

基于电子鼻和全二维气相色谱质谱联用法 分析不同稳定化米糠挥发性成分差异

李兰兰¹, 廖卢艳^{1,2}, 任贤龙³, 刘操⁴, 吴卫国^{1,2*}

(1. 湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南长沙 410128) (2. 湖南农业大学长沙现代食品创新研究院, 湖南长沙 410128)
(3. 湖南角山米业有限责任公司, 湖南衡阳 421200) (4. 湖南桃源县兴隆米业科技发展有限公司, 湖南常德 415700)

摘要: 为了探究不同稳定化处理对米糠风味成分的影响, 该研究采用电子鼻与全二维气相色谱-质谱联用技术 (Comprehensive Two-dimensional Gas Chromatography-time-of-flight Mass Spectrometry, GC×GC-TOFMS), 结合偏最小二乘判别分析 (Partial Least Squares Discriminant Analysis, PLS-DA) 和相对气味活度值 (Relative Odor Activity Value, ROAV) 对米糠挥发性风味物质的变化进行了系统分析。结果表明: 不同稳定化处理方法对米糠风味的影响存在显著差异, 共检测到 99 种挥发性香气化合物, 包括 6 种醛类、10 种酮类、22 种烷烃类、12 种醇类、28 种萜烯类、8 种酯类及 13 种其他化合物。其中, 红外处理对米糠风味影响不大, 而高压蒸汽处理有效降低了米糠的异味 (引味)。变量重要性投影 (Variable Importance in Projection, VIP) 共筛选出 23 种潜在差异性物质, 4 种不同稳定化处理后米糠中的香叶基丙酮和 (-)- 柠檬烯等潜在差异性物质相对含量显著减少。ROAV 值表明, 烘烤、微波和高压蒸汽稳定化处理后米糠关键风味物质 (ROAV>1) 均减少, 2-正戊基呋喃、甲庚基烯酮和香茅烯等 8 种物质为不同稳定化米糠风味差异的关键风味物质。该研究对不同稳定化处理的米糠挥发性风物质进行差异分析, 为提升米糠产品附加值及品质提供理论依据。

关键词: 米糠; 全二维气相色谱质谱联用法; 稳定化处理; 电子鼻; 相对气味活度值

文章编号: 1673-9078(2025)12-220-230

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.12.1364

Analysis of the Differences in Volatile Components of Different Stabilized Rice Brans Based on Electronic Nose and Comprehensive Two-dimensional Gas Chromatography-mass Spectrometry

LI Lanlan¹, LIAO Luyan^{1,2}, REN Xianlong³, LIU Cao⁴, WU Weiguo^{1,2*}

(1.College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

(2.Changsha Modern Food Innovation Research Institute, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

(3.Hunan Jiaoshan Rice Industry Co. Ltd., Hengyang 421200, China)

(4.Hunan Taoyuan Xinglong Rice Industry Technology Development Co. Ltd., Changde 415700, China)

引文格式:

李兰兰,廖卢艳,任贤龙,等.基于电子鼻和全二维气相色谱质谱联用法分析不同稳定化米糠挥发性成分差异[J].现代食品科技,2025,41(12):220-230.

LI Lanlan, LIAO Luyan, REN Xianlong, et al. Analysis of the differences in volatile components of different stabilized rice brans based on electronic nose and comprehensive two-dimensional gas chromatography-mass spectrometry [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(12): 220-230.

收稿日期: 2024-09-12; 修回日期: 2024-10-28; 接受日期: 2024-10-29

基金项目: 湖南省科技创新计划项目 (2023ZJ1070); 湖南重点领域研发计划项目 (2019NK2131); 2022 年度湖南省企业科技创新创业团队项目 (湖南角山米业稻米科技创业团)

作者简介: 李兰兰 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 粮食深加工及开发利用, E-mail: 1355921529@qq.com

通讯作者: 吴卫国 (1968-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 粮食深加工及开发利用, E-mail: 1061051403@qq.com

Abstract: To explore the impacts of different stabilization treatments on the flavor components of rice bran, this study employed an electronic nose and comprehensive two-dimensional gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry (GC×GC-TOFMS), combined with partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) and relative odor activity value (ROAV) evaluation to systematically analyze the changes in volatile flavor compounds of rice bran. The results indicated that there were significant differences in the effects of different stabilization methods on the flavor of rice bran. A total of 99 volatile aroma compounds were detected, including 6 aldehydes, 10 ketones, 22 alkanes, 12 alcohols, 28 terpenes, 8 esters, and 13 other compounds. Among them, infrared treatment had minimal impact on rice bran flavor, while high-pressure steam treatment effectively reduced the off-flavor (indole) in rice bran. Variable Importance in Projection (VIP) identified 23 potential differential substances, with significant decreases being found in the relative contents of potential differential substances such as geranylacetone and (-)-limonene in the rice bran after four different stabilization treatments. The ROAV values revealed that the key flavor substances (ROAV>1) in rice bran decreased after the stabilization treatments like baking, microwaving, and high-pressure steaming. Eight substances, including 2-n-pentylfuran, methylheptenone, and citronellene, were identified as the key flavor compounds contributing to the differences in flavor among the rice bran samples subjected to different stabilization methods. This study conducted a differential analysis of volatile flavor substances in rice bran subjected to different stabilization methods, providing a theoretical basis for enhancing the added value and quality of rice bran products.

Key words: rice bran; comprehensive two-dimensional gas chromatography-mass spectrometry; stabilization treatment; electronic nose; relative odor activity value

米糠是稻米加工中的副产物，由谷粒的外层和胚芽组成，富含蛋白质、维生素、谷维素、生育酚等多种对人体极具营养价值的物质^[1]。目前，我国米糠主要用于产油或牲畜饲料，极少数用于食品加工，这导致其丰富的营养物质未能得到充分利用。这主要归因于米糠在机械碾磨过程中油脂与酶的隔层被破坏，在酶的催化作用下，进一步加速了米糠的酸败^[2]。而热处理作为主要的钝酶方法之一，因其灭酶效果稳定、易操作，被广泛常用于米糠的稳定化前处理。然而，不同热处理也会对米糠的风味产生影响，如高温会导致脂肪氧化和发生美拉德反应，在影响其品质的同时又赋予了独特风味^[3,4]。据相关报道，青稞中吡嗪类物质含量会随着烘烤温度的增加而上升，导致其焦糖味、焦糊味和香草味增加^[4]；燕麦片的杂环类化合物会随着挤压膨化温度的升高而增加^[5]。当前，关于热处理对风味物质的影响研究主要集中在谷物类作物^[6]，而米糠的稳定化前处理相对较少，稳定化加工过程中产生的独特风味成分尚不明确。因此，深入探讨米糠的稳定化前处理及其风味特性对于提升米糠的附加值、开发功能性食品、拓宽食品领域的应用至关重要。

一维 GC-MS 色谱分析是一种常用的风味分析手段，但对于微量的特征风味物质却难以检测，导致了一些关键风味物质未能识别。然而，全二维气质联用技术 (GC×GC-TOF-MS) 作为一种全新、高效的风味分离方法，具有更优的分辨率、峰容量和灵敏度^[7-11]。朱建才等^[12]通过采用 GC-MS 与 GC×GC-TOF-MS 技术

测定龙井茶的挥发性成分，发现 GC×GC-TOF-MS 共检测出 138 种挥发性成分，比 GC-MS 多 42 种。曹雪颖等^[13]采用相同的两种技术测定红茶的挥发性成分，得到相同的研究结论。目前 GC×GC-TOF-MS 技术在米糠风味检测应用未见报道，该技术对米糠稳定化处理的风味物质检测还有待探究。

该研究采用烘烤、红外、微波和高压蒸汽 4 种处理方法对米糠进行干热和湿热处理，通过全二维气相色谱质谱联用技术 (GC×GC-TOFMS) 和电子鼻对 4 种不同稳定化米糠中挥发性风味物质进行了定性和定量分析，并结合偏最小二乘判别分析 (PLS-DA) 确定潜在差异挥发性风味物质，利用相对气味活度值 (ROAV) 分析探讨关键性风味物质，旨在为米糠稳定化过程中的风味化学理论和米糠品质的控制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

1.1.1 试验材料

新鲜米糠，湖南角山米业有限公司提供。

1.1.2 试验设备

DE-100 g 高速粉碎机，浙江红景天工贸有限公司；G70F20CN1L-DG 格兰仕微波炉，广州格兰仕集团有限公司；CS1201A2 烤箱，中山市长实五金电器有限

公司; HYHG-II-72 远红外干燥箱, 上海跃进医疗器械有限公司; PEN3 电子鼻, 德国 AIRSENSE 公司; GC-QTOF 8890-7250 多功能前处理及进样一体全二维气相色谱飞行时间质谱仪, 美国安捷伦科技有限公司。

1.2 米糠的稳定化处理

新鲜米糠用磨粉机研磨, 样品真空包装置于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下备用(下同)。

1.2.1 烘烤米糠的制备

按郭诗婕^[14]的方法将烤箱提前预热, 称取 100 g 米糠平铺于烤盘中, 设置烤箱温度为 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热 5 min 每 30 s 进行一次搅拌。冷却真空包装备用, 下同。

1.2.2 红外米糠的制备

提前预热红外干燥箱, 称取 100 g 米糠平铺于盘中, 设置红外温度为 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热 20 min 每 5 min 进行一次搅拌。

1.2.3 微波米糠的制备

提前预热微波炉, 称取 100 g 米糠平铺于盘中, 630 W 加热 5 min 每 30 s 进行一次搅拌。

1.2.4 高压蒸汽处理米糠的制备

将 200 g 米糠用纱布包裹置于高压灭菌器中, 设置温度和时间分别 $126\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 15 min , 压力 0.1 MPa (表压)。

1.3 电子鼻

称取 5.0 g 米糠样品, 分别密封于盖子带有聚四氟乙烯隔垫气密性隔垫的顶空瓶中密封待测。检测参数: 室温 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 吸气速率 300 mL/min , 数据获取持续时间 120 s , 清洗时间 100 s 。每个样品重复测定 3 次。

1.4 GC×GC-TOFMS 挥发性成分分析

取所有样品 $3.0 \pm 0.1\text{ g}$ 于 20 mL 顶空瓶中密封, 自动进样, 进样口和柱箱的温度分别为 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $325\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。挥发性化合物在 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 解吸 5 min , 分流比为 1:1。

1D 色谱柱为 HP-5ms ($15\text{ m} \times 250\text{ }\mu\text{m} \times 0.25\text{ }\mu\text{m}$)。初始温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 恒温 2 min , 运行 2 min , 以 $2\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 升温至 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, 运行 42 min 。2D 色谱柱为 HP-5ms-15m ($21.97\text{ m} \times 250\text{ }\mu\text{m} \times 0.25\text{ }\mu\text{m}$), 以 $5\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 的速率升高到 $260\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保持 5 min , 运行 75 min 。在以 $10\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 的升温速率使温度上升到 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$, 并保持 3 min 。载气氮气流速为 20 mL/min (99.999%)。分流比 1:1, 分流流量 0.9 mL/min , 压力 13.779 PSI , 总流量 4.8 mL/min , 隔垫吹扫流量 3 mL/min 。

MS 条件: 在 $45\sim 350\text{ m/z}$ 扫描范围内, 电子能量

为 70 eV 的模式下进行质谱采集, 离子源温度为 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$, 质谱离子源温度为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

定性定量分析: 利用 Canvas panel 工作站检索, 选择正反匹配度大于 750 的物质为有效挥发性风味物质进行定性分析, 与 NIST20 数据库中的质谱进行比对, 信噪比 (S/N) > 10 的色谱峰被自动识别。并利用相同条件下 C6~C40 正构烷烃计算化合物的保留指数 (Retention Index, RI), 随后与 NIST 上报道的 RI 进行比对, 进一步定性。利用峰面积归一化法计算各物质的相对含量进行定量分析。

1.5 相对气味活度值 (Relative Odor Activity Value, ROAV) 计算

ROAV 的计算: 通常选择阈值较低但相对含量较高的风味物质, 对样品贡献最大的风味物质定义为 $\text{ROAV}_{\max} = 100$ ^[5]。其他物质按以下公式计算:

$$\text{ROAV} = \frac{C_i}{T_i} \times \frac{T_{\max}}{C_{\max}} \times 100 \quad (1)$$

式中:

C_i ——各挥发性风味物质的相对含量, %;

T_i ——各挥发性风味物质的感觉阈值, $\mu\text{g/L}$;

$C_{\max}$ ——样本总体风味贡献最大物质的相对含量, %;

$T_{\max}$ ——样本总体风味贡献最大物质的感觉阈值, $\mu\text{g/L}$ 。

1.6 统计分析

采用 SPSS26.0 进行单因素方差分析, 并通过 Duncan 多重比较分析显著性差异; SIMCA 14.1 进行 PLS-DA 分析; Excel 2024 进行试验数据整理; Origin 2024 绘制图表。

2 结果与讨论

2.1 通过电子鼻分析不同稳定化处理方法对米糠气味的影响

采用 PEN3 系统的电子鼻 (由 10 个不同的金属氧化物半导体传感器组成) 对米糠的气味特征进行了检测。图 1a 为载荷图, 图 1b 展示了经过不同稳定化处理的米糠在电子鼻主成分分析 (PCA) 空间中的分布情况。结果显示前两个主成分贡献的总方差为 88.4% (PC1 和 PC2 分别为 57.9% 和 30.5%), 因此这两个主成分足以代表数据集的整体变异。在载荷图中, 1 到 10 代表十个不同传感器。样本与箭头的距离越近表明相关性越高; 传感器与 X 轴夹角越小贡献率越大, 传感器 4 和 8 在 PC1 贡献最大。二维区分图结果表明, 电子鼻数据的分离效果较好, 其中原料米糠和微波米糠位于第一象限, 表明它们的气味特征相似, 而其余

三组样本则分布在不同的象限，表明不同的稳定化处理方法对米糠风味的影响存在显著差异。

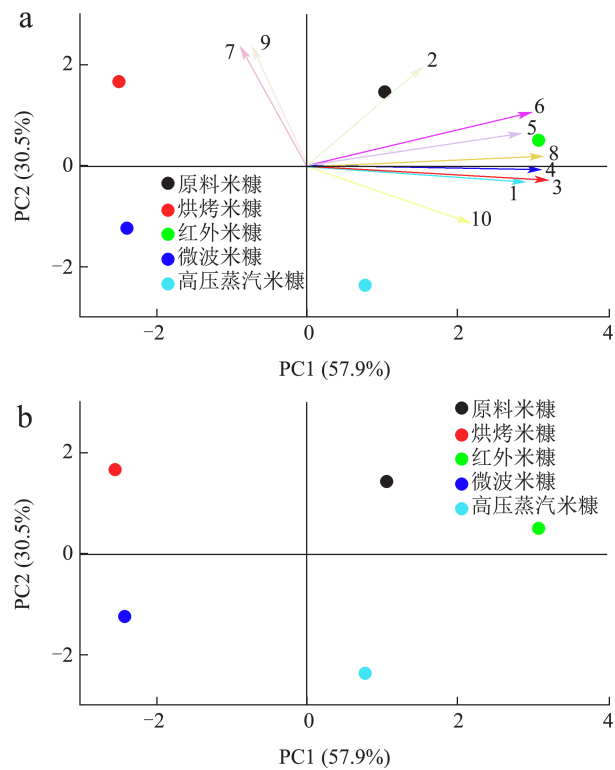


图 1 不同处理方法米糠的电子鼻数据 PCA 分析
Fig.1 Electronic nose data PCA analysis of rice bran with different processing methods

注：(a) 电子鼻载荷分析图；(b) 电子鼻 PCA 二维区分图。

2.2 不同稳定化处理方法米糠中挥发性物质成分比较

为了研究不同稳定化方法对米糠风味成分的影响，采用 GC×GC-TOFMS 对原料米糠及四种稳定化处理的挥发性风味物质进行了检测。如表 1 所示，共检测到 99 种挥发性香气化合物，包括 6 种醛类、10 种酮类、22 种烷烃类、12 种醇类、28 种萜烯类、8 种酯类及 13 种其他化合物。结合图 2 和图 3 的数据可知，四种稳定化方法均改变了米糠的挥发性物质组成，其中高压蒸汽处理对风味的影响最大。

图 3a 显示，相较于原料米糠（47.8%），烘烤处理的米糠中烷烃类物质的含量最高（59.91%），其次是微波处理（57.41%）、红外处理（45.79%），而高压蒸汽米糠（25.22%）含量最低，这可能与米糠的脂肪含量、研磨及高温条件有关，这些因素会促使脂肪氧化分解，从而增加烷烃类物质含量。尽管大多数烷烃类化合物对谷物的香气贡献不大，但少部分烷烃类化合物可能赋予特殊风味，如 3-乙基己烷（具有辛辣味^[15]），在

五组样品中均有检测到且相对含量较高。酮类和醛类是美拉德反应的主要产物，米糠经过不同稳定化处理后，醛类物质的相对含量和种类显著增加，这可能是由于处理过程中不饱和脂肪酸氧化和美拉德反应生成了更多的醛类物质导致^[16,17]。醛类化合物气味阈值低，它们对米糠整体风味的贡献最大，醛类含量的增加可能会赋予米糠不同的风味。高晨^[18]测定不同稳定化米糠中醛类风味物质含量较原料米糠也有增加。醇类物质主要是由不饱和脂肪酸氧化分解生成，同时也是重要风味物质酯类的前体化合物之一^[19]。如 1-辛烯-3-醇由亚油酸甲酯降解生成，散发蘑菇和玫瑰的香气^[20]。此外碳水化合物和氨基酸的降解也可能产生大量醇类化合物^[18]。由于醇类化合物的气味阈值较高，它们对米糠整体气味的影响较小。酮类物质的产生可能与酶促或非酶促氧化反应有关^[21]。在红外处理的米糠中种类较多，其中 2-辛烯-4-酮的相对含量达到 15.31%，其风味特征为菠萝和面包香气，这可能赋予米糠独特的风味特征。萜烯类化合物在米糠中种类繁多。如图 3 所示，高压蒸汽处理、微波处理的萜烯类物质的相对含量分别为 25.34% 和 17.58%。从表 1 可见，1-乙基-环己烯和反-4-辛烯是米糠中相对含量较高的萜烯类化合物。其中，1-乙基-环己烯具有淡淡雅的芳香气，而反-4-辛烯的气味类似于苯^[21]，这些化合物可能导致米糠产生不愉快的气味。

除了上述几类主要挥发性成分外，酚类等化合物也被检测到。但是大部分仅存在于高压蒸汽处理的米糠中，如对乙烯基愈疮木酚、3,5-二甲苯酚和异香兰素，其中异香兰素伴有橄榄样香气和浓郁的奶香。这些挥发性化合物通过协同作用赋予米糠独特的风味特征。

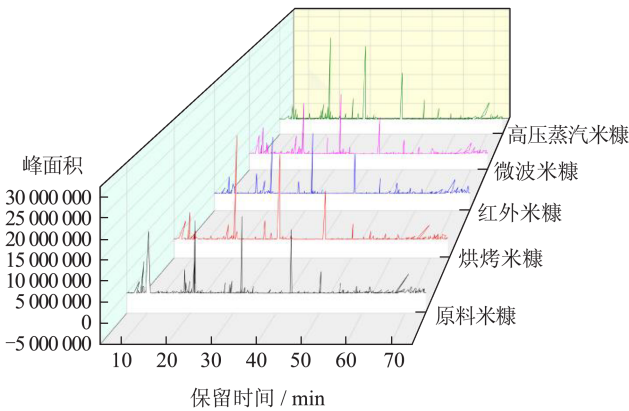


图 2 不同处理方式米糠总离子流图
Fig.2 Total ion flow chart of rice bran with different treatment methods

表 1 不同处理方法米糠挥发性成分

Table 1 Volatile components of rice bran in different treatment methods

类别	名称	CAS 号	相对含量/%						
			一维保留 时间/min	二维保留 时间/s	原料米糠	烘烤米糠	红外米糠	微波米糠	高压蒸汽米糠
醇类	2-甲基十一烷-2-硫醇	100-52-7	18.18	5.26	ND	ND	ND	ND	5.33 ± 0.29 ^a
	顺-3-壬烯-1-醇	10340-23-5	28.18	3.52	7.05 ± 0.19 ^a	ND	ND	ND	ND
	2-乙基己醇	104-76-7	12.71	1.71	0.46 ± 0.70 ^a	ND	ND	ND	ND
	正己醇	111-27-3	12.71	3.00	1.25 ± 0.26 ^b	ND	ND	0.32 ± 0.20 ^a	ND
	正辛醇	111-87-5	25.91	3.44	ND	1.62 ± 0.05 ^a	ND	ND	ND
	环十二醇	1502-05-2	35.11	3.56	ND	0.72 ± 0.01 ^b	ND	ND	1.63 ± 0.03 ^a
	2,7-二甲基-1-辛醇	15250-22-3	18.31	1.87	ND	ND	0.64 ± 0.03 ^a	ND	ND
	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	19.51	3.28	1.54 ± 0.02 ^c	1.73 ± 0.03 ^b	1.81 ± 0.02 ^b	1.47 ± 0.04 ^c	3.78 ± 0.12 ^a
	2-丁基辛醇	3913-02-8	30.98	2.21	0.52 ± 0.03 ^c	0.71 ± 0.01 ^d	1.26 ± 0.02 ^c	0.16 ± 0.01 ^a	0.26 ± 0.02 ^b
	13-十七炔-1-醇	56554-77-9	38.85	2.96	0.46 ± 0.01 ^b	ND	ND	0.15 ± 0.01 ^a	0.14 ± 0.01 ^a
	1-甲基环丙烷甲醇	765-42-4	5.78	1.85	ND	0.50 ± 0.01	0.74 ± 0.02 ^b	ND	0.48 ± 0.01 ^a
	2-甲基辛-1-醇	818-81-5	17.91	1.92	2.35 ± 0.13 ^a	ND	ND	ND	ND
醛类	庚醛	111-71-7	14.58	3.15	0.56 ± 0.03 ^a	2.12 ± 0.13 ^c	1.58 ± 0.02 ^b	1.54 ± 0.04 ^b	3.84 ± 0.02 ^d
	苯乙醛	122-78-1	23.91	5.98	ND	0.28 ± 0.02 ^a	ND	0.44 ± 0.11 ^b	ND
	壬醛	124-19-6	28.18	3.49	ND	11.56 ± 0.12 ^b	9.21 ± 0.09 ^a	9.48 ± 0.04 ^a	13.11 ± 0.09 ^c
	3-糠醛	498-60-2	9.91	3.87	ND	ND	ND	ND	0.86 ± 0.03 ^a
	己醛	66-25-1	9.25	2.40	4.44 ± 0.03 ^a	5.68 ± 0.01 ^b	4.51 ± 0.05 ^a	5.37 ± 0.03 ^b	6.64 ± 0.01 ^c
	糠醛	98-01-1	10.85	4.28	ND	ND	ND	ND	0.82 ± 0.03 ^a
酮类	甲基庚烯酮	110-93-0	20.05	3.90	0.97 ± 0.01 ^c	ND	0.57 ± 0.02 ^a	0.63 ± 0.02 ^b	1.15 ± 0.01 ^d
	4-甲基-1-戊烯-3-酮	1606-47-9	8.05	2.39	ND	ND	ND	ND	1.12 ± 0.04 ^a
	N-[4-溴-正丁基]-2-哌啶酮	195194-80-0	58.05	1.81	ND	0.28 ± 0.02 ^a	0.35 ± 0.01 ^a	ND	ND
	5,5-二甲基-2(5H)-呋喃酮	20019-64-1	17.91	6.16	ND	ND	ND	ND	0.36 ± 0.01 ^a
	3,6,6-三甲基-环己-2-烯酮	23438-77-9	24.98	4.33	ND	ND	ND	ND	0.41 ± 00.01 ^a
	3-甲基-2-庚酮	2371-19-9	17.25	3.33	ND	ND	0.32 ± 0.01 ^a	ND	ND
	香叶基丙酮	3796-70-1	48.71	2.59	0.51 ± 0.01 ^b	0.11 ± 0.01 ^a	ND	ND	0.28 ± 0.02 ^a
	植酮	502-69-2	58.98	1.77	ND	ND	ND	ND	0.31 ± 0.01 ^a
	2-辛烯-4-酮	589-63-9	19.11	3.38	ND	ND	15.31 ± 0.05 ^a	ND	ND
	7,9-二叔丁基-1-氧杂草基(4,5)癸-6,9-二烯-2,8-二酮	82304-66-3	60.58	2.83	ND	ND	0.18 ± 0.02 ^a	ND	0.27 ± 0.02 ^a

续表1

类别	名称	CAS 号	相对含量/%						
			一维保留 时间/min	二维保留 时间/s	原料米糠	烘烤米糠	红外米糠	微波米糠	高压蒸汽米糠
烷 烃 类	3-乙基-2,4-二甲基-戊烷	1068-87-7	8.18	1.36	ND	ND	ND	10.72 ± 0.33 ^a	ND
	十二烷	112-40-3	34.71	2.22	4.72 ± 0.03 ^d	2.33 ± 0.03 ^a	2.95 ± 0.06 ^b	3.84 ± 0.07 ^c	ND
	3,4-二甲基-辛烷	15869-92-8	8.18	1.37	ND	ND	ND	ND	2.14 ± 0.01 ^a
	2,3-二甲基-十一烷	17312-77-5	28.85	2.13	6.47 ± 0.07 ^d	2.77 ± 0.02 ^a	2.70 ± 0.12 ^a	4.70 ± 0.02 ^c	3.16 ± 0.13 ^b
	2,3,5,8-四甲基-癸烷	192823-15-7	28.45	2.12	0.78 ± 0.01 ^a	ND	ND	ND	ND
	3,4,5-三甲基-庚烷	20278-89-1	8.18	1.33	ND	11.24 ± 0.03 ^b	4.30 ± 0.08 ^a	ND	ND
	4-甲基辛烷	2216-34-4	12.31	1.68	0.86 ± 0.04 ^a	ND	ND	ND	ND
	1,2,4-三甲基环己烷	2234-75-5	11.65	1.73	ND	ND	ND	1.33 ± 0.02 ^a	ND
	戊基-环丙烷	2511-91-3	25.91	3.43	ND	ND	ND	ND	3.65 ± 0.05 ^a
	/	25532-78-9	48.98	2.22	ND	ND	ND	0.88 ± 0.02 ^a	ND
	乙基-2-甲基-环戊烷	3726-46-3	8.85	1.52	ND	5.72 ± 0.02 ^c	3.19 ± 0.01 ^b	5.34 ± 0.02 ^c	1.57 ± 0.33 ^a
	戊基-2-丙基-环丙烷	41977-33-7	20.31	2.18	ND	ND	2.14 ± 0.05 ^a	ND	ND
	/	511-59-1	48.98	2.30	0.41 ± 0.50 ^a	0.75 ± 0.03 ^b	1.11 ± 0.07 ^d	ND	0.85 ± 0.01 ^c
	3-亚甲基-壬烷	51655-64-2	19.91	2.13	ND	2.56 ± 0.03 ^a	ND	ND	ND
	六甲基环三硅氧烷	541-05-9	26.85	0.84	ND	1.55 ± 0.03 ^a	ND	8.22 ± 0.11 ^b	ND
	3,4-二甲基己烷	583-48-2	8.18	1.40	8.30 ± 0.02 ^a	ND	ND	ND	ND
	3-乙基-辛烷	5881-17-4	18.98	1.88	ND	9.45 ± 0.17 ^a	9.86 ± 0.01 ^a	ND	ND
	3-乙基-己烷	619-99-8	9.25	1.42	21.88 ± 0.03 ^c	16.69 ± 0.26 ^d	12.85 ± 0.04 ^b	15.34 ± 0.04 ^c	8.18 ± 0.03 ^a
	十七烷	629-78-7	55.65	1.44	ND	2.28 ± 0.04 ^a	ND	ND	ND
	十九烷	629-92-5	48.71	1.70	4.39 ± 0.12 ^c	2.45 ± 0.02 ^b	6.69 ± 0.01 ^d	2.76 ± 0.05 ^b	1.64 ± 0.05 ^a
	二十八烷	630-02-4	55.65	1.47	ND	ND	ND	ND	1.37 ± 0.02 ^a
	庚基-2-甲基-环丙烷	74663-91-5	20.31	2.12	ND	2.11 ± 0.06 ^a	ND	3.10 ± 0.03 ^c	2.67 ± 0.60 ^b
萜 烯 类	香茅烯	124-11-8	32.85	3.58	ND	0.29 ± 0.01 ^a	0.18 ± 0.02 ^a	ND	ND
	桉烯	3387-41-5	19.25	2.69	ND	ND	ND	1.17 ± 0.02 ^a	ND
	1-乙基-环己烯	1453-24-3	12.71	2.21	1.09 ± 0.05 ^c	1.08 ± 0.06 ^c	0.89 ± 0.01 ^b	1.27 ± 0.03 ^d	0.68 ± 0.03 ^a
	反-4-辛烯	14850-23-8	9.65	1.65	1.37 ± 0.03 ^b	1.76 ± 0.05 ^c	0.70 ± 0.02 ^a	1.64 ± 0.02 ^{bc}	0.53 ± 0.02 ^a
	5-甲基-4-壬烯	15918-07-7	17.51	1.99	ND	0.55 ± 0.02 ^a	ND	ND	ND
	1-二十二烯	1599-67-3	52.98	1.54	1.75 ± 0.02 ^b	ND	ND	ND	0.25 ± 0.01 ^a
	(E)-3-甲基-2-壬烯	17003-99-5	19.91	2.15	ND	ND	2.40 ± 0.07 ^a	4.45 ± 0.04 ^b	2.68 ± 0.03 ^a
	左旋-β-蒎烯	18172-67-3	19.25	2.73	1.37 ± 0.01	0.71 ± 0.01 ^a	0.84 ± 0.02 ^a	ND	ND
	顺式 α-佛手柑烯	18252-46-5	48.05	2.06	ND	ND	0.12 ± 0.09 ^a	0.26 ± 0.02 ^a	ND
	反式-4-癸烯	19398-89-1	16.45	1.97	0.57 ± 0.01 ^b	ND	0.88 ± 0.02 ^a	ND	ND
	3-乙基-4-辛烯	19781-32-9	17.11	2.03	ND	ND	ND	0.64 ± 0.03 ^a	ND
	顺-2-癸烯	20348-51-0	21.91	2.22	ND	ND	ND	0.50 ± 0.01 ^a	ND
	3-甲基-3-十一烯	23381-94-4	33.78	2.41	0.96 ± 0.03 ^c	0.38 ± 0.02 ^a	0.46 ± 0.02 ^a	0.84 ± 0.02 ^a	0.70 ± 0.01 ^a

续表1

类别	名称	CAS 号	相对含量/%						
			一维保留 时间/min	二维保留 时间/s	原料米糠	烘烤米糠	红外米糠	微波米糠	高压蒸汽米糠
萜烯类	(E)-B- 罗勒烯	3779-61-1	16.45	2.20	ND	0.83 ± 0.02 ^a	ND	1.27 ± 0.07 ^b	0.86 ± 0.02 ^a
	α-蒎烯	3856-25-5	45.65	2.44	0.25 ± 0.02 ^a	ND	0.20 ± 0.01 ^a	ND	0.19 ± 0.02 ^a
	(E)-5-十四烯	41446-66-6	46.31	1.87	ND	ND	0.22 ± 0.01 ^a	0.29 ± 0.01 ^a	ND
	3,5,5-三甲基-1-己烯	4316-65-8	14.45	1.75	ND	0.41 ± 0.01 ^a	ND	0.66 ± 0.05 ^b	ND
	3,7-二甲基-1-辛烯	4984-01-4	16.45	1.93	ND	0.75 ± 0.03 ^a	ND	1.20 ± 0.01 ^b	0.7 ± 0.01 ^a
	3,4-二甲基 -1- 癸烯	50871-03-9	17.91	1.90	ND	ND	ND	3.40 ± 0.19 ^b	2.51 ± 0.21 ^a
	环庚三烯	544-25-2	7.91	2.05	ND	ND	0.53 ± 0.05a	0.41 ± 0.50 ^a	ND
	2,4-二甲基-1-癸烯	55170-80-4	18.98	1.92	ND	ND	2.37 ± 0.03 ^a	ND	9.53 ± 0.03b
	(E)-2,2-二甲基-3-癸烯	55499-02-0	26.45	2.20	0.49 ± 0.02 ^a	ND	ND	ND	ND
	(-)-柠檬烯	5989-54-8	22.85	2.88	2.44 ± 0.02 ^d	0.64 ± 0.03 ^a	1.10 ± 0.05 ^b	ND	1.43 ± 0.03 ^c
	2,3,6-三甲基-4-辛烯	63830-65-9	17.11	2.02	0.54 ± 0.02 ^b	0.35 ± 0.01 ^a	0.51 ± 0.02 ^b	ND	0.39 ± 0.01 ^a
	5-十二烯	7206-28-2	35.11	2.41	1.64 ± 0.02 ^c	0.06 ± 0.01 ^a	ND	0.34 ± 0.02b	0.23 ± 0.02 ^b
	(E)-10-甲基-4-十一烯	74630-60-7	32.85	3.61	0.36 ± 0.04 ^a	0.27 ± 0.03 ^a	ND	ND	ND
	7-甲基-4-十一烯	76441-79-7	18.31	1.79	ND	ND	ND	0.40 ± 0.49 ^a	ND
	螺[2,4]庚-4,6-二烯	765-46-8	23.91	5.98	0.26 ± 0.01 ^a	0.69 ± 0.51 ^b	0.27 ± 0.02 ^a	ND	2.09 ± 0.07 ^c
	乙酰基环己烯	932-66-1	21.65	4.43	ND	ND	ND	ND	2.50 ± 0.02 ^a
	酯类	月桂酸正丁酯	106-18-3	61.65	1.84	0.53 ± 0.02 ^a	ND	ND	ND
水杨酸-2-乙基己基酯; 水杨酸辛酯		118-60-5	58.31	2.27	0.38 ± 0.01 ^a	ND	ND	ND	ND
棕榈酸异丙酯		142-91-6	62.58	1.69	1.57 ± 0.03 ^b	0.13 ± 0.02 ^a	ND	ND	ND
碳酸二乙基己酯		14858-73-2	18.98	1.94	7.41 ± 0.01	ND	ND	ND	ND
非那基二乙酸酯		5062-30-6	18.18	5.34	0.89 ± 0.01 ^b	0.68 ± 0.01 ^a	0.55 ± 0.01 ^a	0.95 ± 0.04 ^b	ND
邻苯二甲酸丁基环己酯		84-64-0	61.38	2.91	ND	ND	ND	0.41 ± 0.01 ^a	ND
邻苯二甲酸二异丁酯		84-69-5	59.51	2.83	2.16 ± 0.03	ND	1.54 ± 0.04 ^a	ND	ND
邻苯二甲酸二丁酯	84-74-2	59.51	2.81	0.93 ± 0.03 ^a	2.10 ± 0.02 ^b	0.77 ± 0.01 ^a	ND	2.27 ± 0.03 ^b	
其他	1-十七炔	26186-00-5	46.98	2.45	ND	ND	ND	ND	0.43 ± 0.02 ^a
	正十八炔	629-89-0	50.58	2.10	ND	ND	ND	ND	0.36 ± 0.01 ^a
	1-十四炔	765-10-6	46.98	2.42	ND	0.27 ± 0.02	ND	ND	ND
	异香兰素	621-59-0	46.58	5.43	ND	ND	ND	ND	0.33 ± 0.01 ^a
	四氢-3-甲基-5-氧 代-2-呋喃羧酸	22073-04-7	19.91	3.36	ND	ND	ND	ND	0.63 ± 0.02 ^a
	吡啶	120-72-9	40.98	0.19	0.74 ± 0.01 ^d	0.13 ± 0.01 ^a	0.35 ± 0.02 ^b	0.51 ± 0.01 ^c	ND
	3,5-二甲基-苯酚	108-68-9	16.58	3.24	ND	ND	ND	ND	0.39 ± 0.02 ^a
	5-乙烯基-2-甲氧基- 苯酚	621-58-9	42.31	5.90	ND	ND	ND	ND	0.43 ± 0.02 ^a
	对乙烯基愈疮木酚	7786-61-0	42.18	6.03	ND	ND	ND	ND	0.64 ± 0.02 ^a
	甘菊蓝	275-51-4	33.38	5.99	ND	ND	ND	1.11 ± 0.05 ^b	1.38 ± 0.02 ^a
茶	91-20-3	33.38	6.04	2.34 ± 0.31 ^c	1.12 ± 0.06 ^b	0.44 ± 0.77 ^a	ND	ND	
2,2,5,5-四甲基四氢呋喃	15045-43-9	18.58	3.76	ND	ND	ND	ND	2.11 ± 0.07 ^a	
2-正戊基呋喃	3777-69-3	20.31	2.91	1.95 ± 0.03 ^c	1.89 ± 0.01 ^b	1.67 ± 0.02 ^a	1.53 ± 0.03 ^a	ND	

注: ND 表示未检出, 下同, 不同小写字母表示有显著性差异 ($P<0.05$), 下同。

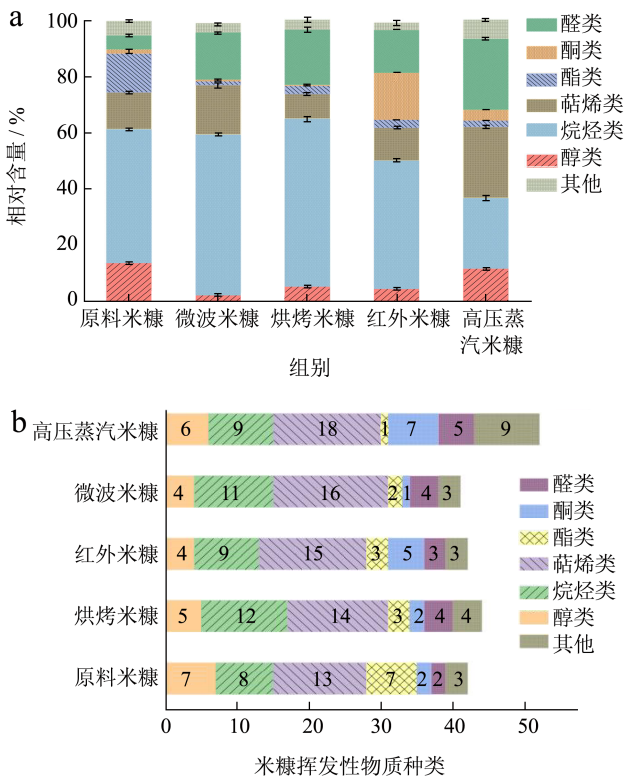


图3 不同处理方式米糠中各类物质相对含量和种类图

Fig.3 The relative content and types of various substances in rice bran with different treatment methods

注：图 3a、3b 分别为不同稳定化方法对米糠挥发性物质相对含量及其种类的影响。

2.3 不同处理方式米糠中潜在差异物质分析

PLS-DA 是一种对复杂数据进行可视化、判别分析和预测的工具。在 PLS-DA 模型中，模型的 R^2 和 Q^2 值越接近 1 时，预测模型的性能越优^[22]。变量重要性投影值（VIP 值）越高，表明该化合物对样品间差异的贡献越大^[21]。如图 4 所示，共有 23 种香气化合物的 VIP 值大于 1，这些化合物可以作为鉴别不同处理方式米糠的特征指标。

PLS-DA 模型的结果为 $R^2X=0.996$, $R^2Y=0.998$, $Q^2=0.912$ 。如图 5 所示，高压蒸汽处理的米糠位于第一象限，红外处理的米糠位于 Y 轴的正半轴上，原料米糠位于第二象限，微波处理米糠位于第三象限，烘烤处理的米糠位于第四象限。这表明不同稳定化处理方式导致了米糠样品中风味物质的显著差异。此外，不同象限的分布表明它们在挥发性风味物质的含量和种类上存在较大差异，分布在同一象限的样品之间差异较小^[23]。

PLS-DA 模型能够有效地识别和分类不同处理方式的米糠样品，并且所筛选出的挥发性物质能够作为区分不同处理方式米糠的关键指标。对 PLS-DA 模型进行验证， $R^2= (0.0, 0.542)$, $Q^2= (0.0, -1.01)$ 。由

图 5 可知， R^2 值均在横轴上方， Q^2 回归线为负数。这表明该模型可靠，相关性较好，能有效拟合数据。PLS-DA 变量的重要性因子（VIP）可以量化每个变量对样品分类的贡献，有助于筛选潜在的差异挥发性物质。VIP>1 的成分被认为是潜在的差异物质，其 VIP 值越大，说明该挥发性成分在不同阶段的差异越显著^[21]。由图 6 可知，以 VIP>1 为筛选标准，确定了不同处理方式米糠有重要贡献的关键差异物质 23 种。这些包括：烷烃类 6 种、酮类 2 种、醇类 2 种、酯类 1 种、萜烯类 10 种和其他类 2 种。

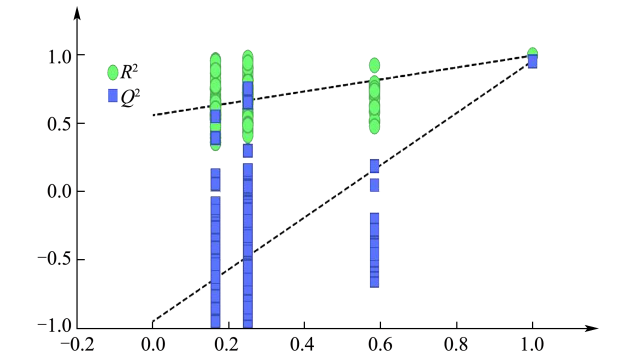


图4 偏最小二乘法模型验证图

Fig.4 Least squares model verification chart

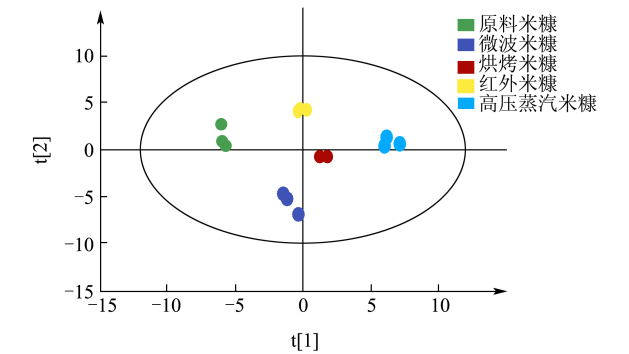


图5 偏最小二乘法得分图

Fig.5 partial least squares score chart

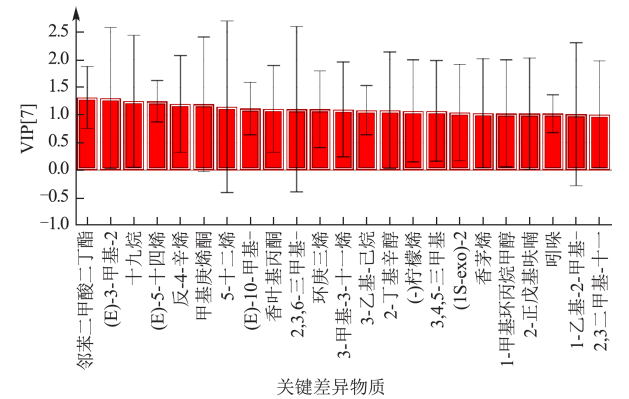


图6 基于偏最小二乘法模型分析的 VIP>1 的分布图

Fig.6 Distribution diagram of VIP > 1 based on partial least squares model analysis

VIP 值大于 1 的挥发性物质的聚类热图，见图 7。Y 轴表示具有差异特征的风味物质，X 轴则为不同稳定化处理的米糠样品。颜色梯度从红色到蓝色，分别表示这些物质的相对含量从低到高。通过热图分析结果可知，原料米糠与微波处理的米糠归为一类，而红外处理米糠和高压蒸汽处理米糠归为另一类，这种分类表明不同稳定化方法对米糠中的挥发性风味物质有显著影响。从差异特征风味物质的数量来看，原料米糠包含 18 种特征风味物质，烘烤米糠、红外米糠、微波米糠和高压蒸汽米糠分别具有 18、17、13 和 16 种，这显示出不同处理方式下，米糠的风味物质种类有所不同。此外，3-乙基-己烷和 2-正戊基呋喃在高压蒸汽处理的米糠中未检测到。经稳定化处理后，米糠中的关键差异风味物质的相对含量显著降低，尤其是香叶基丙酮、(-)-柠檬烯和吲哚的含量大幅下降，如米糠经烘烤处理后 (-)-柠檬烯从 2.44% 降低至 0.64%，而吲哚在高压蒸汽米糠中未被检测到。这可能是由于高温破坏了米糠中的游离氨基酸、碳水化合物，导致这些成分含量减少^[24]。

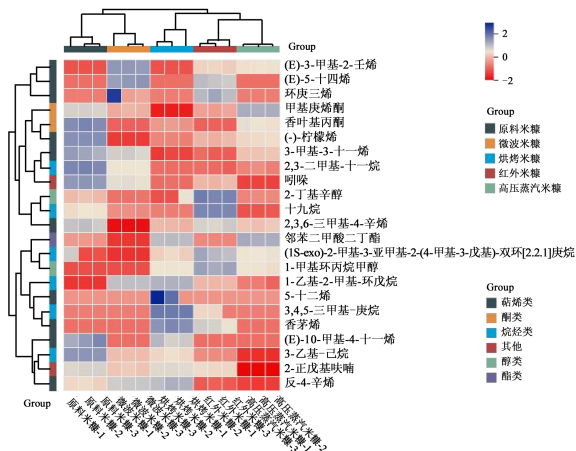


图 7 不同处理方式米糠潜在差异物质的聚类热图分析

Fig.7 Cluster thermal map analysis of potential differential substances of rice bran with different processing methods

2.4 不同稳定化处理方法米糠风味物质ROAV分析

挥发性风味物质对米糠风味的贡献不仅取决于其相对含量，还受到香气阈值的影响^[25]。通过 VIP 值 > 1，从 23 种物质中筛选出 8 种物质的香气阈值，并计算其 ROAV 值。从表 2 可知，ROAV 值 > 1 的物质共有 8 种。此外 ROAV 能够综合风味物质的相对含量和香气阈值，能够有效评估样品中的关键风味化合物^[26]。ROAV 值越高，说明该风味物质对样品整体风味的贡献越大。具体来说，ROAV ≥ 1 的成分被视为样品的关键香气成分，而 0.1 ≤ ROAV < 1 的成分则为对样品总体风味具有重要修饰作用的化合物^[27]。由表 2 可知，在不同稳定化处理方法下的挥发性风味物质 ROAV 存在一定差异。在五组样品中，分别检测出 6、4、7、4 和 4 种 ROAV > 1 的挥发性风味物质，这些物质被认为是米糠的关键挥发性风味物质。

为更直观地展示四个处理组与原料米糠关键挥发性风味物质的重叠情况与相关性，进行了 UpSet 图和弦图分析。如图 8 所示，吲哚和 2-正戊基呋喃是烘烤、红外、微波处理米糠样品中共同存在的呈香物质，特别是吲哚在原料米糠和微波处理米糠中对风味的贡献最大，因此将吲哚定义为原料米糠和微波米糠的关键风味物质 (ROAVmax=100)。然而，吲哚是一种具有刺激性且令人不悦的气味物质，而在高压蒸汽处理的米糠中未检测到这种物质，表明高压蒸汽处理具有除去异味的效果。此外，香茅烯是烘烤米糠和红外处理米糠中贡献较大的关键风味物质，带有柠檬香和果香。而高压蒸汽处理米糠的关键风味物质为甲基庚烯酮，带有柠檬草的清香气息。综上所述，不同稳定化处理对米糠的关键风味物质产生了不同程度的影响，使其风味表现各异。

表 2 不同处理方式米糠风味化合物的阈值及ROAV值

Table 2 Thresh threshold and ROAV value of rice bran-flavored compounds with different treatment methods							
化合物名称	CAS 号	香气阈值/(μg/kg)	ROAV 值				
			原料米糠	烘烤米糠	红外米糠	微波米糠	高压蒸汽米糠
吲哚	120-72-9	0.011	100	11.41	49.49	100	ND
2-正戊基呋喃	3777-69-3	0.27	10.74	6.76	9.62	12.22	ND
甲基庚烯酮	110-93-0	0.05	28.84	ND	17.73	27.18	100
香叶基丙酮	3796-70-1	0.621	1.22	0.17	ND	ND	1.96
香茅烯	124-11-8	0.002 8	ND	100	100	ND	ND
(E)-5-十四烯	41446-66-6	0.06	ND	ND	5.70	10.42	ND
(-)-柠檬烯	5989-54-8	1.04	3.49	0.59	1.65	ND	5.98
邻苯二甲酸二丁酯	84-74-2	0.26	5.32	7.80	4.61	ND	37.96

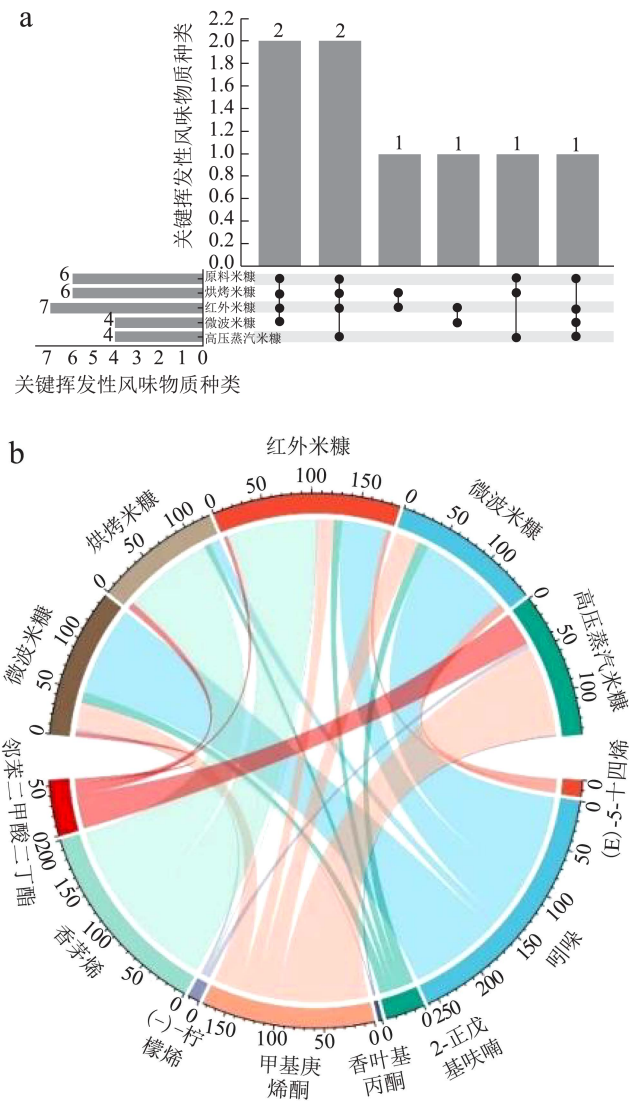


图 8 不同处理方式米糠关键挥发性风味物质分析

Fig.8 Analysis of key volatile flavor substances of rice bran with different treatment methods

注：(a) 关键挥发性风味物质 UpSet 图；(b) 关键挥发性风味物质弦图。

3 结论

该研究采用全二维气相色谱-质谱联用技术 (GC×GC-TOFMS) 和电子鼻技术, 分析了米糠经过四种不同稳定化处理后挥发性风味物质的变化, 并结合 PLS-DA 模型和 ROAV 值分析, 探讨其潜在差异性挥发性风味物质及关键性风味物质。研究结果表明, 通过对电子鼻数据进行主成分分析 (PCA), 发现不同稳定化处理显著影响了米糠的气味特征, 能够有效区分不同处理组。五组样品共检测到 99 种挥发性香气化合物, 包括 6 种醛类、10 种酮类、22 种烷烃类、12 种醇类、28 种萜烯类、8 种酯类及 13 种其他化合物。其中, 烷烃类物质在米糠中的相对含量较大, 而醛类

物质在稳定化处理后显著增加。高压蒸汽处理的米糠检出的挥发性物质种类比其他处理组更加丰富。电子鼻与 GC×GC-TOFMS 的分析结果一致, 均显示原料米糠与红外米糠的气味相似。通过 PLS-DA 分析发现, 米糠在稳定化处理后一些潜在差异性物质的相对含量显著减少, 如 2-正戊基呋喃和 3-乙基-己烷。结合 ROAV 分析发现, 吡嗪在其余四组米糠中 ROAV 值都很高, 而高压蒸汽处理中未检测到吡嗪, 这表明高压蒸汽处理对米糠具有一定的除异味效果。此外, 一些风味物质如庚醛、己醛和壬醛等在稳定化处理后发生了显著增加。这些物质含量的变化为判断米糠风味的改变提供了有力依据。

参考文献

[1] 廖梅吉,敬璞,高霓思,等.热风辅助射频加热对米糠储藏稳定性的影响[J].中国粮油学报,2022,37(3):128-136.

[2] 陈晨,敬璞,王绣珊,等.米糠酸败机制及其稳定化研究进展[J].食品科学,2024,45(13):335-344.

[3] LOPEZ-PERERA P, GUZMAN-ORTIZ F A, ROMAN-GUTIERREZ A D, et al. Bioactive compounds and antioxidant activity of wheat bran and barley husk in the extracts with different polarity [J]. International Journal of Food Properties, 2019, 22(1): 646-658.

[4] 王蕻.不同热处理对青稞酚类物质和风味物质的影响规律及机理探究[D].无锡:江南大学,2023.

[5] 汪新洁,刘凤杰,郑俊,等.不同挤压膨化温度对燕麦片风味成分的影响[J].现代食品科技,2018,34(6):188-196,309.

[6] 杨书林,伞惟琳,任晨刚,等.全谷物风味、口感及货架期提升关键技术研究进展[J].粮食与饲料工业,2022,4:3-6.

[7] DALLVGE J, BEENS J, UDO A. Comprehensive two-dimensional gas chromatography: a powerful and versatile analytical tool [J]. Journal of Chromatography A, 2003, 1000(1-2): 69-108.

[8] ZHU J C, NIU Y, XIAO Z B. Characterization of the key aroma compounds in Laoshan green teas by application of odour activity value (OAV), gas chromatography-mass spectrometry-olfactometry (GC-MS-O) and comprehensive two-dimensional gas chromatography mass spectrometry (GC×GC-qMS) [J]. Food Chemistry, 2021, 339: 1-35.

[9] SHEN C, CAI Y, WU X, et al. Characterization of selected commercially available grilled lamb shashliks based on flavor profiles using GC-MS, GC×GC-TOF-MS, GC-IMS, E-nose and E-tongue combined with chemometrics [J]. Food Chemistry, 2023, 423: 1-11.

[10] 李莉莉,李晓贝,董慧,等.基于顶空固相微萃取-全二维气相色谱-飞行时间质谱技术分析不同干制方式下红托竹荪香气特征[J/OL].食品与发酵工业,1-12[2025-02-26].

[11] 王丽花,张鑫,高晓娟,等.顶空固相微萃取结合全二维气相色谱-飞行时间质谱解析不同类型竹叶青酒中的挥发性组分[J/OL].食品与发酵工业,1-11[2025-02-26].

[12] 朱建才,刘小洁,牛云蔚,等.基于全二维气相色谱-质谱联用技术的龙井茶特征香气成分解析[J].中国食品添加剂,2024, 35(3):229-237.

[13] 曹雪颖,牛云蔚,张超,等.基于全二维气相色谱-质谱法分析中国

- 名优红茶中特征香气成分[J].中国食品添加剂,2024,35(2):272-282.
- [14] 郭诗婕.米糠的稳定化研究及应用[D].长沙:湖南农业大学,2021.
- [15] 胡荣念,王修俊,何春霞,等.青小米辣发酵过程中关键风味物质差异分析[J/OL].食品工业科技,1-17[2025-02-26].
- [16] LI S, LI H, LU L, et al. Analysis of rice characteristic volatiles and their influence on rice aroma [J]. Current Research in Food Science, 2024, 9: 100794.
- [17] 彭凯雄,唐群勇,郑钰涵,等.大米中挥发性风味物质的研究进展[J].食品安全质量检测学报,2022,13(15):4794-4801.
- [18] 高晨.不同稳定化处理的米糠在贮藏过程中风味物质的组成分析[D].无锡:江南大学,2021.
- [19] DUGGAN T, DAWID C, BAUR S, et al. Characterization of bitter and astringent off-taste compounds in potato fibers [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(41): 11524-11534.
- [20] HEINIO R L, NOORT M W J, KATINA K, et al. Sensory characteristics of wholegrain and bran-rich cereal foods-a review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 47: 25-38.
- [21] YE Z, SHANG Z, LI M, et al. Effect of ripening and variety on the physiochemical quality and flavor of fermented Chinese chili pepper (Paojiao) [J]. Food Chemistry, 2022, 368: 1-9.
- [22] GORSKI Ł, SORDON W, CIEPIELA F, et al. Voltammetric classification of ciders with PLS-DA [J]. Talanta, 2016, 146: 231-236.
- [23] BSRRAS E, FERRE J, BOQUE R, et al. Olive oil sensory defects classification with data fusion of instrumental techniques and multivariate analysis (PLS-DA) [J]. Food Chemistry, 2016, 203: 314-322.
- [24] ZHANG J, TONG T, POTCHO P M, et al. Harvest time effects on yield, quality and aroma of fragrant rice [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2021, 40: 2249-2257.
- [25] ZHANG Y, MAO Y, YANG G, et al. Effect of airflow impact milling on the physicochemical properties, microstructure, and flavor of defatted rice bran [J]. Journal of Cereal Science, 2024, 118: 1-9.
- [26] YU X, ZHANG W, XIN L, et al. Evaluation of flavor substances of rice bran kvass based on electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry [J]. Food Chemistry: X, 2024, 21: 1-10.
- [27] ZHAO Q, XUE Y, SHEN Q. Changes in the major aroma-active compounds and taste components of Jasmine rice during storage [J]. Food Research International, 2020, 133: 109160.