

## 酵母发酵对米糠挥发性风味物质及营养特性的影响

廖娟, 殷智华, 李嘉宇, 杨涛

### Effect of Yeast Fermentation on Volatile Flavor Substances and Nutritional Properties of Rice Bran

LIAO Juan, YIN Zhihua, LI Jiayu, and YANG Tao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023010169>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

黑化红枣酒蒸馏过程中主要挥发性风味物质变化及蒸馏工艺研究

Main Volatile Flavor Compounds and Distillation Process during Distillation of Blackened Jujube Wine

食品工业科技. 2020, 41(12): 181-185,213 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.12.029>

罗伊氏乳杆菌对发酵鱼糜挥发性风味物质的影响

Effect of *Lactobacillus reuteri* on Volatile Flavor Compounds of Fermented Surimi

食品工业科技. 2021, 42(12): 240-245 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020070234>

基于感官评价和电子鼻分析不同蒸煮时间荸荠挥发性风味物质

Analysis of Volatile Flavor Substances of Chinese Water Chestnut in Different Steaming and Boiling Time Based on Sensory Evaluation and E-nose

食品工业科技. 2020, 41(15): 1-7,14 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.15.001>

顶空-固相微萃取-气相色谱-质谱联用法分析啤特果挥发性风味物质

Analysis of volatile compounds in Piteguo by headspace-solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry

食品工业科技. 2017(20): 266-270 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.20.047>

基于GC-MS和GC-O的浓香菜籽油特征风味物质分析

Characteristic Flavor Compounds in Fragrant Rapeseed Oil by Gas Chromatography-Mass Spectrometry and Chromatography-Olfactometry

食品工业科技. 2019, 40(1): 239-245 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.01.043>

采石矶茶干营养组成与挥发性风味物质分析

Analysis of Nutritional Composition and Volatile Flavor Substances of Caishiji Dried Soybean Curd

食品工业科技. 2020, 41(10): 1-6 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.10.001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

廖娟, 殷智华, 李嘉宇, 等. 酵母发酵对米糠挥发性风味物质及营养特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(22): 266–274. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023010169

LIAO Juan, YIN Zhihua, LI Jiayu, et al. Effect of Yeast Fermentation on Volatile Flavor Substances and Nutritional Properties of Rice Bran[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(22): 266–274. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023010169

· 分析检测 ·

# 酵母发酵对米糠挥发性风味物质及营养特性的影响

廖娟<sup>1,2</sup>, 殷智华<sup>1,2</sup>, 李嘉宇<sup>1,2</sup>, 杨涛<sup>1,2,\*</sup>

(1. 中南林业科技大学食品科学与工程学院, 湖南长沙 410004;  
2. 稻谷及副产物深加工国家工程研究中心, 湖南长沙 410004)

**摘要:** 为探究酵母发酵对米糠风味以及营养特性的影响。本研究采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱技术鉴定不同发酵时期 (0、12、18、24、30 h) 米糠的挥发性风味物质, 通过正交偏最小二乘分析确定影响米糠发酵前后风味的关键性挥发性物质, 最后对发酵米糠进行了综合感官评价并比较了发酵最佳时间对其营养组成变化。结果表明: 发酵过程中米糠的挥发性物质含量和种类发生明显变化, 未发酵米糠中醛类含量占比 35.99%, 醇类含量占比 14.21%, 发酵 30 h 醛类含量下降到 5.52%, 醇类含量提高到 60.87%。其中关键性挥发性物质共 15 种。在感官评价方面, 关键挥发性物质与米糠香气之间有显著相关性 ( $P < 0.05$  或  $P < 0.01$ ), 发酵后米糠感官评分提高, 发酵 18 h 的米糠感官评分最佳。壬醛、壬酸乙酯对米糠的综合评分影响最为显著 ( $P < 0.01$ )。在营养组成方面, 酵母发酵米糠粉中的蛋白质含量提升了 38.41%, 纤维含量提升了 18.21%。说明酵母发酵不仅能有效改善米糠风味, 还能够提高米糠粉作为食品原料的营养特性。

**关键词:** 米糠, 发酵, 挥发性风味物质, 气相色谱-质谱联用, 感官评价

中图分类号: TS210.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)22-0266-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023010169



本文网刊:

## Effect of Yeast Fermentation on Volatile Flavor Substances and Nutritional Properties of Rice Bran

LIAO Juan<sup>1,2</sup>, YIN Zhihua<sup>1,2</sup>, LI Jiayu<sup>1,2</sup>, YANG Tao<sup>1,2,\*</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China;

2. National Engineering Research Center for Deep Processing of Rice and By-products, Changsha 410004, China)

**Abstract:** To investigate the effect of yeast fermentation on the flavor as well as nutritional properties of rice bran. In this study, volatile flavor substances of rice bran at different fermentation periods (0, 12, 18, 24 and 30 h) were identified by headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, key volatile substances affecting the flavor of rice bran before and after fermentation were determined by orthogonal partial least squares analysis, and finally a comprehensive sensory evaluation of fermented rice bran was carried out and the changes of its nutritional composition by the optimal time of fermentation were compared. The results showed that the content and types of volatile substances of rice bran changed significantly during the fermentation process, the content of aldehydes in unfermented rice bran accounted for 35.99% and the content of alcohols accounted for 14.21%, and the content of aldehydes decreased to 5.52% and the content of alcohols increased to 60.87% at 30 h of fermentation. Among them, there were 15 key volatile substances. In the sensory evaluation, there was a significant ( $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$ ) correlation between key volatile substances and rice bran aroma, and

收稿日期: 2023-02-02

基金项目: 湖南省重点研发计划项目 (2020SK2140)。

作者简介: 廖娟 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 发酵食品, E-mail: 1609076453@qq.com。

\* 通信作者: 杨涛 (1975-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 发酵食品、白酒酿造, E-mail: yangtao807@163.com。

the sensory score of rice bran improved after fermentation, and the best sensory score was obtained for rice bran fermented for 18 h. Nonanal and ethyl nonanoate had the most significant ( $P < 0.01$ ) effects on the overall score of rice bran. In terms of nutritional composition, the protein content of yeast fermented rice bran flour was improved by 38.41% and the fiber content was improved by 18.21%. It indicated that yeast fermentation could not only effectively improve the flavor of rice bran, but also enhance the nutritional properties of rice bran flour as a food ingredient.

**Key words:** rice bran; fermentation; volatile flavor substances; gas chromatography-mass spectrometry; sensory evaluation

米糠是稻谷加工美白、抛光过程中的主要副产物<sup>[1]</sup>。米糠营养均衡, 含有多种天然活性成分, 在降血糖、降血脂, 抗炎、抗氧化, 预防心血管疾病上具有重要作用<sup>[2]</sup>。但因其油脂含量较高, 极易氧化酸败, 产生不良风味, 影响了米糠产品在食品工业中的开发和利用<sup>[3]</sup>, 常被用作饲料和发酵培养基, 或被直接丢弃, 造成资源浪费。改良米糠风味对于促进米糠的加工利用具有重要意义<sup>[4]</sup>。目前米糠的加工方式主要分为理化加工和生物加工。微生物发酵是最常用的米糠生物加工技术, 指利用微生物的代谢作用来分解原料中的有机物, 形成多种具有特殊香气的小分子物质如醇类、酯类等, 从而改善产品风味, 提高产品的营养价值。

微生物发酵被广泛应用在提高稻谷营养价值和功能性中。Zhao 等<sup>[5]</sup>研究发现使用乳酸菌发酵米糠可以增加膳食纤维、降低植酸的含量, 提高营养价值。Astuti 等<sup>[6]</sup>发现少孢根霉固态发酵使米糠挥发性化合物增加了 4 种, 使米糠产生了发酵味, 增强了酸败、烟熏和霉味。Nealon 等<sup>[7]</sup>发现长双歧杆菌发酵的米糠可以调节对肠道和整体健康重要的多种代谢途径。Kim 等<sup>[8]</sup>发现米糠经酵母菌发酵后具有降血压和抗疲劳等功效。冯海燕<sup>[9]</sup>利用高产纤溶酶的枯草芽孢杆菌对米糠进行固态发酵, 提高了纤溶酶的产量, 并降低了抗营养因子植酸的含量, 整体提高米糠的营养价值。然而在已有的微生物发酵米糠研究中, 主要集中在提高米糠的营养价值上, 而对米糠风味的改善方面提及较少, 且一些微生物发酵过程中容易产生异味从而影响米糠的口感和风味。

实验室前期研究发现相比于根霉、乳酸菌发酵, 酵母发酵更适合用于改善米糠风味。本实验以经过稳定化处理的米糠为原材料, 通过酵母对米糠进行发酵, 气相色谱-质谱联用法对米糠发酵过程中的挥发性物质组成和含量进行分析, 结合正交偏最小二乘分析确定影响米糠发酵前后风味的关键性挥发性物质。最后对发酵米糠粉进行感官评价验证和营养组成变化的探究, 为酵母发酵米糠风味研究以及米糠深加工提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

新鲜米糠 湖南省金健米业有限责任公司; 酵母菌粉 安琪酵母股份有限公司; 所有分离用有机溶剂 均为国产分析纯。

GC2030 气相色谱-质谱联用仪 日本岛津公

司; JH-H5 快速水份测定仪 泰州市宜信得仪器仪表有限公司; YXQ-LS-75G 高压灭菌锅 上海博迅医疗生物仪器股份有限公司; B01-10NA 型真空冷冻干燥机 宁波新芝生物科技股份有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 米糠样品制备 按照石海鸽等<sup>[10]</sup>的方法, 将新鲜米糠的水分调整至 24%, 平铺于玻璃培养皿中, 800 w 微波 75 s。冷却, 过 80 目筛, 装入自封袋中真空备用。

1.2.2 发酵米糠样品制备 分别称取 10 g 米糠粉, 加入 15 mL 水, 在 115 °C 灭菌 30 min, 摇散冷却, 接种 1%(w/w)酵母菌、30 °C 发酵 0、12、18、24、30 h, 取样。

1.2.3 顶空-固相微萃取操作方法 参考高晨<sup>[11]</sup>的方法, 称取 2 g 样品装入 20 mL 萃取瓶中, 调节温度为 60 °C, 将 SPME 针头插入顶空瓶中平衡 5 min 后, 轻轻推出纤维头, 保持距样品 1 cm 左右提取挥发性风味成分; 萃取 40 min 后将萃取头轻轻推回, 拔出进样针, 插入 GC 进样口缓慢推出纤维头。解析条件为 250 °C, 无裂解模式解析 5 min。

#### 1.2.4 气相色谱-质谱联用条件

1.2.4.1 色谱条件 色谱柱: DB-WAX; 进样口温度 250 °C; 升温程序: 初始温度 40 °C, 保持 2 min, 以 2 °C/min 升到 120 °C, 再以 5 °C/min 升到 50 °C, 再以 15 °C/min 升到 230 °C, 保持 3 min。

1.2.4.2 质谱条件 电子电离 (Electron Ionization, EI) 源, 电子能量 70 eV; 离子源温度 230 °C, 质量扫描范围 33~400 m/z; 调谐文件为标准调谐; 数据采集为全扫描模式。

1.2.5 感官评价定量描述分析 感官评价定量描述分析 (Quantitative Descriptive Analysis, QDA) 是利用统计方法对感官测得的数据进行分析, 为一种定性定量相结合的描述分析检验方法<sup>[12]</sup>。由 16 名本实验室 (8 名女性, 8 名男性) 经过训练的人员组成感官评价小组, 不同发酵阶段的米糠样品取相等质量于烧杯中, 随机给样品编号, 样品温度和室温均在 20~25 °C, 对样品提出各自的描述词, 经讨论确定样品的感官描述词、定义及参比样的选择和浓度, 最终参比样的选择如表 1 所示, 对评价得分及香气特征描述词进行均一化处理, 处理结果采用雷达图表示。

1.2.6 米糠水分测定 使用水分测定仪对冷冻干燥后的米糠粉进行水分含量的测定, 称取 3.00 g 米糠粉于快速水分测定仪器皿中, 105 °C 干燥至恒重, 记录水分含量。

表1 QDA法确定的描述词及其定义以及参比样  
Table 1 Descriptors determined by the QDA method, their definitions and reference samples

描述词	定义	参比样
酸味	是一种基本味,酸味能给人以口舌生津、刺激的感觉	0.05%(v/v)乳酸溶液=12
酒香	醇类成分呈现的香气特征	15%vol乙醇=12
甜味	是一种基本味,具有糖和蜜一样的味道	2%(w/v)葡萄糖溶液=12
果香	呈现类似果类的香气特征	0.03%(v/v)乙酸乙酯+0.001%(v/v)丁酸乙酯+0.003%(v/v)戊酸乙酯(15%vol乙醇配制)=12
哈喇味	是指被氧化的油类和脂肪的气味特征	0.5%(v/v)C7醛醇-水溶液=12

1.2.7 米糠灰分测定 采用 GB 5009.4-2016 食品中总灰分的测定<sup>[13]</sup>。

1.2.8 膳食纤维含量测定 采用 GB 5009.88-2014 酶重量法进行测定<sup>[14]</sup>。

1.2.9 米糠蛋白质含量测定 采用 GB 5009.5-2016 凯氏定氮法进行测定<sup>[15]</sup>。

1.2.10 米糠淀粉含量测定 采用 GB 5009.9-2016 酶水解法进行测定<sup>[16]</sup>。

1.2.11 米糠脂肪含量测定 采用 GB 5009.6-2016 酸水解法进行测定<sup>[17]</sup>。

### 1.3 数据处理

采用 Origin Pro 2019 软件作图; TBtools 绘制热图; SIMCA14.1 软件进行 PLSDA 分析, 计算预测变量

重要性投影(Variable Importance in Projection, VIP); 并结合 SPSS22.0 软件进行单因素分析, 以  $P < 0.05$ ,  $VIP \geq 1$  为条件筛选差异挥发性组分; 实验均进行 3 次重复。

## 2 结果与分析

### 2.1 发酵过程中米糠挥发性物质的鉴定

为研究酵母发酵对米糠挥发性物质的影响, 利用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱技术对发酵过程中米糠挥发性风味物质及相对含量进行分析鉴定。由表 2 可知, 共检测到 75 种挥发性风味物质, 其中醛类化合物 14 种、酮类化合物 13 种、醇类化合物 17 种、酯类化合物 7 种、烃类化合物 7 种、酸类化合物 6 种和其他类化合物 11 种。

表2 发酵过程中米糠挥发性物质种类及相对含量

Table 2 Types and relative contents of volatile substances in rice bran during fermentation

序号	保留时间 (min)	物质	CAS号	相对含量(%)					P值	VIP
				0 h	12 h	18 h	24 h	30 h		
1	2.156	乙醛	75-07-0	0.74±0.06	4.62±0.01	5.31±0.13	4.28±0.03	2.57±0.12	0.02	1.314
2	3.803	3-甲基丁醛	590-86-3	0.88±0.04	0.47±0.05	0.35±0.02	0.4±0.03	0.24±0.05	0.534	0.636
3	7.656	己醛	66-25-1	10.43±0.16	1.27±0.3	0.35±0.01	0.4±0.01	0.24±0.01	0.02	2.683
4	10.786	庚醛	111-71-7	2.27±0.02	0.73±0.02	0.45±0.06	-	-	0.01	1.599
5	13.881	辛醛	124-13-0	3.32±0.04	1.63±0.05	0.4±0.02	0.6±0.05	0.19±0.02	0.612	0.656
6	14.779	(E)-2-庚烯醛	18829-55-5	1.01±0.08	0.47±0.04	0.4±0.01	0.46±0.04	0.21±0.01	0.115	0.661
7	16.811	壬醛	124-19-6	8.61±0.03	4.03±0.03	1.05±0.02	1.64±0.05	0.98±0.01	0.49	0.651
8	17.599	2-辛烯醛	2363-89-5	0.48±0.01	-	-	-	-	0.001	0.717
9	18.389	糠醛	498-60-2	4.23±0.24	0.75±0.04	0.25±0.01	-	-	0.002	0.673
10	19.244	癸醛	112-31-2	1±0.05	0.61±0.04	0.28±0.03	0.37±0.02	0.26±0.01	0.267	0.651
11	19.625	苯甲醛	100-52-7	1.63±0.02	0.14±0.02	0.13±0.02	0.14±0.02	0.09±0.02	0.038	1.012
12	21.872	苯乙醛	122-78-1	0.36±0.02	0.35±0.03	0.45±0.03	0.49±0.04	0.73±0.07	0.295	1.277
13	24.547	2,4-癸二烯醛	2363-88-4	0.43±0.04	-	-	-	-	0.001	0.718
14	33.694	香兰醛	621-59-0	0.6±0.04	0.33±0.03	-	-	-	0.001	0.688
醛(14)				35.99±0.85	15.41±0.66	9.42±0.36	8.79±0.29	5.52±0.32		
15	2.681	4-羟基-5-甲基-3-丙基-2-己酮	38836-21-4	2.23±0.02	2.07±0.02	2.13±0.03	2.56±0.02	1.73±0.08	0.105	0.715
16	5.009	2,3-丁二酮	431-03-8	0.09±0.01	1.18±0.02	0.7±0.02	0.72±0.12	0.36±0.03	0.064	1.201
17	7.096	2,3-戊二酮	600-14-6	-	0.16±0.03	0.23±0.03	0.2±0.04	0.19±0.03	0.048	1.153
18	9.18	2,3-己二酮	3848-24-6	-	-	0.33±0.02	0.17±0.04	0.24±0.01	0.006	1.212
19	10.684	2-庚酮	110-43-0	-	0.24±0.04	0.63±0.04	0.66±0.11	0.36±0.02	0.011	1.158
20	13.756	2-辛酮	111-13-7	0.07±0.01	0.28±0.02	0.35±0.02	0.34±0.01	0.28±0.03	0.483	0.679
21	14.23	1-辛烯-3-酮	4312-99-6	0.36±0.02	0.16±0.02	-	0.11±0.04	0.09±0.03	0.07	0.702
22	15.25	6-甲基-5-庚烯-2-酮	409-02-9	2.23±0.11	2.05±0.02	2.13±0.01	2.56±0.02	1.73±0.01	0.01	0.730
23	16.692	2-壬酮	821-55-6	-	0.07±0.01	0.13±0.02	0.29±0.03	0.32±0.04	0.046	1.038

续表 2

序号	保留时间 (min)	物质	CAS号	相对含量(%)					P值	VIP
				0 h	12 h	18 h	24 h	30 h		
24	20.973	3,4,4-三甲基-2-环戊烯-1-酮	86702-81-0	0.88±0.04	0.66±0.01	0.3±0.04	0.66±0.11	0.36±0.04	0.046	0.749
25	25.215	6,10-二甲基-(E)-5,9-十一二烯-2-酮	689-67-8	1.07±0.04	0.82±0.13	0.68±0.02	0.86±0.1	0.58±0.07	0.163	0.560
26	27.516	二氢-5-戊基-2(3H)-呋喃酮	33673-62-0	0.14±0.02	0.19±0.01	0.2±0.01	0.29±0.04	0.17±0.03	0.249	0.648
27	28.781	6,10,14-三甲基-2-十五酮	502-69-2	0.07±0.01	0.16±0.01	0.2±0.01	0.2±0.04	0.13±0.04	0.161	0.551
酮(13)				7.13±0.28	8.06±0.34	7.99±0.27	9.62±0.72	6.54±0.46		
28	8.07	2-甲基-1-丙醇	78-83-1	0.5±0.03	2.63±0.04	2.94±0.03	2.94±0.37	3.9±0.04	0.001	1.565
29	8.991	3-甲基-1-丁醇	123-51-3	—	0.05±0.01	0.1±0.01	0.2±0.04	0.56±0.06	0.062	1.224
30	9.619	1-丁醇	71-36-3	—	0.21±0.03	0.43±0.02	0.26±0.04	0.17±0.04	0.088	1.018
31	11.538	1-戊醇	30899-19-5	0.98±0.03	—	—	—	20.67±0.45	0.024	1.392
32	11.542	3-甲基-1-丁醇	123-51-3	2.7±0.14	16.23±0.06	28.8±1.26	31.87±0.73	32.12±1.61	0.003	0.886
33	12.806	1-己醇	30899-19-5	1±0.03	0.8±0.04	0.7±0.03	0.63±0.08	0.36±0.04	0.154	0.703
34	18.22	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	2.7±0.02	1.37±0.01	1.83±0.03	1.81±0.07	2.24±0.1	0.118	1.063
35	18.321	1-庚醇	111-70-6	1.13±0.04	2.05±0.03	1.98±0.02	1.72±0.06	1.2±0.11	0.077	1.355
36	19.079	2-丙基-1-戊醇	58175-57-8	2.03±0.07	1.98±0.02	1.38±0.01	0.8±0.11	0.13±0.06	0.021	0.915
37	19.978	2,3-丁二醇	123513-85-9	—	0.45±0.03	0.53±0.03	0.57±0.05	0.9±0.02	0.049	1.065
38	20.595	1-辛醇	4430-45-9	—	0.33±0.03	0.35±0.04	0.23±0.04	0.32±0.06	0.227	0.941
39	21.451	2-辛烯-1-醇	13175-44-5	0.24±0.02	0.16±0.03	0.23±0.02	0.17±0.01	0.09±0.03	0.208	0.830
40	22.159	3-呋喃甲醇	4412-91-3	1.27±0.02	1.23±0.05	1±0.02	1.12±0.02	0.66±0.07	0.425	0.666
41	22.227	1-壬醇	143-08-8	—	1.04±0.11	1.15±0.04	1.12±0.11	0.43±0.15	0.046	1.017
42	25.454	苯甲醇	100-51-6	0.05±0.02	0.05±0.01	0.18±0.02	0.06±0.01	0.09±0.04	0.171	1.288
43	25.952	苯乙醇	22-25-9	1.66±0.08	1.36±0.03	1.62±0.03	1.79±0.13	3.6±0.12	0.116	1.322
44	30.773	甘油	56-81-5	2.11±0.04	1.01±0.04	2.48±0.06	0.8±0.06	0.92±0.02	0.022	1.474
醇(17)				14.21±0.43	26.96±0.5	41.12±1.61	41.37±1.43	60.87±2.86		
45	3.397	乙酸乙酯	141-78-6	0.41±0.03	1.32±0.02	1.38±0.04	1.23±0.11	1.07±0.06	0.013	1.037
46	7.469	乙酸丁酯	123-86-4	7.66±0.06	1.74±0.01	1.03±0.02	0.55±0.09	0.58±0.15	0.028	0.680
47	12.363	己酸乙酯	123-66-0	1.75±0.04	4.15±0.12	4.01±0.11	4.25±0.17	2.67±0.02	0.131	1.034
48	15.753	甲酸己基酯	24539-57-9	1.92±0.1	3.37±0.17	3.13±0.05	2.12±0.04	1.95±0.12	0.062	1.581
49	20.059	壬酸乙酯	123-29-5	—	0.59±0.03	1.75±0.04	1.06±0.04	0.75±0.01	0.041	1.030
50	20.416	甲酸辛酯	112-32-3	1.92±0.07	1.96±0.03	1.78±0.01	1.75±0.03	1.2±0.03	0.543	0.739
51	24.648	乙酸苯乙酯	103-45-7	1.31±0.03	1.01±0.02	1.28±0.03	0.72±0.02	0.54±0.01	0.294	0.692
酯(7)				14.99±0.33	14.14±0.4	14.35±0.3	11.69±0.5	8.77±0.4		
52	1.96	正己烷	110-54-3	0.4±0.02	—	—	—	—	0.001	0.715
53	2.595	辛烷	111-65-9	0.52±0.01	0.4±0.03	0.28±0.02	0.23±0.01	0.21±0	0.137	0.707
54	5.593	十一烷	1120-21-4	0.88±0.04	1.13±0.04	0.68±0.04	0.72±0.06	0.81±0.03	0.183	1.225
55	6.084	三氯甲烷	8013-54-5	0.76±0.04	0.73±0.02	0.15±0.02	0.49±0.07	0.41±0.06	0.02	0.987
56	6.558	5-(2-甲基丙基)壬烷	62185-53-9	0.45±0.03	0.53±0.31	0.14±0.04	0.14±0.02	—	0.043	0.948
57	8.423	十二烷	93685-81-5	0.29±0.04	0.33±0.02	0.15±0.03	0.23±0.01	0.23±0.01	0.214	0.903
58	18.13	2,3,7-三甲基-癸烷	62238-13-5	—	0.61±0.08	0.33±0.01	0.55±0.03	0.38±0.02	0.063	1.050
烷烃(7)				2.84±3.66	3.2±2.38	1.58±0.12	2.21±0.18	2.03±0.12		
59	18.159	醋酸	64-19-7	1.2±0.02	3.84±0.73	1.03±0.09	4.22±0.68	—	0.056	0.762
60	21.695	丁酸	107-92-6	—	—	—	0.23±0.01	0.34±0.09	0.172	0.809
61	26.551	庚酸	111-14-8	0.31±0.23	0.42±0.04	0.28±0.02	0.37±0.05	0.24±0.03	0.364	0.683
62	27.151	丙酸	753449-67-1	0.45±0.12	0.54±0.2	0.3±0.09	0.46±0.15	0.34±0.19	0.097	0.579
63	29.255	壬酸	112-05-0	1.15±0.53	3.51±0.62	2.23±0.77	1.29±0.32	1.22±0.28	0.215	0.702
64	30.513	正癸酸	334-48-5	0.76±0.03	0.31±0.01	0.3±0.04	0.26±0.3	0.19±0.04	0.145	0.699
酸(6)				3.87±0	8.62±0	4.13±0	6.83±0.3	2.33±0		
65	6.457	甲苯	108-88-3	1.29±0.03	1.63±0.01	—	—	1.71±0.01	0.071	1.484
66	8.967	乙苯	100-41-4	1.5±0.02	1.48±0.02	2.08±0.04	1.72±0.06	1.65±0.04	0.154	1.605
67	9.374	邻二甲苯	95-47-6	2.9±0.45	4.08±0.09	6.16±0.01	4.45±0.13	—	0.064	1.430
68	10.676	间二甲苯	108-38-3	3.3±0.02	3.61±0.11	3.51±0.03	3.19±0.11	2.74±0.09	0.05	1.051

续表 2

序号	保留时间 (min)	物质	CAS号	相对含量(%)					P值	VIP
				0 h	12 h	18 h	24 h	30 h		
69	11.165	D-柠檬烯	5989-27-5	3.18±0.05	0.88±0.01	0.33±0.04	0.25±0.02	0.21±0.01	0.088	0.652
70	12.276	2-戊基呋喃	3777-69-3	7.11±0.1	4.62±0.05	4.63±0.15	4.57±0.02	3.4±0.07	0.077	0.708
71	12.878	苯乙烯	100-42-5	3.04±0.05	4.05±0.18	2.2±0.03	1.75±0.14	1.39±0.01	0.008	1.068
72	13.071	2-甲基吡嗪	109-08-0	0.89±0.01	0.87±0.03	0.6±0.02	0.72±0.03	0.62±0.07	0.179	0.799
73	13.613	乙偶姻	513-86-0	-	2.1±0.03	2.28±0.06	2.12±0.05	1.63±0.03	0.042	1.097
74	23.484	萘	91-20-3	0.95±0.03	0.87±0.03	0.6±0.02	0.72±0.05	0.62±0	0.049	0.770
75	30.857	2,4-双(1,1-二甲乙基)-5-甲基苯酚	497-39-2	-	0.31±0.05	0.25±0.04	0.26±0.02	0.17±0.03	0.384	0.703
其他(11)				20.98±1.64	23.61±2.2	21.41±1.41	19.49±2.42	13.94±0.98		

注:表中数值为平均值±标准差;-表示未检出。

由图 1 可知,未发酵米糠中醛类物质的种类和含量最为丰富,共有 14 种,相对含量占总比例的 35.99%。其中己醛、壬醛的含量最高。随着发酵时间的增加,醛类物质含量呈现明显下降趋势,发酵 30 h 时醛类物质占比 5.52%。醛类物质是由脂质氧化而成的。未发酵米糠中含有大量醛类物质,可能是米糠在生产加工时经过研磨造成米糠发生一定程度的脂肪氧化<sup>[18]</sup>,己醛由脂肪氧化产生,常被视为大米陈化指标,是导致大米不愉快气味的主要原因<sup>[19]</sup>。发酵过程中由于酵母的代谢影响,醛类物质容易发生还原反应形成对应的醇类物质,因此醛的相对含量明显降低。这一结果与 Yi 等<sup>[20]</sup>利用植物乳杆菌发酵米粉 30 h 使醛类物质由 53.6% 降低到 11.2% 相类似,醛类物质由于气味阈值较低,在所有类别中对香气贡献最大。这些醛类物质的减少可以有效降低米糠的难闻气味。

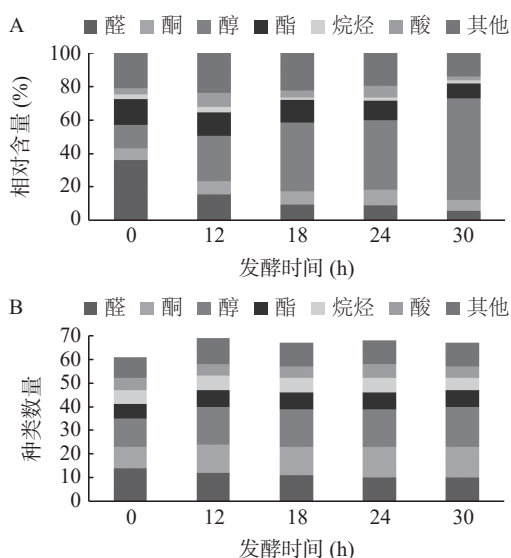


图 1 发酵过程中米糠挥发性物质相对含量变化(A)、种类数量变化(B)

Fig.1 Changes in the relative content of volatile substances of rice bran during fermentation (A) and changes in the number of species (B)

在发酵过程中醇类物质的相对含量逐渐增加,未发酵米糠中的醇类物质占比为 14.21%,发酵 30 h

时米糠中的醇类物质占比达到 60.87%。2-甲基-1-丙醇、1-丁醇、1-庚醇、2,3-丁二醇表现出明显的上升趋势,其中 2,3-丁二醇作为一种天然的芳香剂被描述为水果、奶油、黄油味<sup>[21]</sup>,在未发酵米糠中未检出。未发酵米糠和发酵米糠中醇类物质含量的显著差异可能是由氨基酸代谢或脂肪酸代谢产生,杨艳丽等<sup>[22]</sup>认为某些类型的醛可以在发酵过程中还原为醇或氧化成有机酸,从而导致醇含量增加。醇类物质通常具有较高的阈值,但与香气成分密切相关<sup>[23]</sup>,它们可以与有机酸形成酯类化合物,有利于改善米糠风味特征<sup>[24]</sup>。

随着发酵进行酮类物质的种类由 9 种增加到 13 种。发酵过程中产生的 2,3-戊二酮和 2,3-己二酮,可以赋予米糠黄油焦糖风味<sup>[25]</sup>。酮类物质主要是脂质自动氧化和美拉德反应的产物,具有令人愉悦的气味,如水果味、香蕉味、焦糖味和坚果味<sup>[26]</sup>。发酵过程中酮的种类数量和相对含量提高,可能由醇氧化、酯分解或微生物氧化形成<sup>[27]</sup>。

发酵前后米糠酯类含量变化不显著,但种类增加。发酵过程中产生的壬酸乙酯具有果香及玫瑰样香气的酒香<sup>[28]</sup>,可以改善米糠风味。酯类物质具有果味,主要由醇和脂肪酸酯化形成<sup>[29]</sup>,可以减轻脂肪酸带来的异味。烷烃类物质多数由于石油污染或土壤污染而来,且香气强度弱,对米糠中香气贡献少。酸类物质本实验检出含量少,且多为高沸点直链酸,对米糠香气贡献小。

## 2.2 PLS-DA 模型的建立

为进一步分析发酵过程中的挥发性成分的变化。以 75 个挥发性物质组分作为因变量,不同发酵时间作为自变量,通过 PLS-DA 分析(图 2A),可以实现对不同发酵时间米糠挥发性成分有效区分。本次分析中的自变量拟合指数( $R^2X$ )为 0.85,因变量拟合指数( $R^2Y$ )为 0.99,模型预测指数( $Q^2$ )为 0.937, $R^2$ 和 $Q^2$ 超过 0.5 表示模型拟合结果可接受<sup>[30]</sup>。经过 200 次置换检验(Permutation Test),如图 2B, $Q^2$ 回归线与纵轴的相交点小于零,说明模型不存在过拟合,模型验证有效,认为该结果可用于发酵过程中米糠挥发性成分鉴别分析。

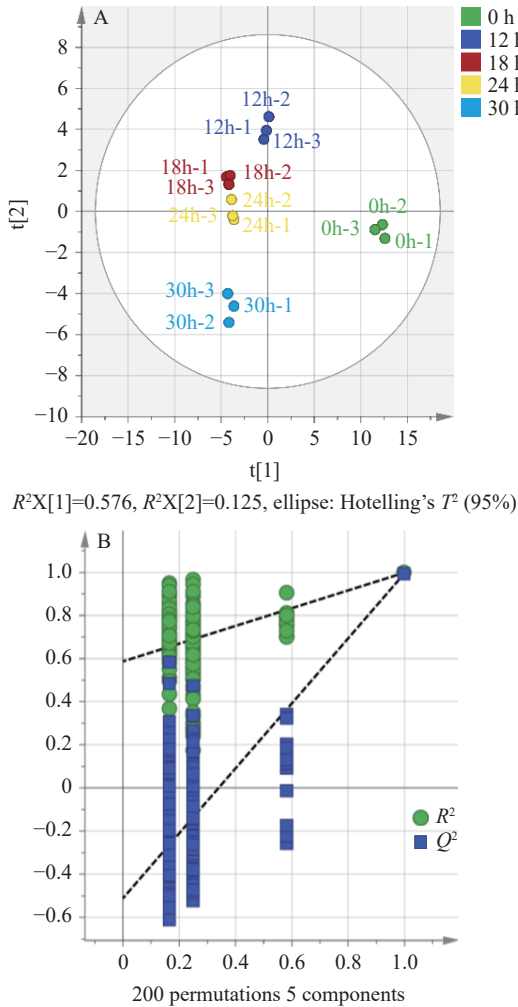


图 2 不同发酵时间米糠挥发性物质 PLS-DA 得分图(A)、模型交叉验证结果(B)

Fig.2 PLS-DA scores of rice bran at different fermentation times (A), model cross-validation results (B)

米糠酵母发酵各个时期主要的挥发性成分在 PLS-DA 图上有明显的区分。未发酵样品位于第四象限, 而发酵后样品位于二、三象限。说明该模型可以对发酵前后米糠挥发性物质进行区分。因此, 本模型对米糠发酵不同阶段的挥发性风味物质具有良好的稳定性和预测性。

为了进一步表征不同发酵阶段米糠样品挥发性化合物之间的差异, 计算并检验了 PLS-DA 模型的变量投影重要性(VIP)得分(见表 2), VIP 值越大, 说明在发酵不同阶段该挥发性化合物的差异越显著。

### 2.3 发酵过程中米糠关键挥发性物质分析

为了进一步分析不同挥发性成分对区分不同发酵时间米糠的贡献率, 选择  $P < 0.05$  且  $VIP > 1$  的物质, 筛选出 15 种发酵过程中米糠的差异挥发性成分, 其中醛类 5 种、酮类 3 种、醇类 4 种、酯类 1 种、其他 2 种。为了更加直接地区分不同发酵阶段下米糠特征挥发性化合物的变化, 依据每种风味物质的相对含量绘制热图, 将不同发酵阶段下米糠样品与 15 种挥发性化合物的关系进行可视化。结果如图 3 所示, 苯甲醛主要由苯丙氨酸降解产生, 具有一

种特殊的苦杏仁味<sup>[31]</sup>, 庚醛有一种强烈的难闻的脂肪气味, 壬醛则呈现脂肪氧化酸败的哈喇味<sup>[32]</sup>。苯乙烯、己醛、苯甲醛、庚醛、壬醛这些带来不愉快气味的物质<sup>[33]</sup>, 随着米糠的发酵, 含量明显降低。2-庚酮、1-壬醇、壬酸乙酯、乙醛、乙偶姻、1-戊醇、2-甲基-1-丙醇、2,3-丁二醇、2,3-戊二酮、2,3-己二酮这些给米糠带来米香、奶油、水果、玫瑰等愉悦气味的物质<sup>[34]</sup>, 随着发酵的进行明显增加。

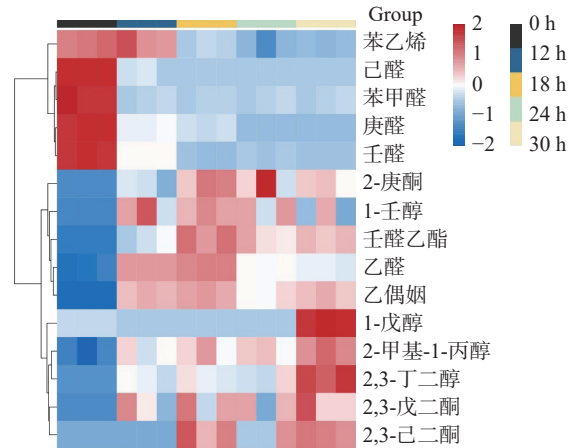


图 3 不同发酵时间米糠关键挥发性物质聚类热图  
Fig.3 Heat map of clustering of key volatiles of rice bran at different fermentation times

### 2.4 发酵对米糠感官评价的影响

对酵母发酵米糠不同发酵时间段的米糠进行 QDA 感官评价, 得到不同发酵时间段的米糠风味剖面图, 图 4 可知, 未发酵米糠具有较强烈的酸味与哈喇味, 异味感较重且无香气, 综合评分很低, 经过发酵后米糠的酸味、哈喇味减弱, 甜香、果香、酒香增强。发酵 18、24、30 h 后的米糠风味剖面图具有一定相似性, 体现在甜香、果香、酒香方面得分突出, 尤其是发酵 18 h 的米糠在甜香、果香方面最为突出, 故发酵 18 h 的米糠在综合评分上获得最高分, 其味道可被大部分小组成员接受, 这一结果与米糠中挥发性物质含量的测定结果一致, 甜味、果香更为突出的发酵 18 h 的米糠其 2-庚酮、1-壬醇、壬酸乙酯、乙偶

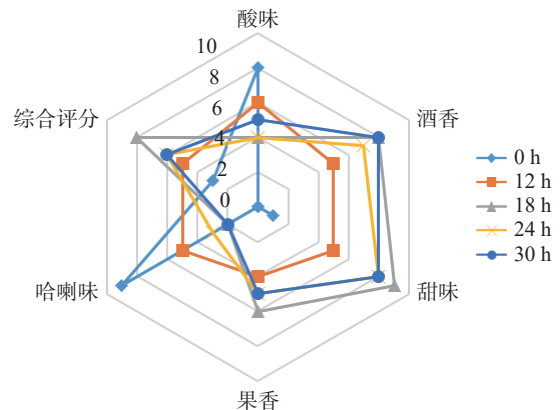


图 4 不同发酵时间米糠感官评价雷达图  
Fig.4 Radar chart for sensory evaluation of rice bran at different fermentation times

姻的含量都高于其他发酵时间米糠。

为了进一步确定挥发性物质和香气之间的关系,使用 Pearson 相关性分析了发酵过程中关键挥发性物质与香气之间的相关性。如表 3 所示,米糠关键挥发性物质和香气描述之间均有较高相关性,说明米糠关键挥发性物质含量的变化对米糠香气的影响显著。其中苯乙烯、己醛、苯甲醛、庚醛与米糠的酸味、哈喇味具有显著正相关性,2-庚酮、壬酸乙酯、乙偶姻、2-甲基-1-丙醇、2,3-丁二醇、2,3-己二酮与米糠的甜味、果香具有显著正相关。壬醛、壬酸乙酯对米糠的综合评分影响最为显著。

表 3 米糠挥发性物质与香气描述之间的相关性分析  
Table 3 Correlation analysis between volatile substances of rice bran and aroma description

Pearson相关性	酸味	酒香	甜味	果香	哈喇味	综合评分
苯乙烯	0.907**	-0.898*	-0.816*	-0.563	0.799**	-0.828**
己醛	0.428	-0.371	-0.258	-0.720**	0.948**	-0.818**
苯甲醛	0.902**	-0.835*	-0.821	-0.686**	0.935**	-0.780**
庚醛	0.883**	-0.507*	-0.905**	-0.715**	0.961**	-0.834**
壬醛	0.720*	-0.951**	-0.238	-0.221*	0.883**	-0.901**
2-庚酮	-0.387	0.839**	0.801**	0.793**	-0.805**	0.757**
1-壬醇	-0.579*	0.537*	0.545*	0.893**	-0.478*	0.556*
壬酸乙酯	-0.907**	0.749**	0.934**	0.913*	-0.954**	0.950**
乙醛	-0.630*	0.902**	0.621*	0.690**	-0.772**	0.681**
乙偶姻	-0.758*	0.817**	0.688*	0.714**	-0.620*	0.799**
1-戊醇	-0.220	0.915**	0.342	0.083	-0.329	0.299
2-甲基-1-丙醇	-0.809**	0.861**	0.853**	0.657**	-0.890**	0.802**
2,3-丁二醇	-0.621*	0.730*	0.909*	0.765**	-0.356	0.672**
2,3-戊二酮	-0.609*	0.653**	0.663**	0.594*	-0.781*	0.645**
2,3-己二酮	-0.723**	0.811*	0.787**	0.811**	-0.736**	0.825**

注:\*\*,在0.01水平(双侧)上显著相关;\* ,在0.05水平(双侧)上显著相关。

## 2.5 发酵对米糠主要营养成分的影响

根据上述结论,将发酵 18 h 的米糠与未发酵米糠主要营养成分对比。表 4 为未发酵和发酵 18 h 米糠的主要营养物质含量比较。从表中可以看出,发酵米糠粉中的膳食纤维含量较未发酵米糠提升了 18.21%,蛋白质含量提升了 38.41%,淀粉含量降低了 29.67%,脂肪含量降低了 26.50%。发酵过程中蛋白质和膳食纤维含量的提升,这一结果也与 Wu<sup>[35]</sup>、Sukma 等<sup>[36]</sup>的研究结果相符合。酵母发酵米糠不仅改善了米糠风味,且米糠蛋白质、膳食纤维含量的显著提升以及脂肪含量的降低还提高了米糠的营养价值。

表 4 发酵前后米糠基本营养物质组成对比(%)  
Table 4 Comparison of basic nutrients in rice bran before and after fermentation (%)

组别	水分	灰分	膳食纤维	蛋白质	淀粉	脂肪
发酵	8.94±0.2 <sup>a</sup>	9.5±0.7 <sup>a</sup>	34.53±1.2 <sup>a</sup>	18.71±0.5 <sup>a</sup>	14.62±0.8 <sup>a</sup>	13.7±0.3 <sup>a</sup>
未发酵	9.15±0.3 <sup>a</sup>	8.62±0.7 <sup>b</sup>	29.21±0.6 <sup>b</sup>	13.59±0.3 <sup>b</sup>	20.79±1.3 <sup>b</sup>	18.64±0.6 <sup>b</sup>

注:表中数值为平均值±标准差;同列不同字母表示有显著差异(P<0.05)。

## 3 结论

本文研究了酵母发酵米糠过程中挥发性风味物质、香气特征以及主要营养成分的变化。结果表明酵母发酵能够改变米糠挥发性物质的组成,米糠中醛类物质含量降低,醇类物质含量增加,发酵后增加了米糠酒香、果香、甜味等香气,提高了米糠综合评分,改善了米糠的风味品质。发酵 18 h 的米糠营养成分组成比例改变,使米糠更具有营养价值。本文还指出了发酵米糠中挥发性物质与香气之间的相关性,发现了对米糠风味影响显著的挥发性物质。这对于从改善米糠风味方面来提高米糠利用价值具有重要意义。未来需要对米糠发酵过程中风味物质的形成机制进一步研究,更好地利用微生物发酵来提高谷物的食用价值和经济价值。

## 参考文献

- [1] 严帝. 稻谷加工工艺改进[J]. 食品安全导刊, 2022(8): 119-121. [YAN Di. Improvement of rice processing technology[J]. China Food Safety Magazine, 2022(8): 119-121.]
- [2] 陈甜妹. 米糠固态发酵工艺优化及其对米糠营养功能特性的影响[D]. 佛山: 佛山科学技术学院, 2020. [CHEN Tianmei. Technological optimization for rice bran solid state fermentation and its effects on the nutritional and functional properties of rice bran[D]. Foshan: Foshan Institute of Science and Technology, 2020.]
- [3] 王盼盼. 食品中蛋白质的功能特性综述[J]. 肉类研究, 2010(5): 62-71. [WANG Panpan. Functionality of Food Protein[J]. Meat Research, 2010(5): 62-71.]
- [4] 常乐. 中日大米及米糠类产品的开发利用进展[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(10): 12-14. [CHANG Le. Development and utilization of rice and rice bran products in China & Japan[J]. Cereals & Oils, 2021, 34(10): 12-14.]
- [5] ZHAO Huimin, GUO Xiaona, ZHU Kexue. Impact of solid state fermentation on nutritional, physical and flavor properties of wheat bran[J]. Food Chemistry, 2017, 217: 28-36.
- [6] ASTUTI R D, FIBRI D L N, HANDOKO D D, et al. The volatile compounds and aroma description in various *Rhizopus oligosporus* solid-state fermented and nonfermented rice bran[J]. Fermentation, 2022, 8(3): 120.
- [7] NEALON N J, PARKER K D, LAHAIE P, et al. Bifidobacterium longum-fermented rice bran and rice bran supplementation affects the gut microbiome and metabolome[J]. Beneficial microbes, 2019, 10(8): 823-839.
- [8] KIM K M, YU K W, KANG D H, et al. Anti-stress and anti-fatigue effect of fermented rice bran[J]. Phytotherapy Research, 2002, 16(7): 700-702.
- [9] 冯海燕. 枯草芽孢杆菌 XZ1125 改善米糠的功能活性成分并提高其营养价值的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012. [FENG Haiyan. Using *Bacillus subtilis* XZ1125 to improve functional components and nutritional value of rice bran[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.]
- [10] 石海鸽, 杨晓清, 周佳倩, 等. 超声波辅助法制备脱脂米糠工艺的优化[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(9): 61-65. [SHI Haige, YANG Xiaqing, ZHOU Jiaqian, et al. Optimization of ultrasonic assisted process for preparing defatted rice bran[J]. Cereals & Oils,



- 2019, 32(9): 61–65. ]
- [ 11 ] 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. [ GAO Chen. Composition analysis of the aroma volatile compounds in different stabilized rice bran during storage[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021. ]
- [ 12 ] SER G. Using generalized procrustes analysis for evaluation of sensory characteristic data of lamb meat[J]. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 2019, 7(6): 840.
- [ 13 ] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 5009.4-2016 食品安全国家标准 食品中灰分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [ National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 5009.4-2016 National food safety standard. Determination of ash in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. ]
- [ 14 ] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 5009.88-2014 食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014. [ National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 5009.88-2014 National food safety standard. Determination of dietary fiber in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014. ]
- [ 15 ] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 5009.5-2016 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [ National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 5009.5-2016 National food safety standard. Determination of protein in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. ]
- [ 16 ] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 5009.9-2016 食品安全国家标准 食品中淀粉的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [ National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 5009.9-2016 National food safety standard. Determination of starch in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. ]
- [ 17 ] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 5009.6-2016 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [ National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 5009.6-2016 National food safety standard. Determination of fat in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016. ]
- [ 18 ] SAHIN A W, COFFEY A, ZANNINI E. Functionalisation of wheat and oat bran using single-strain fermentation and its impact on techno-functional and nutritional properties of biscuits[J]. *European Food Research and Technology*, 2021, 247(7): 1825–1837.
- [ 19 ] TSUZUKI W, SUZUKI Y, YAMADA S, et al. Effect of oxygen absorber on accumulation of free fatty acids in brown rice and whole grain wheat during storage[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 58(1): 222–229.
- [ 20 ] YI Cuping, ZHU Hong, TONG Litao, et al. Volatile profiles of fresh rice noodles fermented with pure and mixed cultures[J]. *Food Research International*, 2019, 119: 152–160.
- [ 21 ] 熊小月, 李利利, 马宇, 等. 酱香白酒酿造轮次醇甜典型体基酒风味解析[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(13): 261–267. [ XIONG Xiaoyue, LI Lili, MA Yu, et al. Flavor analysis of alcohol-sweetness typical body base Baijiu in sauce-flavor Baijiu from fermentation rounds[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(13): 261–267. ]
- [ 22 ] 杨艳丽, 杨宇航, 王璐瑶, 等. 低度柠檬酒在发酵过程中的品质变化[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(17): 108–115. [ YANG Yanli, YANG Yuhang, WANG Luyao, et al. Quality changes of low-alcohol lemon wine during fermentation[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(17): 108–115. ]
- [ 23 ] 黎源, 董涛. 果实香气物质的研究进展[J]. *热带生物学报*, 2013, 4(3): 266–275. [ LI Yuan, DONG Tao. Advances on study of fruit aromatic substances[J]. *Journal of Tropical Biology*, 2013, 4(3): 266–275. ]
- [ 24 ] 袁国亿, 何宇淋, 王春晓, 等. 米酒风味品质形成相关因素的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(9): 286–294. [ YUAN Guoyi, HE Yulin, WANG Chunxiao, et al. Research progress on factors correlated with flavor quality in rice wine[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(9): 286–294. ]
- [ 25 ] WANG Suiqi, CHEN Haitao, SUN Baoguo. Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS)[J]. *Food Chemistry*, 2020, 315: 126–158.
- [ 26 ] LIU Jinguang, LIU Yuqian, JIA Meng, et al. Association of enriched metabolites profile with the corresponding volatile characteristics induced by rice yellowing process[J]. *Food Chemistry*, 2021, 349(2): 129–173.
- [ 27 ] NIU Yunwei, YAO Zhengmin, XIAO Qing, et al. Characterization of the key aroma compounds in different light aroma type Chinese liquors by GC-olfactometry, GC-FPD, quantitative measurements, and aroma recombination[J]. *Food Chemistry*, 2017, 233: 204–215.
- [ 28 ] 张岱, 王方, 王伟, 等. 顶空固相微萃取-气相色谱质谱联用技术比较赤霞珠干化葡萄和干化葡萄酒香气成分[J]. *食品与发酵工业*, 2010, 36(2): 168–171. [ ZHANG Dai, WANG Fang, WANG Wei, et al. Headspace solid phase microextraction-gas chromatography mass spectrometry compared the aroma components of Cabernet Sauvignon dried grapes and dried wines[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2010, 36(2): 168–171. ]
- [ 29 ] 许柠, 张国治, 刘艳香, 等. 全麦挂面特征风味化合物分析[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(6): 47–54, 60. [ XU Ning, ZHANG Guozhi, LIU Yanxiang, et al. Analysis of characteristic flavor compounds in whole wheat noodles[J]. *Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition)*, 2020, 41(6): 47–54, 60. ]
- [ 30 ] 丁习林, 王桂琪, 邹颖玲, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱结合多元统计学分析 KCl 部分替代 NaCl 对宣威火腿挥发性风味化合物的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(24): 190–198. [ DING Xilin, WANG Guiying, ZOU Yingling, et al. Influence of partial replacement of NaCl with KCl on the volatile compounds of Xuanwei Ham investigated by gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with multivariate statistical analysis[J]. *Food Science*, 2020, 41(24): 190–198. ]
- [ 31 ] 赵卿宇, 王占占, 陈博睿, 等. 大米储藏期间风味品质的变化

- 研究[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(6): 203-215. [ ZHAO Qingyu, WANG Zhanzhan, CHEN Borui, et al. Study on the change of flavor quality during rice storage[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(6): 203-215. ]
- [ 32 ] 姜璐, 官璇, 郭梦雪, 等. 不同加工方式对水产品挥发性风味物质影响的研究现状[J]. *广州化工*, 2020, 48(5): 37-41. [ JIANG Lu, GONG Xuan, GUO Mengxue, et al. Research status on influence of different processing methods on volatile flavor substances in aquatic products[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2020, 48(5): 37-41. ]
- [ 33 ] 贾梦, 刘金光, 康学栋, 等. 海南特色米中营养成分及挥发性风味物质的分布特征[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(7): 31-38. [ JIA Meng, LIU Jinguang, KANG Xuedong, et al. Distribution characteristics of the nutrients composition and volatile compounds for the typical rice in Hainan[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(7): 31-38. ]
- [ 34 ] 杨涛, 林亲录. 陈米复鲜研究[J]. *中国食物与营养*, 2005(6): 27-29. [ YANG Tao, LIN Qinlu. Study on the revival of aged rice[J]. *Food and Nutrition in China*, 2005(6): 27-29. ]
- [ 35 ] WU T, DENG C, LUO S, et al. Effect of rice bran on properties of yogurt: Comparison between addition of bran before fermentation and after fermentation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 135: 108122.
- [ 36 ] SUKMA A, JOS B, SUMARDIONO S. Kinetic of biomass growth and protein formation on rice bran fermentation using *Rhizopus oryzae*[J]. *MATEC Web of Conferences*, 2018, 156: 01023.