	64	4-(3-氨基苯基)-2-甲基-4-氧代丁酸	14.82	0.26	—	—	—
物	65	5,6-二氢-4-甲基噻吩并(2,3-d)嘧啶	20.45	0.32	—	—	—
	66	5-氟基-1,2,3,4-四氢-4,6-二甲基-2-氧代吡啶	22.37	1.50	—	—	—
		小计		4.80	0.14	1.36	0.00

注：“—”表示未检出。

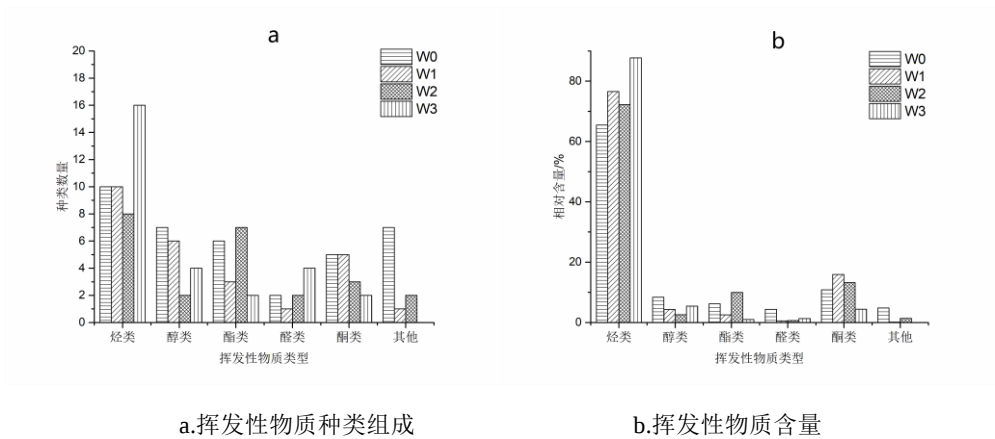


图 4 不同沃柑浓缩汁挥发性物质的比较

Fig.4 Comparison of volatile substances in different concentrated Orah mandarin juice

沃柑原汁和不同沃柑浓缩汁的挥发性成分如表 5 所示。由表 5 可知，共得到 66 种挥发性成分，W0、W1、W2、W3 中挥发性成分分别为 36、26、24、28 种，各样品中烃类化合物的相对含量占比最大分别为 65.46%、76.57%、72.22%、87.71%，其中萜烯类相对含量分别为 63.03%、71.05%、70.01%、84.67%，该结果与图 1 电子鼻响应雷达图结果一致；其次是酮类化合物，其相对含量分别为 10.82%、15.92%、13.21%、4.40%，徐丽红等^[25]报道柑橘的特征香气主要以花香型和果香型的萜烯类和酮类为主。3 种沃柑浓缩汁与原汁共有的挥发性成分仅有 8 种，主要为 D-柠檬烯、 Δ -杜松烯、(+)- β -香茅醇、癸醛、薄荷酮等，萜烯类是柑橘最为主要的香气成分^[26]，其中 D-柠檬烯具有令人愉快的新鲜薄荷和柑橘香味，是柑橘果实典型的特征香气^[27]，具有橘子皮、动物脂油味的癸醛也是沃柑汁的重要风味物质^[28]。沃柑原汁与三种浓缩汁中的 D-柠檬烯的相对含量分别为 61.98%、68.99%、68.75%、68.21%，由此可见，三种沃柑浓缩汁仍保留柑橘的特征香气。

不同沃柑浓缩汁的各类挥发性物质的种类数量及相对含量见图 4，结果显示，与沃柑原汁相比，不同真空浓缩方式均导致浓缩汁的挥发性物质种类和相对含量发生变化，W1 样品的醇类、酯类、醛类和其他物质的种类数量和相对含量均低于沃柑原汁，而酮类物质的相对含量提高了 5.10%，增加的酮类物质主要为丙酮、4,6-二甲基-2,7-壬二烯-5-酮，分析原因可能是沃柑汁低温长时间加热改变了某些酶的活性，导致香气成分转化；W2 由于浓缩温度较高，浓缩过程产生了新的酯类物质，主要为甲基丙烯酸乙酯，W2 酯类种类数量和相对含量均高于沃柑原汁，分别增加了 1 种、3.78%；与沃柑原汁相比，W3 组醇类、酯类及其他物质的种类及相对含量均减少，但其烃类物质的种类数量和相对含量分别增加了 6 种、22.25%，新产生的挥发成分主要为 β -蒎烯、 β -罗勒烯、(-)- α -萜荜澄茄油烯、(-)- α -柏木烯、反式石竹烯等，张馨文^[28]证实 β -蒎烯、 β -罗勒烯、(-)- α -萜荜澄茄油烯，均为沃柑汁的重要风

味物质。 β -蒎烯具有松木香、树脂香和松节油香， β -罗勒烯具有甜香、草本香型^[29]， α -萜澄茄油烯具有木香， α -柏木烯具有柏木、檀香香气，石竹烯具有辛香、木香、柑橘香、樟脑香及温和的丁香香气，经过真空三级梯度降温浓缩的沃柑浓缩汁产生了较多的萜烯类物质，从而赋予沃柑汁更加丰富的香气成分。

2.4 不同真空浓缩方式下浓缩沃柑汁感官品质的综合评分和聚类分析

不同沃柑浓缩汁复原后果汁的色泽、滋味和挥发性物质等感官指标的综合评分见表 6，三种沃柑复原汁的 13 项感官指标中，通过比较权重绝对值，发现甜味值、 ΔE 、YI 在品质评价中所占权重较大，分别为 0.41、0.27、0.20，说明这 3 项指标在评价沃柑浓缩汁感官品质时占有重要地位，其次是鲜味值、W1W、W2W。3 种浓缩温度下复原汁的综合评分大小排序为：W3-1>W1-1>W2-1，综合评分分别为 0.18、0.02、-0.20。本研究结果表明，采用真空三级梯度降温浓缩制备的沃柑复原汁感官品质最佳，其次是真空低温长时间浓缩制备的沃柑复原汁，真空高温短时间浓缩方式的沃柑复原汁感官品质最差，这可能是由于美拉德反应和焦糖化反应随温度的升高逐级剧烈^[15]，进而导致沃柑浓缩汁感官品质劣变。

表 6 不同沃柑浓缩汁感官品质的综合评分

Table 6 Comprehensive evaluation of sensory quality of different concentrated Orah mandarin juice

指标	平均值	标准差	变异系数	权重	标准化值			综合评分		
					W1-1	W2-1	W3-1	W1-1	W2-1	W3-1
ΔE	15.21	2.57	0.17	0.27	-0.95	1.04	-0.09	-0.25	0.27	-0.02
YI	56.24	7.34	0.13	0.20	-1.06	0.93	0.12	-0.22	0.19	0.03
酸味	6.16	0.02	0.004	0.01	0.58	-1.15	0.58	0.003	-0.01	0.003
苦味	-0.74	0.02	-0.02	-0.03	0.87	0.22	-1.09	-0.03	-0.01	0.04
涩味	1.21	0.01	0.01	0.01	-1.15	0.58	0.58	-0.02	0.01	0.01
鲜味	-0.14	0.02	-0.11	-0.18	-0.87	-0.22	1.09	0.15	0.04	-0.19
咸味	8.04	0.02	0.002	0.003	-0.22	-0.87	1.09	-0.001	-0.003	0.003
甜味	0.82	0.22	0.26	0.41	0.83	-1.11	0.28	0.34	-0.46	0.11
W1W	4.12	0.35	0.08	0.13	0.56	-1.15	0.59	0.07	-0.15	0.08
W2W	4.05	0.24	0.06	0.09	0.47	-1.15	0.68	0.04	-0.10	0.06
W5S	1.51	0.03	0.02	0.03	-0.73	-0.41	1.14	-0.02	-0.01	0.04
W2S	1.38	0.02	0.02	0.02	-1.12	0.32	0.80	-0.03	0.01	0.02
W1S	1.86	0.02	0.01	0.02	-0.32	1.12	-0.80	-0.01	0.02	-0.01
综合评分								0.02	-0.20	0.18

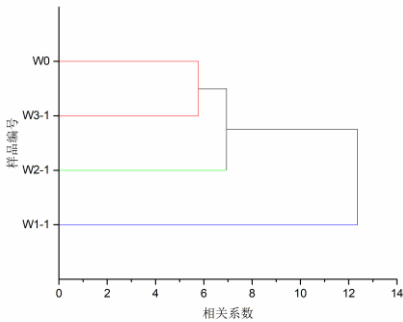


图 5 不同沃柑复原汁的感官品质聚类分析

Fig.5 Cluster analysis of sensory quality of different restored Orah mandarin juice

采用组平均法对不同真空浓缩方式下沃柑复原汁与沃柑原汁的感官品质进行系统聚类分析，聚类区间为平方欧式距离，聚类分析结果见图 5。由图可知，真空三级梯度降温浓缩组的沃柑复原汁与沃柑原汁归为一类；真空

低温长时间浓缩组的沃柑复原汁归为一类；真空高温短时间浓缩组的沃柑复原汁归为一类。由此可见，真空三级梯度降温浓缩制备的沃柑复原汁与沃柑原汁最为接近，感官品质最佳，聚类分析结果与表6的综合评分结果相一致。

3 结论

本文对不同真空浓缩方式下的沃柑浓缩汁的感官品质进行分析，研究表明：与沃柑原汁相比，3种沃柑浓缩汁的颜色加深，色泽指标均显著升高，真空三级梯度降温浓缩组的复原汁 b^* 、 ΔE 、 YI 无显著变化；3种沃柑浓缩汁复原后的果汁酸味、苦味、鲜味均未发生显著变化，涩味、咸味、甜味均显著降低，其中真空高温短时间浓缩组甜味分值最低，为0.58，与沃柑原汁甜味相比较降低了75.00%；3种浓缩汁的主要挥发性风味物质为萜烯类、硫化物、氮氧化合物、甲基类物质、醇类和醛酮类，萜烯类物质的相对含量较高，分别为63.03%、71.05%、70.01%、84.67%，柑橘果实最主要的特征香气成分D-柠檬烯在沃柑原汁与3种浓缩汁中相对含量分别为61.98%、68.99%、68.75%、68.21%，加热浓缩使浓缩汁的挥发性物质相对含量和种类均发生变化，采用真空三级梯度降温浓缩的沃柑浓缩汁烃类物质的种类数量和相对含量分别增加了6种、22.25%，赋予了沃柑汁更加丰富的香气成分。

综合评分结果显示，采用真空三级梯度降温浓缩方式制备的沃柑复原汁评分最高，其次是真空低温长时间浓缩组，最后是真空高温短时间浓缩组，同时聚类分析表明真空三级梯度降温浓缩制备的沃柑复原汁感官品质与沃柑原汁最为接近。综上所述，真空三级梯度降温浓缩能较好地保留沃柑原汁的色泽和风味品质，是制备沃柑浓缩汁较适宜的方式。

参考文献

- [1] 黄其椿,李果果,陈东奎,等.广西沃柑产业发展现状与对策建议[J].中国南方果树,2020,49(5):135-141+149.
- [2] 任二芳,李建强,黄燕婷,等.不同采收成熟度沃柑制汁品质评价与分析[J].食品工业科技,2023,44(8):61-70.
- [3] 秦贯丰,丁中祥,原姣姣,等.苹果汁冷冻浓缩与真空蒸发浓缩效果的对比[J].食品科学,2020,41(7):102-109.
- [4] ORELLANA-PALMA P, PETZOLD G, ANDANA I, et al. Retention of ascorbic acid and solid concentration via centrifugal freeze concentration of orange juice [J]. Journal of Food Quality, 2017, 4: 1-7
- [5] VISUTHIWAN S, ASSATARAKUL K. Kinetic modeling of microbial degradation and antioxidant reduction in lychee juice subjected to UV radiation and shelf life during cold storage [J]. Food Control, 2021, 123: 1077770.
- [6] 王楠.不同加热方式对三种葡萄浓缩汁品质变化的影响[D].阿拉尔:塔里木大学,2019.
- [7] DING Z X, FRANK G. F. Q, YUAN J J, et al. Concentration of apple juice with an intelligent freeze Concentrator [J]. Journal of Food Engineering, 2019, 256: 61-72.
- [8] 朱丽,李林强,鱼喆喆,等.真空结合加热、冷冻浓缩羊奶理化品质分析[J].食品与发酵工业,2022,48(15):243-248.
- [9] 何靖柳,张秋霞,刘杨,等.浓缩果汁浓缩方法的研究现状及展望[J].南方农机,2021,52(24):20-22.
- [10] 柳杰,李镜浩,徐玉娟,等.5种不同浓缩方式对荔枝汁品质的影响[J].现代食品科技 2024,40(8): 230-242.
- [11] 曹培杰,马艳弘,崔晋,等.桑葚浓缩汁的制备工艺优化及其抗氧化活性[J].江苏农业科学,2019,47(17):204-209.
- [12] 赵尔民,王学连,张民.浓缩枇杷清汁的加工工艺研究[J].农产品加工,2020,22:51-55, 59.
- [13] 尹子迎,赵江丽,刘金龙,等.温度对真空浓缩梨汁品质的影响及其品质评价模型构建[J].食品工业科技,2024,45(6):234-241.
- [14] 任二芳,罗朝丹,黄燕婷,等.不同品种芒果果脯和果干的品质比较分析[J].现代食品科技,2022,38(7):282-290+183.
- [15] 乔小全,任广跃,乔梦,等.干燥方式对黑枣粉品质特性的影响[J].食品与机械,2018,34(8):189-194+220.
- [16] 苏俊,黄兴龙,陈霞,等.3个红色砂梨新品种的果实氨基酸组分与含量分析[J].果树学报,2018,35(S1):114-117.
- [17] ALQUÉZAR B, RODRIGO M J, ZACAR ÍAS L. Carotenoid biosynthesis and their regulation in citrus fruits [J]. Tree For. Sci. Biotechnol, 2008, 2(1): 23-35.
- [18] FU X, KONG W, PENG G, et al. Plastid structure and carotenogenic gene expression in red-and white-fleshed loquat (*Eriobotrya japonica*) fruits [J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63(1): 341-354.
- [19] 董捷,张红城,李春阳.电子鼻对不同地域的蜂胶气味测定的初步研究[J].食品科学,2008,29(10):468-470.
- [20] ZHANG Y, GAO B, ZHANG M W, et al. Headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry analysis of the volatile components of longan(*Dimocarpus longan* Lour.) [J]. European Food Research and Technology, 2009, 229(3): 457-465.

- [21] LIU Q, ZHAO N, ZHOU D, et al. Discrimination and growth tracking of fungi contamination in peaches using electronic nose [J]. Food Chemistry, 2018, 262: 226-234.
- [22] 张子希,苗俨龙,萧奕童,等.不同浓缩工艺对龙眼浓缩汁的色泽及挥发性成分的影响[J].食品与发酵工业,2022,48(6):84-89.
- [23] 蓬桂华,李文馨,殷勇,等.电子鼻和电子舌在分析桑果汁风味上的应用[J].食品工业科技,2020,41(12):240-243+250.
- [24] 石国英,高思宇,韦静静,等.基于电子鼻的桑葚采后品质预测[J].食品与发酵工业,2016,42(3):193-197.
- [25] 徐丽红,赖金平,郭家乾,等.柑橘果实香气品质影响因素研究进展[J].赣南师范大学学报,2019,40(6):85-88.
- [26] OBENLAND D, COLLIN S, MACKEY B, et al. Determinants of flavor acceptability during the maturation of navel oranges [J]. Postharvest Biology and Technology, 2009, 52(2): 156-163.
- [27] 孙莹,陈世珍,朱丽琴,等.不同成熟度赣南“纽荷尔”脐橙香气成分和主要品质指标分析[J].江西农业大学学报,2015,37(3):429-434.
- [28] 张馨文.超高压处理对沃柑汁品质的影响[D].南宁:广西大学,2023.
- [29] 胡梓妍,刘伟,何双,等.基于 HS-SPME-GC-MS 法分析 3 种金橘的香气挥发性成分[J].食品科学,2021,42(16):176-184.