

干燥方式对龙眼果肉干燥动力学 及挥发性成分的影响

李瑞丽¹, 王硕赢¹, 付 祺², 任瑞冰², 李河霖^{2*}, 张峻松^{1*}

(1. 郑州轻工业大学 烟草科学与工程学院, 河南 郑州 450000; 2. 吉林烟草工业有限责任公司, 吉林 延边 133000)

摘要: 探究了热风干燥 (HAD)、微波真空干燥 (MVD)、真空冷冻干燥 (VFD) 3 种干燥方式对云南产新鲜龙眼果肉干燥特性及挥发性成分的影响。利用经典薄层干燥数学模型拟合 3 种方式干燥处理龙眼果肉过程, 通过顶空固相微萃取-气相色谱-质谱 (HS-SPME-GC-MS) 结合电子鼻传感器检测分析了 3 种干燥方式处理后的龙眼果肉挥发性成分, 使用聚类分析、偏最小二乘法分析了样品间挥发性成分差异及特征性挥发成分。结果表明, 3 种干燥方式的干燥速率由大到小为 MVD>HAD>VFD; Weibull distribution 模型为预测龙眼果肉 3 种干燥方式干燥特性最适合的数学模型; HAD、MVD 对龙眼果肉色泽影响显著 ($P<0.05$), VFD 能更好地保持新鲜龙眼原始色泽和挥发性物质; 干燥前后共检出 9 类 89 种挥发性成分, 从新鲜龙眼和 HAD、MVD、VFD 处理所得龙眼果肉中分别检测到 59 和 47、52、52 种挥发性成分; 9 类挥发性成分为醇类、烯烃类、酯类、醛类、酮类、烷烃类、芳香烃类、杂环类和酚类化合物, 其中烯烃类和酯类化合物相对含量最高; 26 种特征性挥发成分对区分 4 种样品起重要作用。

关键词: 龙眼; 干燥方式; 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用; 电子鼻; 挥发性成分; 香料

中图分类号: TS255.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-5214 (2025) 05-1081-11

Effect of drying methods on kinetics and volatile components of longan pulp

LI Ruili¹, WANG Shuoying¹, FU Qi², REN Ruibing², LI Helin^{2*}, ZHANG Junsong^{1*}

(1. School of Tobacco Science and Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450000, Henan, China; 2. Jilin Tobacco Industry Co., Ltd., Yanbian 133000, Jilin, China)

Abstract: The effects of hot air drying (HAD), microwave vacuum drying (MVD) and vacuum freeze-drying (VFD) on drying characteristics and volatile components of fresh longan pulp produced in Yunnan were evaluated, with the drying process of longan pulp through three methods was simulated by classical thin-layer drying mathematical models, and the volatile components were detected and analyzed by headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) combined with electronic nose sensor. The differences in volatile components between samples and the characteristic volatile component were clarified by cluster analysis and partial least squares discriminant analysis. The results showed that the drying rates of the three drying methods were MVD>HAD>VFD. Weibull distribution model was found to be the most suitable mathematical model for predicting the drying characteristics of three drying methods. HAD and MVD showed significant impact on the color of longan pulp ($P<0.05$), while VFD could better maintain the original color. A total of 89 volatile components in nine

收稿日期: 2024-04-23; 定用日期: 2024-05-13; DOI: 10.13550/j.jxhg.20240336

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (81903507); 河南省科技攻关项目 (182102310647); 吉林烟草工业有限责任公司科技项目 (KJXM-2024-07)

作者简介: 李瑞丽 (1978—) 女, 副教授, E-mail: lily03091@126.com。联系人: 李河霖 (1988—) 男, 高级工程师, E-mail: lihelin@jilintobacco.com.cn; 张峻松 (1971—) 男, 教授, E-mail: 13283712413@163.com。

categories were detected before and after drying, and 59, 47, 52 and 52 volatile components were detected in fresh longan pulp and longan pulp treated with HAD, MVD and VFD, respectively. The nine categories of volatile components were alcohols, olefins, esters, aldehydes, ketones, alkanes, aromatic hydrocarbons, heterocyclic and phenols, among which olefins and esters displayed the highest relative contents. Twenty-six characteristic volatile components played an important role in distinguishing the four samples.

Key words: longan; drying methods; headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry; electronic nose; volatile components; perfumes

龙眼 (*Dimocarpus longan* Lour.), 俗称桂圆, 其果肉富含多酚、多糖、V_C、氨基酸等营养成分^[1-5], 具有抗氧化、免疫调节等功效^[6-7]。然而, 采摘后的鲜果代谢旺盛, 不利于龙眼的长时间储存和运输, 因此, 干燥仍是对龙眼最主要的加工方式之一^[8]。

目前, 果蔬加工常见的干燥方式有热风干燥、微波干燥、真空干燥等, 不同干燥方式对果蔬品质的影响各有优劣。热风干燥 (HAD) 是热量通过介质直接传递给物料, 从而达到干燥目的^[9]; 微波真空干燥 (MVD) 通过减压条件下的微波加热, 可显著提升干燥效率^[10]; 真空冷冻干燥 (VFD) 在低温低压下进行干燥, 可最大限度保证物料品质^[11], 不同干燥方式对龙眼果肉品质影响显著。谭颀等^[12]研究发现, 冷冻干燥能减少龙眼果肉酚类成分及其抗氧化活性的损失; 彭健等^[13]研究表明, 分段式远红外-热泵干燥可减少褐变, 使龙眼具有更好的感官品质和营养价值; 王宸之等^[14]研究发现, 微波干燥的效率显著高于热风干燥, 可降低果肉褐变程度和多酚氧化酶活性; CHUNTHAWORN 等^[15]研究表明, 不同干燥温度、时间对龙眼果肉色泽有显著影响。

近年来, 关于干燥方式对产品挥发性成分影响的研究已深入开展。马尧等^[16]利用气相色谱-质谱 (GC-MS) 结合电子鼻分析了干燥方式对黄花菜粉挥发性物质的影响; 叶秋萍等^[17]采用 GC-MS 结合电子鼻分析了干燥方式对茉莉花茶挥发性成分的影响; ZHANG 等^[18]利用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱 (HS-SPME-GC-MS) 分析了干燥方式对铁棍山药挥发性物质的影响。但干燥方式对龙眼果肉挥发性成分的影响及其干燥动力学的研究鲜见报道。

本文拟采用 HAD、MVD、VFD 3 种干燥方式对龙眼果肉进行处理, 对比分析其干燥特性, 并利用经典薄层干燥数学模型对 3 种方式干燥龙眼果肉过程进行模拟, 通过 HS-SPME-GC-MS 结合电子鼻技术对 3 种干燥方式处理后的龙眼果肉挥发性成分进行测定分析, 使用聚类分析及偏最小二乘法判别、分析、明确样品间挥发性成分差异及特征性挥发成分, 以期对龙眼果肉的机械化干燥加工提供理论依据和实用指导。

1 实验部分

1.1 材料、试剂与仪器

新鲜龙眼, 产地云南, 西双版纳顺恒进出口有限责任公司; C₇~C₄₀ 正构烷烃, 色谱纯, 上海源叶生物科技有限公司。

7890B-5977B GC-MS 联用仪、50/30 μm 型手动 SPME 萃取头 (DVB/CAR/PDMS), 美国 Agilent 公司; PEN3.5 型便携式电子鼻传感器, 德国 Airsense 公司; FD-1-50 型真空冷冻干燥机, 北京博医康实验仪器有限公司; RWBA-08S 型微波真空干燥箱, 南京苏恩瑞干燥设备有限公司; ADCI 型全自动测色色差计, 北京辰泰克仪器技术有限公司。

1.2 龙眼干的制备

选取平均直径为 (2.3±0.2) cm 的新鲜龙眼, 去皮去核后分别进行 HAD、MVD、VFD 处理。样品干至水分含量<15%后停止干燥。

HAD: 设置鼓风干燥箱温度 70 °C、风速 2.0 m/s、干燥时间 10 h。

MVD: 微波温度 60 °C、功率 70 W、真空度 -0.1 MPa, 干燥时间 6 h。

VFD: 真空冷冻干燥前将龙眼果肉放置在 -20 °C 下预冻 12 h, 设置冷阱温度 -50 °C、真空度 0.1 MPa、干燥时间 50 h。

1.3 分析测定

1.3.1 水分含量测定

参照 GB/T 5009.3—2016, 采用直接干燥法测定。

1.3.2 色泽测定

用全自动测色色差计测定样品的 L^* (明度/黑暗)、 a^* (红色/绿色)、 b^* (黄色/蓝色) 值。根据式 (1) 计算综合色差指标 (ΔE)。每个样品重复 3 次。

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

式中: ΔE 为综合色差指标; L^* 、 a^* 、 b^* 分别为龙眼干的色彩参数测定值; L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* 分别为新鲜龙眼的色彩参数测定值。

1.4 干燥动力学分析与数学模型建立

1.4.1 干燥参数计算

采用式 (2) 计算干基含水率:

$$h/\% = (m_t - m_d)/m \times 100 \quad (2)$$

式中: h 为样品干基含水率, %; m_t 为物料和称量皿在干燥 t 时的总质量, g; m_d 为样品干燥至恒重时物料和称量皿的总质量, g; m 为样品的干基质量, g。

根据式 (3) 计算水分比:

$$MR = h_t/h_0 \quad (3)$$

式中: MR 为水分比; h_0 为初始干基含水率, %; h_t 为在干燥 t 时的干基含水率/%。

根据式 (4) 计算干燥速率:

$$r_d = (h_t - h_{t+\Delta t})/\Delta t \quad (4)$$

式中: r_d 为样品干燥速率, g/(g·h); h_t 、 $h_{t+\Delta t}$ 分别为样品在干燥 t 、 $t+\Delta t$ 时的干基含水率, %; Δt 为干燥间隔时间, h。

1.4.2 干燥数学模型建立

选用 9 种薄层干燥数学模型, 采用非线性回归法对不同干燥方式下的实验数据进行拟合, 通过决定系数 (R^2)、卡方 (χ^2)、均方根误差 (RMSE) 评判模型的拟合精度^[19-20]。所选模型如表 1 所示^[21]。

表 1 常用的薄层干燥数学模型
Table 1 Common thin-layer drying models

序号	模型名称	数学表达式
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$
3	Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$
4	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
5	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$
6	Two-term model	$MR = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$
7	Wang and Singh	$MR = 1 + at + bt^2$
8	Midilli <i>et al.</i>	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
9	Weibull distribution	$MR = a - b \exp(-gt^n)$

注: t 为干燥时间, h; k 、 k_0 、 k_1 为干燥速率常数, g/(g·h); a 、 b 、 c 、 g 、 n 均为拟合出的系数, 下同。

1.5 电子鼻传感器检测

将不同干燥方式制得的龙眼果肉剪成大小约为 2.00 mm×2.00 mm 的小块, 称取剪碎后的龙眼样品 1.0 g 置于 40 mL 顶空瓶中并密封, 40 °C 水浴 20 min 后静置 30 min, 利用装有 10 个便携式电子鼻传感器装置进行检测, 电子鼻设置的参数为: 清洗时间 120 s, 归零时间 5 s, 样品准备时间 5 s, 测试时间 100 s。气体流量 400 mL/min, 每个样品平行测定 3 次。10 种电子鼻传感器的敏感物质见表 2^[22]。

1.6 分析条件

1.6.1 HS-SPME 条件

参照文献[23]方法并稍作修改。将萃取头在 GC 进样口于 250 °C 老化 10 min。取 2.00 g 剪碎后的龙眼样品置于 40 mL 顶空瓶中, 加盖密封, 在持续加热 (40 °C) 和搅拌 (200 r/min) 条件下水浴 30 min, 将老化后的萃取头插入吸附 30 min, 立即取出萃取

头并插入 GC 进样口, 于 250 °C 下解吸 5 min。

表 2 PEN3.5 型电子鼻传感器敏感物质
Table 2 Performance description of PEN3.5 electronic nose sensors

序号	传感器名称	敏感物质
1	W1C	芳香化合物
2	W5S	氮氧化合物
3	W3C	芳香胺类成分
4	W6S	氢气 (氢化物)
5	W5C	烯烃和芳香族化合物
6	W1S	烷烃类化合物
7	W1W	萜类化合物和硫化物
8	W2S	醇类、部分芳香族化合物
9	W2W	芳香族化合物和有机硫化物
10	W3S	烯烃类化合物

1.6.2 GC-MS 条件

参照文献[24]方法对挥发性化合物进行测定。

GC 条件: HP-5MS 石英毛细管柱 (30 m×0.25 mm×0.25 μm), 进样口温度 250 °C, 传输线温度 250 °C。升温程序: 初始温度 40 °C, 保持 3 min, 以 5 °C/min 升至 120 °C, 然后以 8 °C/min 升至 200 °C, 保持 5 min。载气 (He) 流速 1.0 mL/min。采用不分流模式进样。

MS 条件: 电子电离源, 电子能量 70 eV, 离子源温度 230 °C, 四极杆温度 150 °C, 采集为全扫描模式, 扫描范围 $m/Z=35\sim550$ 。

1.7 数据处理

龙眼果肉干燥实验和指标测定均至少平行 3 次, 数据采用“算术平均值±标准差”表示, 结果讨论时以平均值表示。

HS-SPME-GC-MS 数据基于 NIST17 的数据库进行比对, 仅保留匹配度>85%的物质, 并结合保留指数 (RI) 验证 (计算值与文献值差值<20)。挥发性物质的定量采用 GC 峰面积归一化法计算, 结果以相对含量 (%) 表示。

使用 SPSS 27 软件进行数据差异显著性分析。使用 WinMuster 软件对电子鼻数据进行分析。使用 SIMCA 14.1 软件对 GC-MS 数据进行 PLS-DA 分析。使用 Origin 2021 软件进行绘图及干燥模型拟合。使用免费平台 ChiPlot (<https://www.chiplot.online>) 绘制挥发性成分聚类分析热图。

2 结果与讨论

2.1 龙眼果肉干燥特性及干燥动力学分析

2.1.1 龙眼果肉干燥特性

图 1 为 3 种干燥方式新鲜龙眼果肉的水分比、干燥速率随干燥时间的变化曲线。

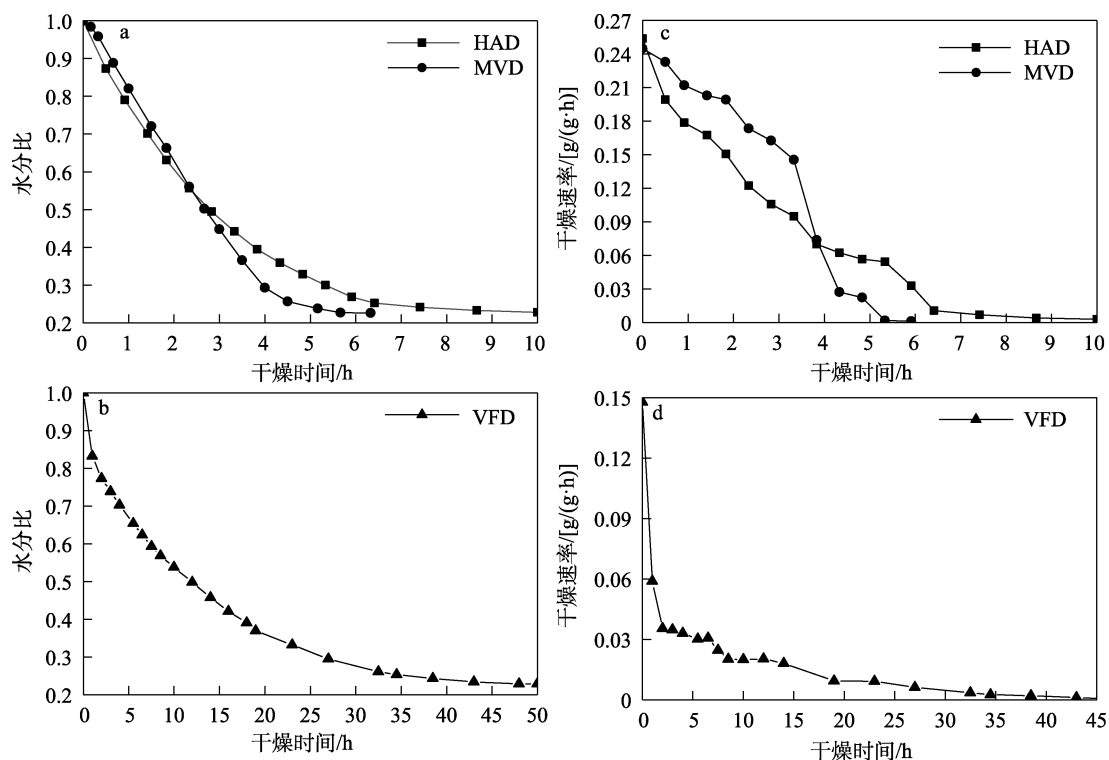


图1 水分比 (a、b)、干燥速率 (c、d) 随干燥时间的变化
Fig. 1 Moisture ratio (a, b) and drying rate (c, d) change with drying time

从图1可以看出,随着干燥时间的增加,水分比、干燥速率均呈直线下降后趋于平稳。干燥至目标水分比 ($MR < 0.23$) 时, HAD、MVD 及 VFD 所用时间分别为 10、6 和 50 h (图 1a、b), 3 种干燥方式中, MVD 的干燥效率最高, 其次为 HAD 和 VFD。干燥前期, 3 种干燥方式的速率均较快 (图 1c、d), 其原因可能是, 此阶段散失的水分主要来自物料表层, 新鲜龙眼含水率高, 表层水分多, 与空气接触面积大, 从而导致干燥速率快; 随着干燥的进行, 水分比、干燥速率逐渐减小, 龙眼果肉中的多糖、蛋白质等大分

子物质因前期表层细胞失水形成渗透压, 阻碍水分向表层扩散, 内部水分向外扩散的阻力增大导致中期干燥速率减小^[22]; 干燥后期, 龙眼果实内部自由水大部分散失, 物料内部的水分扩散占主导地位, HAD、MVD 由于温度高, 前期样品表面水分散失较快, 内部水分无法及时扩散至表面, 干燥速率明显减小^[25], 龙眼果肉发生皱缩, 样品出现硬壳现象。

2.1.2 龙眼果肉干燥数学模型的构建

表3为采用表1的9种干燥模型对图1数据进行拟合的结果。

表3 不同薄层干燥数学模型的拟合结果
Table 3 Fitting results of different thin-layer drying models

模型名称	数学表达式	干燥方式	R^2	χ^2	RMSE
Lewis	$MR = \exp(-kt)$	HAD	0.9301	0.0042	0.0627
		MVD	0.9596	0.0036	0.0582
		VFD	0.8340	0.0082	0.0888
Page	$MR = \exp(-kt^n)$	HAD	0.9726	0.0017	0.0393
		MVD	0.9603	0.0037	0.0577
		VFD	0.9946	0.0003	0.0161
Modified Page	$MR = \exp(-kt)^n$	HAD	0.9301	0.0044	0.0627
		MVD	0.9596	0.0038	0.0582
		VFD	0.8340	0.0086	0.0888
Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	HAD	0.9419	0.0037	0.0572
		MVD	0.9607	0.0037	0.0574
		VFD	0.9384	0.0032	0.0541
Logarithmic	$MR = a \exp(-kt) + c$	HAD	0.9972	0.0002	0.0125
		MVD	0.9810	0.0019	0.0399
		VFD	0.9893	0.0006	0.0226

续表 3

模型名称	数学表达式	干燥方式	R^2	χ^2	RMSE
Two-term model	$MR=a\exp(-k_0t)+b\exp(-k_1t)$	HAD	0.9994	0.0000	0.0060
		MVD	0.9896	0.0011	0.0296
		VFD	0.9904	0.0006	0.0214
Wang and Singh	$MR=1+at+bt^2$	HAD	0.9706	0.0019	0.0407
		MVD	0.9894	0.0010	0.0298
		VFD	0.8682	0.0069	0.0791
Midilli <i>et al.</i>	$MR=a\exp(-kt^n)+bt$	HAD	0.0342	0.0688	0.0415
		MVD	0.9983	0.0002	0.0119
		VFD	0.0625	0.0539	0.0325
Weibull distribution	$MR=a-b\exp(-gt^n)$	HAD	0.9990	0.0001	0.0076
		MVD	0.9979	0.0002	0.0131
		VFD	0.9962	0.0002	0.0134

在拟合方程的数据中, R^2 越接近 1, χ^2 、RMSE 越接近 0, 表明曲线拟合程度越好^[26]。从表 3 可以看出, 9 种模型中, Weibull distribution 模型拟合的综合效果最好 ($R^2=0.9962\sim0.9990$, $\chi^2=0.0001\sim0.0002$, RMSE=0.0076~0.0134), 其次为 Two-term model 和 Page 模型, Midilli *et al.* 拟合效果最差。因此, 确定 Weibull distribution 模型为表征和预测龙眼果肉干燥特性的最优模型。

2.1.3 模型验证

图 2 为 MVD、HAD、VFD 的 MR 实验值与预测值比较结果。

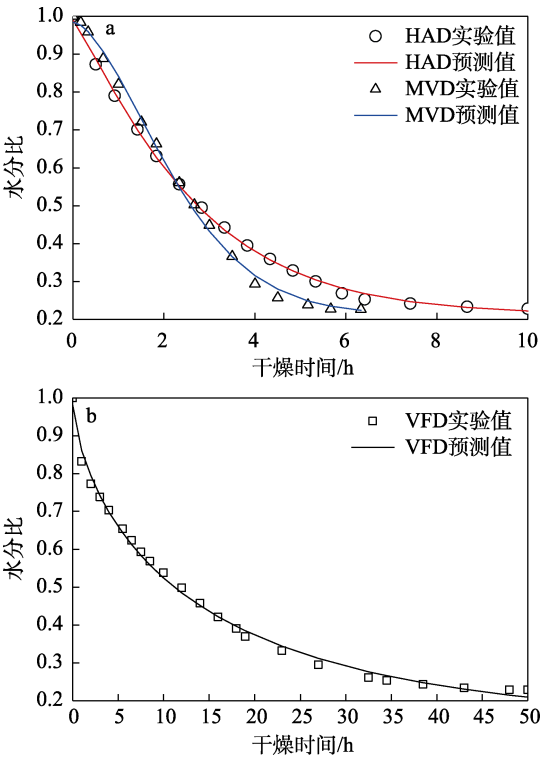


图 2 3 种干燥方式水分比 Weibull distribution 模型预测值和实验值

Fig. 2 Predicted and experimental values of moisture ratio of three drying methods

从图 2 可以看出, 3 种干燥方式龙眼果肉的水分比随干燥时间变化的实际测定值均与 Weibull distribution 曲线预测值接近, 说明 Weibull distribution 模型拟合度高, 具备准确性和可靠性, 可以准确反映龙眼果肉水分比随干燥时间的变化规律。

2.2 干燥方式对龙眼果肉色泽的影响

色泽是评价干制食品的重要指标之一^[27]。表 4 为不同干燥方式处理所得龙眼果肉色泽参数数据。

表 4 不同干燥方式对龙眼果肉色泽的影响
Table 4 Effect of different drying methods on color of longan pulp

样品	L^*	a^*	b^*	ΔE
新鲜	59.58±0.79 ^b	0.78±0.20 ^a	9.98±1.12 ^a	0.00±0.00 ^a
HAD	51.43±0.57 ^a	12.77±1.01 ^c	29.43±0.59 ^c	24.30±0.39 ^c
MVD	51.77±1.04 ^a	22.60±0.59 ^d	29.91±0.86 ^c	30.60±1.40 ^d
VFD	69.30±0.55 ^c	10.66±1.30 ^b	23.00±1.22 ^b	19.12±1.46 ^b

注: 同一列数据上标不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

从表 4 可以看出, 不同干燥方式处理所得龙眼果肉的色泽与干燥前数据间具有显著差异 ($P<0.05$)。干燥后的龙眼果肉 a^* 、 b^* 均增大, 说明干燥后龙眼果肉的红色、黄色程度显著增大, 这与陈雪等^[28]报道的海棠果果片干燥后的色泽变化一致; HAD、MVD 处理所得龙眼的 L^* 与新鲜龙眼相比均减小, 原因可能是, 龙眼果肉含有的多种氨基酸、还原糖、多酚等物质在高温下发生棕色化反应, 使样品褐变, 导致样品亮度降低, L^* 减小; VFD 处理所得龙眼的 L^* 相比新鲜龙眼果肉高, 其原因可能是, 真空条件下的样品无法接触氧气, 且低温钝化了龙眼果肉中酶的活性, 这都能够有效抑制褐变反应的发生, 同时, 由于 VFD 样品预冷冻形成了稳定的骨架结构, 干燥过程中水分散失速率慢 (图 1), 导致样品呈现海绵状组织空隙, 从而提高了亮度^[29]。3 种干燥方式中 VFD 的色差值 (ΔE) 最小, 说明 VFD 处理所得龙眼的色泽保留最好, 与新鲜龙眼果实色

泽更为接近。

2.3 电子鼻传感器检测结果分析

2.3.1 挥发性成分分析

图 3 为龙眼果肉挥发性成分电子鼻检测响应值雷达指纹图。

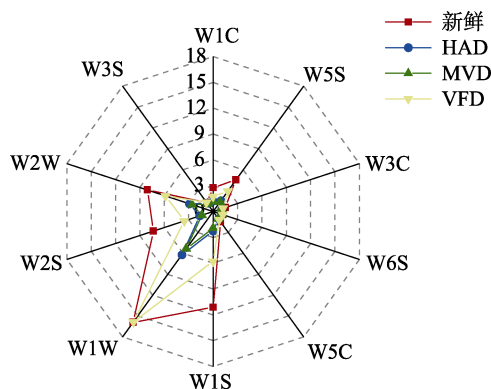


图 3 电子鼻传感器对龙眼果肉挥发性成分响应雷达图
Fig. 3 Radar chart of electronic nose sensor responses to longan pulp

从图 3 可以看出，不同干燥方式处理所得龙眼果肉与新鲜龙眼果肉在不同传感器上的气味相应强度不同，其中 W2W（对芳香族化合物和有机硫化物敏感）、W2S（对醇类、部分芳香族化合物敏感）、W1W（对萜类化合物和硫化物）、W1S（对烷烃类化合物敏感）、W5S（对氮氧化合物敏感）5 个传感器对龙眼果肉整体气味响应较强。新鲜龙眼样品的响应值在各维度上均高于干燥后的样品，说明干燥会造成龙眼挥发性成分的损失。VFD 处理所得龙眼与新鲜龙眼在 W2S 和 W1S 传感器上的响应强度差异大，在其他 8 个传感器上的响应强度差异小，说明 VFD 在干燥过程中会造成醇类、芳香类及烷烃类化合物的损失，但相比 HAD、MVD，VFD 可较好地保留新鲜龙眼的挥发性成分；HAD、MVD 处理所得龙眼与新鲜龙眼在各传感器上的响应强度均有显著差异 ($P < 0.05$)，说明高温及微波会导致龙眼果肉主要风味物质的损失。

2.3.2 PCA 及载荷结果分析

图 4 为龙眼果肉挥发性成分电子鼻传感器检测 97~99 s 的响应值的 PCA 图和 Loadings 图。

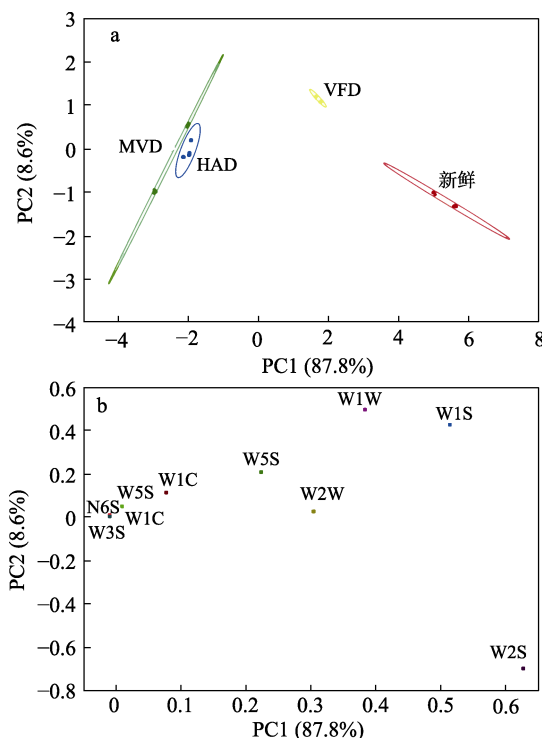


图 4 龙眼果肉电子鼻 PCA 图 (a) 和 Loadings 图 (b)
Fig. 4 Electronic nose PCA (a) and Loadings (b) diagrams of longan pulp

从图 4a 可以看出，第一主成分的贡献率 (PC1) 为 87.8%，第二主成分的贡献率 (PC2) 为 8.6%，两者累计贡献率达 96.4%，表明两个主成分能够有效代表干燥前后的龙眼果肉的气味信息特征。结果表明，4 种样品之间没有相互重叠部分，说明 4 种样品的挥发性气味存在差异，其中，新鲜样品与 MVD、HAD 距离较远，说明它们具有显著不同的风味。

从图 4b 可以看出，对第一主成分贡献最大的传感器为 W2S，对第二主成分贡献最大的传感器为 W1W，其中，W1S 对二者的贡献率均较大，说明 4 种样品中萜类、硫化物、芳香类化合物、醇类、烷烃类化合物含量可能存在显著差异。

2.4 干燥方式对龙眼果肉挥发性成分的影响

2.4.1 检测结果

表 5 和表 6 为采用 HS-SPME-GC-MS 法从干燥前后的龙眼果肉中共检测出的 89 种、9 类挥发性成分。

表 5 龙眼果肉 89 种挥发性成分 HS-SPME-GC-MS 分析结果
Table 5 Analysis results of HS-SPME-GC-MS for 89 volatile components in longan pulp

编号	名称	RI 值		相对含量%				香气描述
		实验值	文献值	新鲜	HAD	MVD	VFD	
1	环丁醇	712.2	713	—	0.23±0.02 ^a	0.25±0.07 ^b	—	未描述
2	异戊醇	739.2	739	0.37±0.16 ^a	0.35±0.09 ^a	1.00±0.14 ^b	0.35±0.08 ^a	甜香、香蕉香
3	2,3-丁二醇	786.0	788	—	2.82±0.25 ^b	4.03±0.10 ^d	3.48±0.25 ^c	果香、奶油香

续表 5

编号	名称	RI 值		相对含量%				香气描述
		实验值	文献值	新鲜	HAD	MVD	VFD	
4	正己醇	860.6	867	2.03±0.14	—	—	—	花香、果香
5	2-乙基己醇	1026.6	1029	2.27±0.19	—	—	—	淡青的嫩枝叶香、果香
6	1-辛醇	1068.5	1069	—	1.05±0.19 ^b	—	0.62±0.09 ^a	茉莉香、柠檬香、橙子香
7	芳樟醇	1101.2	1103	1.60±0.21	—	—	—	花香、木质香
8	苯乙醇	1118.6	1116	0.62±0.03 ^a	0.97±0.15 ^a	0.85±0.14 ^a	2.10±0.33 ^b	花香、丁香
9	薄荷脑	1182.3	1186	—	1.43±0.14 ^a	4.88±1.28 ^c	3.15±0.34 ^b	清凉薄荷香
10	4-萜烯醇	1189.1	1180	0.28±0.03	—	—	—	胡椒木质混合香
11	α -毕澄茄醇	1456.1	1443	0.52±0.07	—	—	—	药草香
12	雪松醇	1651.3	1653	—	—	—	0.36±0.08	未描述
13	5-(1-甲基戊亚基)-1,3-环戊二烯	884.7	867	—	—	0.33±0.10	—	未描述
14	反式- β -罗勒烯	1048.4	1048	3.32±0.46 ^a	4.60±0.83 ^a	6.34±0.48 ^b	6.02±0.46 ^b	甜草香
15	4-亚甲基-1-异丙基双环[3.1.0]己-2-烯	1124.3	/	—	—	0.32±0.09 ^b	0.23±0.05 ^a	未描述
16	2,4-二甲基苯乙烯	1095.6	1090	4.83±0.50 ^a	9.19±0.92 ^b	4.74±1.00 ^a	4.40±0.91 ^a	未描述
17	3-萜烯	1034.0	1016	—	—	1.08±0.14 ^b	0.30±0.07 ^a	松木香、甜香香
18	β -罗勒烯	1044.0	1043	10.34±3.77 ^a	10.38±1.60 ^a	10.86±1.24 ^a	11.51±2.10 ^a	柑橘、绿色、木质香
19	D-柠檬烯	1044.7	1037	0.52±0.03 ^a	3.19±0.76 ^b	1.18±0.08 ^a	1.07±0.23 ^a	柑橘特征香
20	别罗勒烯	1134.7	1130	6.17±0.81 ^a	7.43±0.45 ^a	6.85±1.41 ^a	5.95±0.65 ^a	未描述
21	正癸烯	1001.6	989	—	—	3.06±0.55	—	未描述
22	对薄荷-1,3,8-三烯	1187.7	/	5.56±1.00 ^a	5.87±0.41 ^a	4.88±0.24 ^a	—	未描述
23	3,4-二甲基-2,4,6-辛三烯	1122.1	1121	—	—	—	4.62±0.94	未描述
24	(-)- α -萆澄茄油烯	1356.7	1351	0.49±0.05	—	—	—	草本香
25	2,6-二甲基-1,3,5,7-辛四烯	1137.1	1131	1.84±0.14 ^b	—	1.09±0.05 ^a	1.87±0.36 ^b	未描述
26	α -柏木烯	1404.9	1409	—	1.24±0.23	—	—	木质香
27	α -蒎烯	978.8	975	0.79±0.08 ^a	0.55±0.10 ^a	—	0.68±0.18 ^a	松节油气息
28	异松油烯	1069.9	1089	2.81±0.48 ^b	1.29±0.24 ^a	4.24±0.90 ^c	1.24±0.13 ^a	清香、花香、木香
29	β -榄香烯	1421.1	1435	0.99±0.10	—	—	—	清新草香
30	巴伦西亚橘烯	1504.9	1497	1.25±0.33	—	—	—	柑橘果香
31	β -马榄烯	1416.1	1413	1.60±0.14	—	—	—	未描述
32	α -石竹烯	1472.7	1456	4.91±0.97 ^b	2.13±0.56 ^a	—	1.38±0.05 ^a	木质气香
33	α -法呢烯	1514.2	1508	0.71±0.16	—	—	—	柑橘、青草香
34	(+)-香橙烯	1540.5	1441	0.58±0.07	—	—	—	柑橘果香
35	α -愈创木烯	1435.8	1437	1.67±0.10	—	—	—	甜、干愈创木香
36	香树烯	1458.5	1461	0.50±0.05	—	—	—	木质气香
37	反式-菖蒲烯	1563.7	1564	2.29±0.24 ^c	1.30±0.42 ^b	0.65±0.10 ^a	1.56±0.35 ^b	香草香
38	乙酸乙酯	/	604	6.08±1.04	—	—	—	甜香、果香
39	丁酸乙酯	796.7	804	3.27±0.13 ^b	—	0.82±0.10 ^a	0.76±0.16 ^a	菠萝、果香
40	异戊酸乙酯	856.4	854	3.58±0.38	—	—	—	果香、甜、水果香
41	3-羟基丁酸甲酯	857.1	859	—	2.70±0.33 ^a	4.66±0.62 ^b	2.81±0.56 ^a	未描述
42	顺-2-丁烯酸乙酯	830.3	830	2.27±0.08	—	—	—	未描述
43	2-甲基丁酸乙酯	851.4	849	3.42±0.27	—	—	—	青苹果香
44	戊酸乙酯	887.2	884	0.82±0.05	—	—	—	苹果、菠萝香
45	己酸甲酯	919.8	934	2.27±0.14	—	—	—	果香、菠萝香
46	3-羟基丁酸乙酯	926.3	935	—	5.06±0.98 ^a	6.59±1.26 ^a	5.85±1.01 ^a	果香
47	(E)-2-甲基-2-丁酸乙酯	933.8	939	0.37±0.06	—	—	—	甜果香、花香、焦糖香
48	正己酸乙酯	999.0	1003	2.76±0.35 ^b	2.66±0.49 ^b	0.95±0.27 ^a	3.92±0.82 ^c	甜香、果香

续表 5

编号	名称	RI 值		相对含量%				香气描述
		实验值	文献值	新鲜	HAD	MVD	VFD	
49	2-己烯酸乙酯	1043.5	1037	1.06±0.20	—	—	—	未描述
50	辛酸乙酯	1177.8	1195	1.68±0.14 ^a	0.90±0.27 ^a	1.23±0.05 ^b	1.51±0.14 ^{bc}	甜的香蕉香
51	苯甲酸乙酯	1182.0	1171	0.76±0.07 ^b	—	0.56±0.07 ^a	0.58±0.13 ^a	药草香
52	水杨酸甲酯	1206.2	1195	1.04±0.08 ^a	1.44±0.13 ^b	0.97±0.19 ^a	2.10±0.09 ^c	草药香、薄荷香
53	壬酸乙酯	1300.5	1296	0.32±0.03 ^a	1.42±0.16 ^b	2.05±0.47 ^b	3.25±0.76 ^c	水果香、青草
54	香叶酸甲酯	1323.7	1323	0.43±0.04	—	—	—	果香气香
55	苯甲酸丁酯	1375.1	1376	—	—	1.25±0.19	—	琥珀香、果香
56	3-羟基-2,2,4-三甲基戊基异丁酸酯	1380.9	1380	—	0.81±0.02 ^b	0.43±0.09 ^a	0.46±0.14 ^a	未描述
57	癸酸乙酯	1396.4	1396	0.63±0.04 ^a	1.18±0.22 ^{bc}	0.80±0.11 ^{ab}	1.30±0.32 ^c	葡萄香
58	苯甲酸丙酯	1524.3	/	—	—	—	0.54±0.05	香脂坚果香
59	4-叔丁基苯甲酸乙酯	1529.8	/	—	—	—	0.63±0.13	未描述
60	2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯	1588.0	1588	0.51±0.06	—	—	—	未描述
61	月桂酸乙酯	1597.2	1595	0.53±0.06 ^a	0.82±0.12 ^b	0.84±0.06 ^b	1.91±0.15 ^c	树叶、青涩果实香
62	苯甲醛	970.4	965	—	1.28±0.15 ^a	—	1.82±0.40 ^b	杏仁、樱桃香
63	壬醛	1103.9	1106	0.33±0.03 ^a	1.83±0.29 ^b	3.76±0.75 ^c	3.25±0.28 ^c	柠檬、油脂香
64	癸醛	1212.6	1206	0.67±0.06 ^a	1.09±0.24 ^{bc}	0.88±0.19 ^{ab}	1.31±0.10 ^c	花香、柑橘香
65	肉桂醛	1246.8	1266	—	—	0.93±0.09	—	辛辣香、甜香
66	3-羟基-2-丁酮	/	673	0.60±0.21 ^a	0.31±0.08 ^a	—	4.67±0.84 ^b	黄油、奶油、蘑菇香
67	环己酮	872.6	876	—	0.96±0.23 ^a	0.60±0.18 ^a	0.70±0.12 ^a	薄荷香
68	甲基庚烯酮	982.7	982	0.85±0.11 ^a	1.23±0.29 ^{ab}	2.04±0.55 ^b	1.96±0.16 ^b	果香
69	异佛尔酮	1127.4	1124	—	6.68±1.11 ^b	0.15±0.03 ^a	0.22±0.05 ^a	樟脑香
70	(+)-异薄荷酮	1166.0	/	—	—	0.15±0.05	—	薄荷香
71	2,3,4,5-四甲基苯乙酮	1389.8	/	—	—	1.02±0.18	—	未描述
72	香叶基丙酮	1455.0	1453	0.44±0.05 ^a	0.97±0.08 ^b	1.51±0.07 ^c	1.05±0.13 ^b	茴香、薄荷香
73	2,6-二甲基吡嗪	892.3	900	—	1.34±0.31 ^b	0.41±0.13 ^a	—	坚果香香
74	4,6-二甲基嘧啶	896.0	910	—	0.83±0.03	—	—	烤香、坚果香
75	2-乙基-6-甲基吡嗪	981.8	997	—	0.41±0.04 ^a	0.63±0.17 ^b	—	烤土豆香
76	2-甲基呋喃	1059.7	/	—	1.02±0.27 ^b	0.55±0.16 ^a	—	巧克力香
77	2-甲基十一烷	1170.1	1164	0.34±0.04 ^a	—	—	0.38±0.07 ^a	未描述
78	十二烷	1204.0	1200	0.68±0.05 ^a	—	0.56±0.12 ^a	0.55±0.13 ^a	未描述
79	2-甲基十二烷	1268.2	1264	0.23±0.02 ^a	0.77±0.05 ^b	0.83±0.13 ^b	0.96±0.10 ^b	未描述
80	正十三烷	1304.6	1300	0.55±0.05 ^a	0.46±0.03 ^a	0.88±0.18 ^b	1.14±0.17 ^b	未描述
81	2,6,10-三甲基十二烷	1366.1	1366	—	0.44±0.05 ^a	—	0.52±0.11 ^a	未描述
82	2-甲基十三烷	1367.1	1364	0.79±0.15 ^b	0.69±0.15 ^b	0.31±0.07 ^a	0.72±0.16 ^b	未描述
83	十四烷	1401.4	1400	—	—	1.45±0.23 ^a	1.24±0.23 ^a	未描述
84	2-甲基十四烷	1462.1	1463	0.60±0.02 ^b	1.02±0.10 ^a	0.48±0.13 ^b	0.74±0.17 ^b	未描述
85	对二甲苯	884.9	868	0.80±0.04 ^b	1.50±0.32 ^c	—	0.32±0.07 ^a	芳香
86	4-异丙基甲苯	1029.7	1025	2.14±0.37 ^b	5.03±1.22 ^c	0.39±0.03 ^a	—	芳香
87	萘	1196.4	1190	0.20±0.02 ^a	0.49±0.10 ^b	1.11±0.08 ^c	0.43±0.06 ^b	甜香
88	1-甲基萘	1306.6	1290	0.21±0.04 ^a	—	0.53±0.15 ^b	0.99±0.07 ^c	芳香
89	丁香酚	1360.9	1358	—	0.65±0.12 ^a	3.05±0.35 ^b	0.60±0.10 ^a	甜辣香

注：香气描述均来自在线数据库（www.chemicalbook.com）；同行数据上标不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）；“—”表示未检测到；“/”表示 RI 值未查询到。

表6 龙眼果肉9类挥发性成分HS-SPME-GC-MS分析结果汇总数据

Fig. 6 Summary data of HS-SPME-GC-MS analysis results for 9 volatile components in longan pulp

种类	相对含量/%			
	新鲜	HAD	MVD	VFD
醇类	7.69±0.69 ^a	6.85±0.20 ^a	11.02±1.85 ^b	10.07±0.05 ^b
烯炔类	51.19±3.37 ^c	47.17±1.14 ^{bc}	45.60±1.13 ^b	40.83±2.09 ^a
酯类	31.77±1.86 ^d	16.98±1.12 ^a	21.15±1.37 ^b	25.63±2.43 ^c
醛类	1.00±0.09 ^a	4.20±0.07 ^b	5.57±0.64 ^c	6.37±0.52 ^d
酮类	1.89±0.08 ^a	10.15±1.18 ^c	5.48±1.18 ^b	8.61±1.13 ^c
杂环类	—	3.60±0.30 ^a	1.59±0.49 ^b	—
烷烃类	3.19±0.32 ^a	3.38±0.27 ^a	4.51±0.31 ^b	5.86±0.19 ^c
芳香烃类	3.35±0.37 ^a	7.02±1.63 ^b	2.03±0.16 ^a	1.74±0.11 ^a
酚类	—	0.65±0.12 ^a	3.05±0.35 ^b	0.60±0.10 ^a

从表5和表6可以看出,新鲜龙眼和HAD、MVD、VFD处理所得龙眼样品挥发性物质相对含量及种类差异显著。89种挥发性成分分为9大类:醇类(12种)、烯炔类(25种)、酯类(24种)、醛类(4种)、酮类(7种)、杂环类(4种)、烷烃类(8种)、芳香烃类(4种)、酚类(1种)。

新鲜龙眼果肉共检出59种挥发性成分。与新鲜龙眼相比,3种干燥方式所得龙眼样品中挥发性成分种类均有不同程度的减少,其中以烯炔类及酯类成分减少最为明显;HAD处理所得龙眼中挥发性成分种类最少,共检出47种,而MVD和VFD处理所得龙眼所检出的挥发性成分种类均为52种。

从表6可以看出,烯炔类化合物是龙眼果肉中含量最多的挥发性物质,相对含量40.83%~51.19%,新鲜龙眼果肉经干燥后烯炔类化合物相对含量均降低且具有显著差异($P<0.05$)。从表5可以看出,(-)- α -萜荳蔻烯、 α -蒎烯、 β -榄香烯、香桉烯、 α -石竹烯、 β -马榄烯、 α -法呢烯、 α -愈创木烯等具有青草、木质气味的萜烯类化合物明显损失,进而造成干燥后龙眼果肉气味发生变化,这与电子鼻检测结果一致;相对含量最高的反式- β -罗勒烯、 β -罗勒烯、别罗勒烯、对薄荷-1,3,8-三烯主要呈青草、柑橘香、木香,被认为是龙眼果肉的特征香味成分^[30],其中 β -罗勒烯及其同分异构体在新鲜龙眼中相对含量为19.83%,在干燥后样品中相对含量为22.41%~24.05%,相对含量略有升高,可能是因为,干燥导致龙眼果肉中醇类、酯类及其他烯炔类化合物发生分解,因此, β -罗勒烯及其同分异构体的相对含量有所升高。

酯类化合物主要来源于脂肪氧合酶的代谢途径,是龙眼果肉中主要的挥发性物质,可以赋予龙眼甜香、果香气味^[31]。从表6可以看出,酯类化合物相对含量16.98%~31.77%,干燥后样品中的酯类挥发性物质相对含量显著降低($P<0.05$),其中以

HAD降低最为显著。VFD中的酯类化合物相对含量25.63%,显著高于另外两种干燥方式。从表5可以看出,新鲜龙眼果肉中共检出18种酯类,HAD中9种、MVD中12种、VFD中13种,一些低级脂肪酸酯(乙酸乙酯、丁酸乙酯、异戊酸乙酯、己酸甲酯、戊酸乙酯、2-甲基丁酸乙酯、2-己烯酸乙酯)经干燥后相对含量均减少或未检出,它们大多具有苹果、菠萝香气,可以赋予龙眼水果香气。酯类化合物中含量较高的水杨酸甲酯被认为是龙眼果肉中的特征香气成分之一^[32],可赋予龙眼果肉草药香及薄荷味,在干燥前后均有检出,说明在干燥后的龙眼果肉中,水杨酸酯特征香味仍占主导。

从表5和表6可以看出,龙眼果肉中醇类化合物相对含量较少,主要为萜类化合物、苯丙氨酸和脂肪酸代谢产物^[33],MVD、VFD的醇类化合物相对含量均高于新鲜龙眼,而HAD中醇类化合物相对含量降低,可能是因为高温干燥条件容易促使醇类物质挥发或酯化^[1,34]。

从表5和表6可以看出,醛类挥发性成分在龙眼果肉中相对含量及数目较少,主要来源于氨基酸及脂肪酸的代谢^[33]。干燥后龙眼果肉中醛类化合物种类及相对含量均有增加,其中4种样品共有的挥发性醛类化合物为壬醛和癸醛,主要赋予龙眼果肉柠檬、油脂味和花香、柑橘味;而HAD、VFD特有的醛类化合物为苯甲醛,主要赋予龙眼果肉杏仁、樱桃香气;MVD特有的醛类化合物为肉桂醛,可以赋予龙眼果肉甜味及辛辣味。

从表5和表6可以看出,酮类及其他类物质相对含量较低,大部分物质如十二烷、十四烷、十八烷、环己酮等对龙眼果肉气味无影响,而2,6-二甲基吡嗪、4,6-二甲基嘧啶、2-乙基-6-甲基吡嗪等具有烘焙风味的杂环类挥发性物质仅在HAD和MVD中检出,这可能是在干燥过程中发生美拉德反应的产物,使HAD、MVD处理所得龙眼散发焦甜、烘焙香味。

2.4.2 聚类分析

图5为4种样品间89种挥发性成分相对含量的聚类热图。

4种样品热图中色块颜色由绿到橙代表挥发性成分相对含量由低到高。从图5可以看出,聚类结果可分为两组,新鲜龙眼为一组,3种干燥后的龙眼为另一组,说明龙眼果肉干燥前后挥发性成分种类及相对含量差异显著;MVD、VFD处理所得龙眼处于同一分支,由此可知,MVD与VFD处理所得龙眼的挥发性成分种类及相对含量较为相似,具有较高的相关性。

2.4.3 PLS-DA分析

图6为基于4种样品中89种挥发性成分的相对含量构建的PLS-DA模型。

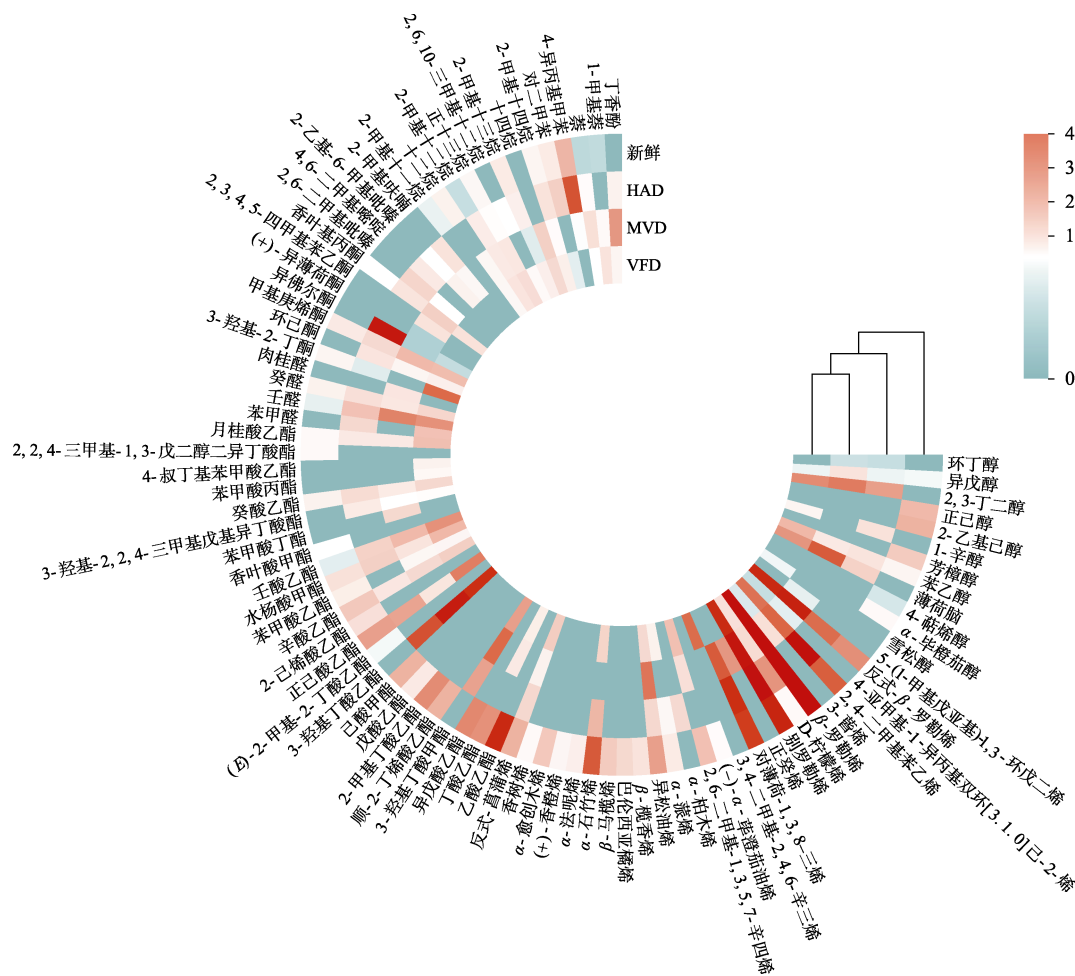


图 5 龙眼果肉挥发性化合物聚类热图

Fig. 5 Clustering heatmap of volatile compounds in longan pulp

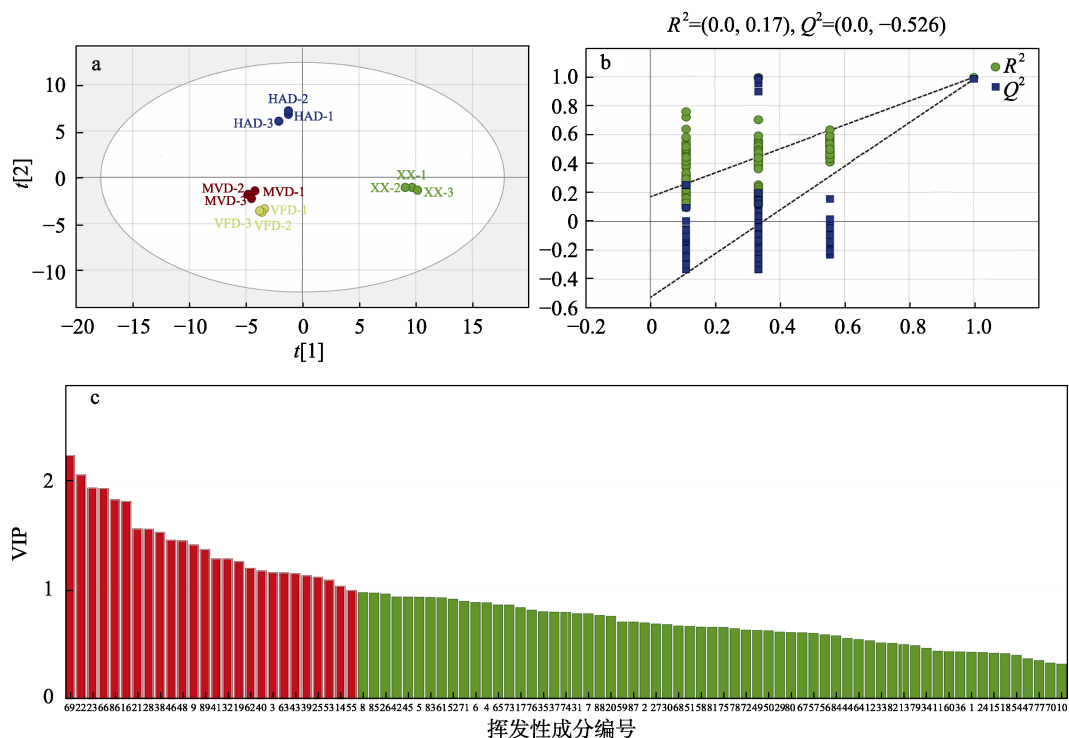


图 6 龙眼果肉挥发性成分 PLS-DA 得分图 (a)、置换检验图 (b)、VIP 值图 (c)

Fig. 6 PLS-DA score plots (a), permutation test plots (b) and VIP scores (c) of longan pulp

从图6可以看出,拟合模型的自变量拟合指数(R_x^2)、因变量拟合指数(R_y^2)及模型预测指数(Q^2)分别为0.913、0.992、0.974, $R_x^2 - R_y^2 < 0.3$,代表该模型可靠。新鲜龙眼(XX)位于第四象限, HAD处理所得龙眼位于第二象限, MVD、VFD处理所得龙眼均位于第三象限,说明鲜样与干样之间挥发性成分差异明显(图6a); 3种干燥方式中MVD与VFD处理所得龙眼的挥发性成分差异较小,与聚类分析结果一致。

通过200次响应的置换检验对拟合模型进行验证,可以避免出现过拟合现象。置换检验得到 R^2 为0.17, Q^2 为-0.526, 回归直线 Q^2 与Y轴的截距 < 0 (图6b),表明该模型不存在过拟合现象,模型的预测能力较好。

变量投影重要性(VIP)表示挥发性成分对区分4种样品的贡献大小,一般VIP > 1 ,表明该物质在判别过程中起重要作用。从图6c可以看出,共鉴定出26个VIP > 1 的化合物,从大到小依次为异佛尔酮、对薄荷-1,3,8-三烯、3,4-二甲基-2,4,6-三辛烯、3-羟基-2-丁酮、4-异丙基甲苯、2,4-二甲基苯乙烯、正癸烯、异松油烯、乙酸乙酯、3-羟基丁酸乙酯、正己酸乙酯、薄荷脑、丁香酚、3-羟基丁酸甲酯、 α -石竹烯、D-柠檬烯、苯甲醛、异戊酸乙酯、2,3-丁二醇、壬醛、2-甲基丁酸乙酯、丁酸乙酯、2,6-二甲基-1,3,5,7-辛四烯、壬酸乙酯、反式- β -罗勒烯、苯甲酸丁酯。

3 结论

(1) 龙眼果肉的3种干燥方式中,干燥速率由大到小为MVD $>$ HAD $>$ VFD。所选的9种干燥模型中,Weibull distribution模型能够更好地预测龙眼果肉在不同温度及不同时间下水分比的变化规律。

(2) 3种干燥方式对龙眼果肉色泽影响显著,其中VFD的色泽保留最好,其次分别为HAD、MVD。

(3) 电子鼻PCA结果显示,4种样品间挥发性气味能够明显区分。HS-SPME-GC-MS分析结果表明,新鲜龙眼和HAD、MVD、VFD处理所得龙眼中分别检出59和47、52、52种挥发性成分。

(4) 龙眼果肉中主要的香气成分为萜烯类及酯类化合物;鲜样与干样的挥发性成分差异显著;3种干燥方式中VFD对龙眼挥发性成分的保留最佳。

(5) VFD与MVD处理所得龙眼的挥发性成分差异较小,26种特征性挥发物质对区分4种样品起重要作用(VIP > 1)。

(6) 若考虑干燥后龙眼果肉的品质,VFD的效果最佳;若考虑干燥效率,MVD的干燥速率最高。

本文可为龙眼果肉干燥工艺的选择提供理论基础和实验参考。

参考文献:

- [1] ZHENG G M (郑公铭), LI Z J (李忠军), LIU G Y (刘纲勇), et al. Isolation and identification of ceramides and cerebroside from longan (*Dimocarpus longan* Lour.) seeds[J]. Fine Chemicals (精细化工), 2012, 29(8): 761-764, 769.
- [2] LIN Y S, TANG D B, LIU X M, et al. Phenolic profile and antioxidant activity of longan pulp of different cultivars from South China[J]. LWT, 2022, 165: 113698.
- [3] ZHU J N (朱经楠), PENG J (彭健), XIE Z Q (谢子权), et al. Effect of intermittent infrared assisted heat pump drying on the quality and volatile profiles of longan[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology (中国食品学报), 2024, 24(1): 190-199.
- [4] TANG Y Y, HE X M, SUN J, et al. Polyphenols and alkaloids in byproducts of longan fruits (*Dimocarpus Longan* Lour.) and their bioactivities[J]. Molecules (Basel, Switzerland), 2019, 24(6): 1186.
- [5] ZHANG X F, GUO S, HO C T, et al. Phytochemical constituents and biological activities of longan (*Dimocarpus Longan* Lour.) fruit: A review[J]. Food Science and Human Wellness, 2020, 9(2): 95-102.
- [6] ZHANG R F, KHAN S A, LIN Y S, et al. Phenolic profiles and cellular antioxidant activity of longan pulp of 24 representative Chinese cultivars[J]. International Journal of Food Properties, 2018, 21(1): 746-759.
- [7] HUANG F, LIU H J, ZHANG R F, et al. Physicochemical properties and prebiotic activities of polysaccharides from longan pulp based on different extraction techniques[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 206: 344-351.
- [8] ZHANG H K (张宏康), LI A Q (李蔼琪), LIN X K (林小可), et al. Research status and prospect of longan processing[J]. Light Industry Science and Technology (轻工科技), 2017, 33(1): 1-4.
- [9] LI Z Y (李子煜), WU T (吴婷), MA S N (马帅楠), et al. Effects of different drying methods on the quality of broccoli stems and leaves[J]. Food Science (食品科学), 2024, 45(14): 179-188.
- [10] BAI-NGEW S, THERDTHAI N, DHAMVITHEE P. Characterization of microwave vacuum-dried durian chips[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 104(1): 114-122.
- [11] BHATTA S, JANEZIC T S, RATTI C. Freeze-drying of plant-based foods[J]. Foods, 2020, 9(1): 87.
- [12] TAN S (谭颀), PENG S W (彭思维), LI W X (李玮轩), et al. Effects of different drying methods on polyphenol profile and antioxidant activities in longan (*Ficus carica* Linn.)[J]. Journal of Fruit Science (果树学报), 2021, 38(3): 411-420.
- [13] PENG J (彭健), WANG W J (王蔚婕), TANG D B (唐道邦), et al. Effect of multi-stage far-infrared radiation-assisted heat pump drying on the quality characteristics of longan[J]. Food Science (食品科学), 2020, 41(19): 118-123.
- [14] WANG C Z (王宸之), DENG Z G (邓自高), LI L (李琳), et al. Changes in the quality of *Dimocarpus Longan* during the hot-air drying and microwave drying processes[J]. Journal of Food Science and Biotechnology (食品与生物技术学报), 2018, 37(4): 429-436.
- [15] CHUNTHAWORN S, ACHARIYAVIRIYA S, ACHARIYAVIRIYA A, et al. Color kinetics of longan flesh drying at high temperature[J]. Procedia Engineering, 2012, 32: 104-111.
- [16] MA Y (马尧), HAO H H (郝慧慧), ZHANG H H (张海红), et al. Effects of different drying methods on volatile flavor components of daylily powder analyzed by gas chromatography-mass spectrometry combined with electronic nose[J]. Food Science (食品科学), 2022, 43(6): 324-330.
- [17] YE Q P (叶秋萍), YU W (余雯), XIE J X (谢基雄), et al. Effects of different drying methods on volatile components of jasmine tea[J]. Science and Technology of Food Industry (食品工业科技), 2024, 45(18): 210-218.

(下转第1160页)