

不同处理方式对小麦胚芽贮藏稳定性及风味特征的影响

邵子晗, 龚勋, 宋玉, 陶澍, 洪莹, 刘超, 朱佳琪, 汪名春, 曹磊, 叶金侠, 马凯旋

Effects of Different Treatments on Storage Stability and Flavor Characteristics of Wheat Germ

SHAO Zihan, GONG Xun, SONG Yu, TAO Shu, HONG Ying, LIU Chao, ZHU Jiaqi, WANG Mingchun, CAO Lei, YE Jinxia, and MA Kaixuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024050219>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

复合蛋白酶处理对小麦胚芽粉品质特性的影响

Effect of Compound Protease Treatment on the Quality Characteristics of Wheat Germ Powder

食品工业科技. 2022, 43(2): 150-156 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021040095>

不同处理方式对膨化玉米粉结构特性及风味的影响

Effect of Different Treatments on the Structural Properties and Flavor of Extruded Corn Flour

食品工业科技. 2023, 44(16): 59-69 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022100100>

维生素E对 β -胡萝卜素纳米乳液性质及其饮料稳定性的影响

Effects of Vitamin E on the Properties of β -Carotene Nanoemulsions and Beverage Stability

食品工业科技. 2022, 43(6): 56-62 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021070200>

小麦胚芽的营养功能成分及综合利用研究进展

Advances on Nutritional Functional Components and Comprehensive Utilization of Wheat Germ

食品工业科技. 2022, 43(12): 457-467 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021070110>

乳酸菌协同小麦胚芽油发酵对黑曲霉生长活性的影响

Effect of Lactic Acid Bacteria Combined with Wheat Germ Oil Fermentation on the Growth Activity of *Aspergillus niger*

食品工业科技. 2020, 41(19): 144-148,156 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.19.023>

食品运载体系包埋维生素E的研究进展

Research Progress on Vitamin E Embedded in Food Delivery System

食品工业科技. 2023, 44(14): 28-35 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023020255>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

邵子晗, 龚勋, 宋玉, 等. 不同处理方式对小麦胚芽贮藏稳定性及风味特征的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(8): 231–239. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050219

SHAO Zihan, GONG Xun, SONG Yu, et al. Effects of Different Treatments on Storage Stability and Flavor Characteristics of Wheat Germ[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(8): 231–239. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050219

· 工艺技术 ·

不同处理方式对小麦胚芽贮藏稳定性及风味特征的影响

邵子晗^{1,2}, 龚勋^{1,3,*}, 宋玉^{1,2}, 陶澍^{1,2}, 洪莹^{1,2}, 刘超^{1,2}, 朱佳琪^{1,3}, 汪名春^{3,*},
曹磊^{1,2,*}, 叶金侠⁴, 马凯旋⁴

(1. 安徽省农业科学院农产品加工研究所, 安徽合肥 230031;

2. 安徽省食品微生物发酵与功能应用工程实验室, 安徽合肥 230031;

3. 安徽农业大学茶与食品科技学院, 安徽合肥 230031;

4. 安徽雁飞粮油有限责任公司, 安徽蚌埠 233427)

摘要:为研究不同处理方式对小麦胚芽贮藏稳定性及风味特征的影响, 将热风处理和射频处理后的小麦胚芽真空包装后于温度为 40 ℃、湿度为 65% 条件下贮藏, 分析贮藏过程中色差、脂肪酶活性、脂肪酸值、过氧化值、 α -维生素 E 的变化, 并采用电子鼻和固相微萃取气相色谱质谱测定不同处理方式小麦胚芽的挥发性物质, 并进行主成分和正交偏最小二乘法判别进行分析。结果表明, 在最佳处理条件下, 热风处理和射频处理均能够有效地钝化小麦胚芽中的脂肪酶活性, 其中射频处理组钝化脂肪酶效果最佳, 灭酶率最高达到 79.10%, 相比传统热风处理高 12.38%; 热风处理和射频处理均降低了小麦胚芽贮藏期间脂肪酸值 (以氢氧化钠计) 的增加, 未处理、热风 and 射频处理组贮藏 28 d 后脂肪酸值分别增加了 889.81 mg/100 g ($P<0.05$)、37.30 mg/100 g ($P>0.05$) 和 35.58 mg/100 g ($P>0.05$)。热风 and 射频处理后小麦胚芽的 α -维生素 E 分别减少了 11.50% ($P<0.05$)、1.67% ($P>0.05$); 贮藏 28 d 后, 热风 and 射频处理组的 α -维生素 E 分别减少了 3.85% ($P<0.05$)、4.09% ($P<0.05$)。电子鼻和气相色谱质谱联用数据显示经不同处理后的小麦胚芽挥发性物质具有显著差异, 未处理的小麦胚芽原样中正己醇类挥发性物质含量较高, 呈现出青草风味; 热风处理组吡嗪类挥发性物质含量较高, 呈现出烘烤和可可风味; 射频处理显著降低了青草风味, 增加了具有水果香味和甜香等风味。总体来看, 射频处理可以更好的保持小麦胚芽贮藏稳定性, 减少 α -维生素 E 的损失。研究结果可为小麦胚芽类富含脂肪的原料提高贮藏稳定性, 减少营养物质损失提供一种选择和理论参考。

关键词:小麦胚芽, 射频, 脂肪氧化, α -维生素 E, 风味

中图分类号: TS213.3

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2025)08-0231-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050219

本文网刊:



Effects of Different Treatments on Storage Stability and Flavor Characteristics of Wheat Germ

SHAO Zihan^{1,2}, GONG Xun^{1,3,*}, SONG Yu^{1,2}, TAO Shu^{1,2}, HONG Ying^{1,2}, LIU Chao^{1,2}, ZHU Jiaqi^{1,3},
WANG Mingchun^{3,*}, CAO Lei^{1,2,*}, YE Jinxia⁴, MA Kaixuan⁴

(1. Institute of Agro-products Processing, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China;

收稿日期: 2024-05-27 +并列第一作者

基金项目: 2022 年蚌埠市科技计划项目 (2022ny01); 安徽省农业科学院团队项目 (2022YL029); 安徽省自然科学基金面上项目 (2308085MC106); 安徽省高校优秀青年人才支持计划重点项目 (gxyqZD2021095)。

作者简介: 邵子晗 (1996-), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向: 谷物加工, E-mail: 1572121364@qq.com。

龚勋 (1997-), 男, 硕士, 研究方向: 谷物加工, E-mail: 1852836298@qq.com。

* 通信作者: 汪名春 (1982-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品精深加工, E-mail: wmc@ahau.edu.cn。

曹磊 (1980-), 男, 硕士, 副研究员, 研究方向: 谷物加工, E-mail: leicao1008@163.com。

2. Anhui Engineering Laboratory of Food Microbial Fermentation and Functional Application, Hefei 230031, China;

3. College of Tea & Food Science and Technology, Anhui Agricultural University, Hefei 230031, China;

4. Anhui Yanfei Grain and Oil Co., Ltd., Bengbu 233427, China)

Abstract: In order to study the effects of different treatments on the storage stability and flavor characteristics of wheat germ, wheat germ after hot air treatment and radio frequency treatment was vacuum packed and stored at a temperature of 40 °C and a humidity of 65%. The changes of color difference, lipase activity, fatty acid value, peroxidation value and α -vitamin E in wheat germ during storage were monitored. Electronic nose and solid phase microextraction gas chromatography-mass spectrometry were used to determine the volatile substances in wheat germ, and principal component and orthogonal partial least square identification were performed. The results showed that both hot air drying and radio frequency heating could effectively passivate the lipase activity in wheat germ. The radio frequency treatment group had the best deactivation rates, which was up to 79.10%, and it was also 12.38% higher than hot air drying. Both hot air drying and radio frequency heating decreased the increase of fatty acid values (measured by sodium hydroxide) during the storage of wheat germ. After 28 d of storage, the fatty acid values in untreated, the hot air and the radio frequency treatment groups were increased by 889.81 mg/100 g ($P<0.05$), 37.30 mg/100 g ($P>0.05$) and 35.58 mg/100 g ($P>0.05$), respectively. The α -vitamin E content of wheat germ was decreased by 11.50% ($P<0.05$) and 1.67% ($P>0.05$) after hot air and radio frequency treatments, respectively. After 28 d of storage, the α -vitamin E content in the hot air and radio frequency treatment groups were reduced by 3.85% ($P<0.05$) and 4.09% ($P<0.05$), respectively. Electronic nose and gas chromatography mass spectrometry (GC-MS) data showed that there were significant differences of the volatile substances in wheat germ after different treatments. In summary, the untreated wheat germ had a higher concentration of n-hexanol volatile substances and showed a grassy flavor. On the other hand, the content of pyrazine volatile substances were in the hot air treatment group was higher showing more baking and cocoa flavor. Radio frequency treatment significantly reduced the grassy flavor and increased the flavor with fruity and sweet. In general, radio frequency treatment could improve the storage stability of wheat germ and reduce the loss of α -vitamin E. The results could provide a theoretical reference for improving storage stability of fatty raw materials of wheat germ and reducing the loss of nutrient substances.

Key words: wheat germ; radio frequency; fat oxidation; α -vitamin E; flavour

小麦胚芽是小麦加工成面粉过程中的副产物,其约占小麦籽粒质量的 2%~3%^[1],目前主要直接制成小麦胚芽片或制作饼干使用。小麦胚芽富含不饱和脂肪酸、 α -维生素 E 等多种生物活性物质^[2]。但由于其脂肪酶活性较高,因此在贮藏过程中极易发生氧化酸败,导致其品质快速下降,无法继续进行加工利用^[3]。因此,通过适当的手段降低小麦胚芽中酶活性以延缓氧化酸败速度,提高其贮藏稳定性是进行加工利用的前提条件。

目前粮食加工中常用的热稳定化处理方法有微波干燥、红外处理、热风干燥等。微波干燥具有效率高、穿透物料能力强、易于控制等优点,然而,基于物料内部组织结构、形状等差异,微波干燥应用于粮食加工时的主要缺点是局部过热和干燥不均匀^[4]。红外处理具有均匀加热、高可控性等优点,但对粮食中脂肪酶灭活不彻底,在贮藏过程中吸水导致脂肪酶活性激活^[5]。热风干燥是小麦胚芽稳定化处理最常用的手段,其优点在于操作方便简单,缺点是灭酶时容易破坏物料的营养成分^[6]。射频技术作为一种新型的干燥技术,广泛应用于冷冻食品解冻、杀虫、灭酶等方面,其是通过电磁感应使物质吸收射频能量,同时将其转化为热量的一种加热技术^[7]。与传统加热方式如热风处理相比,射频能量的穿透深度更大,可更快速且均匀的加热物料,减少了物料在加热干燥过程中结壳现象的产生,提高了干燥效率和品质^[8];已

有研究表明射频处理可以有效的降低青稞中脂肪酶的活性^[9]。

本试验以小麦胚芽为原料,以未处理小麦为对照,采用热风干燥和射频加热两种技术对小麦胚芽进行稳定化处理,比较其对小麦胚芽贮藏稳定性及其风味特征的影响,为小麦胚芽稳定化处理提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

小麦胚芽(皖垦麦 1506)、聚乙烯包装袋 安徽雁飞粮油有限责任公司提供;乙酸乙酯、磷酸氢二胺、浓硫酸、石油醚、三氯甲烷 均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司;脂肪酶试剂盒 南京建成生物工程研究所; α -维生素 E 标准品 色谱纯,西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司;DB-WAX 毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.25 μ m) 安捷伦科技(中国)有限公司;Symmetry Shield RP 18 液相色谱柱(5 μ m, 4.6 mm×250 mm) 沃特世科技(上海)有限公司。

DHG-9070A 电热恒温鼓风干燥箱 上海一恒科学仪器有限公司;YKHS-300L 恒温恒湿培养箱 合肥佑科仪器设备有限公司;CR-410 色差仪 日本柯尼卡-美能达公司;LC-20A 高效液相色谱仪、GC-MS-QP2020NX 气相色谱质谱联用仪 岛津(香港)有限公司;PEN3 电子鼻 德国 AIRSENSE 公司;HGJL-10RFS 高频真空介质加热射频装置 哈

工金浪装备科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品处理 以热风 and 射频处理后的小麦胚芽脂肪酶活性为指标,通过预实验确定两者的最适参数作为本试验的参数。热风处理法:取一定量新鲜小麦胚芽置于带孔托盘内,厚度 1 cm,150 ℃ 处理 45 min;射频处理法:取一定量新鲜小麦胚芽置于射频专用盒内,厚度 5 cm,射频极板间距为 9 cm,100 ℃ 处理 15 min。将不同方式处理后的小麦胚芽装入聚乙烯(厚度为 0.24 mm)包装袋,真空密封后在恒温恒湿培养箱中贮藏,贮藏温度为 40 ℃、湿度为 65%;每隔 7 d 取出进行指标测定,共贮藏 28 d^[10];以未处理的新鲜小麦胚芽为对照组。

1.2.2 色差测定 使用色差仪对小麦胚芽表面色泽进行测定,记录亮度(L^*)、红色/绿色($+a^* / -a^*$),以及黄色/蓝色($+b^* / -b^*$)。以原样 0 d 为对照样,其数值记为 L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* ,按下列公式计算 $\Delta E^{[11]}$ 。

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

1.2.3 脂肪酶活性测定 脂肪酶活性测定采用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒,按照说明书进行测定。

1.2.4 脂肪酸值和过氧化值测定 脂肪酸值参照 GB/T 15684-2015《谷物碾磨制品 脂肪酸值的测定》测定^[12];过氧化值参照 GB 5009.227-2016《食品中过氧化值的测定》测定^[13]。

1.2.5 α -维生素 E 提取与测定 根据国标 GB 5009.82-2016《食品安全国家标准 食品中维生素 A、D、E 的测定》和文献方法对 α -维生素 E 进行提取与测定^[14-15]。称取 2 g 小麦胚芽样品,加入 1 g 抗坏血酸和 20 mL 纯水混匀,再加入 30 mL 无水乙醇,随后加入 15 mL 氢氧化钾(50 g/100 g)溶液,混匀后在水浴锅中 80 ℃ 振荡 30 min 进行皂化。皂化完成后使用石油醚进行萃取,萃取液经纯水洗涤后旋蒸干燥,用甲醇分次将蒸发瓶中残留物溶解并定容,过 0.45 μm 有机滤膜后使用,提取液即配即用。色谱条件为:色谱柱型号为 Symmetry Shield RP 18(5 μm , 4.6 mm $\times$ 250 mm),使用 SPD-M40 阵列二极管检测器进行测定,检测波长 294 nm;流动相为甲醇和超纯水(0 min 96:4, 13 min 96:4, 20 min 100:0, 24 min 100:0, 24.5 min 96:4, 30 min 96:4)进行梯度洗脱,流速 0.8 mL/min,柱温 40 ℃,进样量为 20 μL 。

1.2.6 风味物质测定

1.2.6.1 电子鼻法测定 称取 2 g 小麦胚芽样品于 20 mL 顶空瓶中,并置于 50 ℃ 恒温水浴锅中静置 30 min 后进行电子鼻检测。参数设定:清洗时间 80 s,气体流速 400 mL/min,数据采集时间为 100 s。采用电子鼻内置程序 Win Muster 对数据进行处理得到不同传感器响应值,传感器名称及敏感化合物如表 1 所示^[16]。

表 1 电子鼻不同传感器敏感化合物

Table 1 Different sensors used in an electronic nose for detecting substances

传感器名称	敏感化合物
W1C	芳香类化合物
W5S	氮氧化合物
W3C	氨类,芳香类化合物
W6S	氢化物,氢气
W5C	短链烷烃,芳香类化合物
W1S	甲烷等短链烷烃
W1W	无机硫化物
W2S	醇醚醛酮类
W2W	芳香化合物,有机硫化物
W3S	长链烷烃类

1.2.6.2 GC-MS 法测定 将一定质量的小麦胚芽样品放入富集瓶中,加 10 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 氘代氯苯 10 μL 为内标,60 ℃ 水浴加热,用活化后的 SPME 针头(StableFlexTM/SS, 1 cm)顶空吸附 40 min,然后立即将 SPME 针头插入气相色谱进样口进行热解析 5 min。色谱条件:使用 DB-WAX 毛细管柱(30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm)对样品进行分离;进样口温度 250 ℃,载气为氦气,流速为 1.6 mL/min;升温程序:起始温度 35 ℃,保留 5 min,以 10 ℃/min 升温至 85 ℃ 保留 1 min,然后以 4 ℃/min 升温至 200 ℃,保留 3 min,最后以 10 ℃/min 升温至 230 ℃,保留 1 min。质谱条件:EI 电离源,电子轰击能量 70 eV;离子源温度 250 ℃,传输线温度 280 ℃;质谱采用全扫描监测模式。依据所获取的色谱图质谱信息,经 NIST20-1、NIST20-2、NIST20-s 标准谱库检索定性,相似度大于 85 为有效成分。依据峰面积归一化法得到各成分在不同小麦胚芽样品挥发性组分中的相对含量^[17]。

1.3 数据处理

所有试验数据均进行 3 次重复,使用 SPSS 25 数据分析软件进行数据的显著性分析,不同字母表示显著性差异($P < 0.05$),采用 Origin 2021 和 Simca 14.1 进行分析作图。

2 结果与分析

2.1 不同处理方式下小麦胚芽贮藏期内色差的变化

不同处理方式对小麦胚芽色差的影响如图 1 所示,相对于小麦胚芽原样,热风处理后的 L^* 显著下降($P < 0.05$), a^* 和 b^* 显著升高($P < 0.05$);射频处理后的 L^* 和 a^* 显著下降($P < 0.05$), b^* 显著上升($P < 0.05$),可能是因为热风处理和射频处理过程中的热效应引发美拉德反应所致^[18];在贮藏过程中原样色泽产生变化较为明显的原因可能是在高温贮藏过程中,小麦胚芽原样中酶和微生物活性较高,产生褐变或微生物酵解导致,而热风处理和射频处理的小麦胚芽处于较为稳定的状态,无显著色泽变化。 ΔE 表示色泽的稳定性,在贮藏过程中小麦胚芽原样的 ΔE 变化显著($P <$

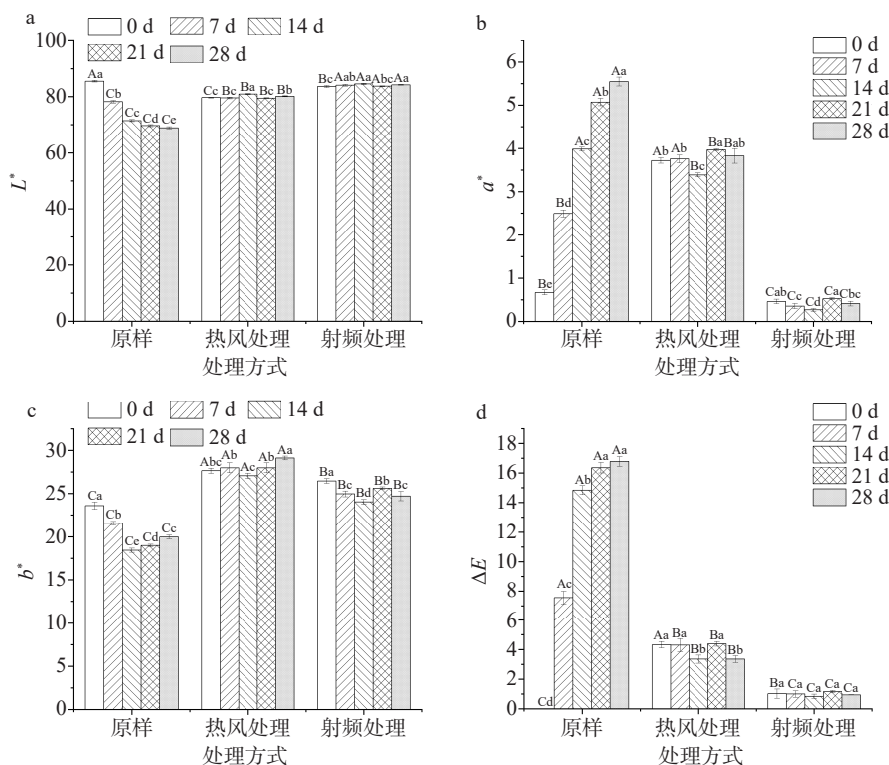


图1 不同处理方式对小麦胚芽色差影响

Fig.1 Effect of different treatments on color differences of wheat germ

注: a. L^* ; b. a^* ; c. b^* ; d. ΔE ; 不同大写字母表示相同贮藏时间不同处理组之间差异显著($P < 0.05$); 不同小写字母表示同一处理组不同贮藏时间差异显著($P < 0.05$), 图2~图4同。

0.05), 贮藏 28 d 后由 0 增加至 16.78; 热风 and 射频处理组整体呈稳定趋势, 其中射频处理组的 ΔE 变化幅度小于热风处理组, 这主要是由于射频处理过程中的非热效应增加了蛋白质折叠, 抑制美拉德反应导致^[19]。综上所述, 射频处理和热风处理可以显著减缓小麦胚芽贮藏过程中色泽的变化程度, 其中射频处理可以更好的保持小麦胚芽色泽的稳定性。

2.2 不同处理方式下小麦胚芽贮藏期内脂肪酶的变化

如图2所示, 0 d 时热风和射频的脂肪酶活性只有同期原样的 33.28% 和 20.90%, 贮藏 28 d 后热风和射频处理组的脂肪酶活性下降至 28.31% 和 9.84%。不同处理方法均能够有效地对小麦胚芽中的脂肪酶起到钝化作用, 其中射频处理钝化效果优于

热风处理, 可能是由于热风干燥的传热方式为对流传热, 传热效率低, 食品内部导热系数低和水分传递效果差等因素^[20-21]; 射频处理具有快速和体积加热的特点, 且加热均匀和穿透性好, 酶钝化效果更彻底, 因此呈现一直下降的趋势^[22]。脂肪酶活性的变化可能与脂肪酸的变化有关, 贮藏期间游离脂肪酸的不断积累会导致小麦胚芽 pH 降低, 当低于脂肪酶的最适 pH 时, 其活性受到抑制, 脂肪酸进一步氧化消耗会使 pH 升高, 当达到脂肪酶最适 pH 时, 其活性又会升高^[23]。综上所述, 射频处理具有更好的酶钝化效率和贮藏稳定性。

2.3 不同处理下小麦胚芽贮藏期内脂肪酸值和过氧化值的变化

脂肪酸值反映了小麦胚芽的酸败程度, 是判断其贮藏的关键指标。如图3所示, 随贮藏时间的增加, 未处理的小麦胚芽脂肪酸值(以氢氧化钠计)从 110.23 上升至 1000.04 mg/100 g NaOH, 呈显著上升趋势($P < 0.05$); 而经过不同方式处理的小麦胚芽脂肪酸值随着时间增加增长缓慢, 与 0 d 的脂肪酸值相比, 热风和射频处理组的脂肪酸值最大变化量只有 37.30 mg/100 g 和 35.58 mg/100 g。脂肪酸值的上升程度反映出不同处理条件下的小麦胚芽贮藏稳定性, 相对未处理小麦胚芽, 热风和射频处理后的小麦胚芽具有较好的贮藏稳定性, 这主要是由于不同处理后的小麦胚芽脂肪酶受到了较大程度的抑制, 水分活度也有不同程度的下降, 抑制了脂肪酸败。

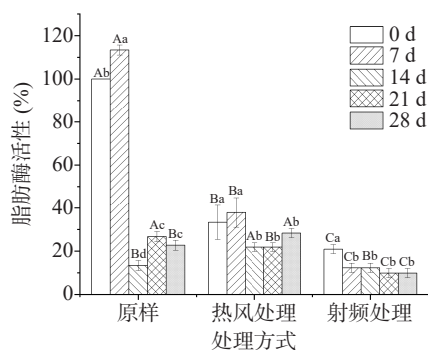


图2 不同处理方式对小麦胚芽脂肪酶活性的影响

Fig.2 Effect of different treatments on lipase activity of wheat germ

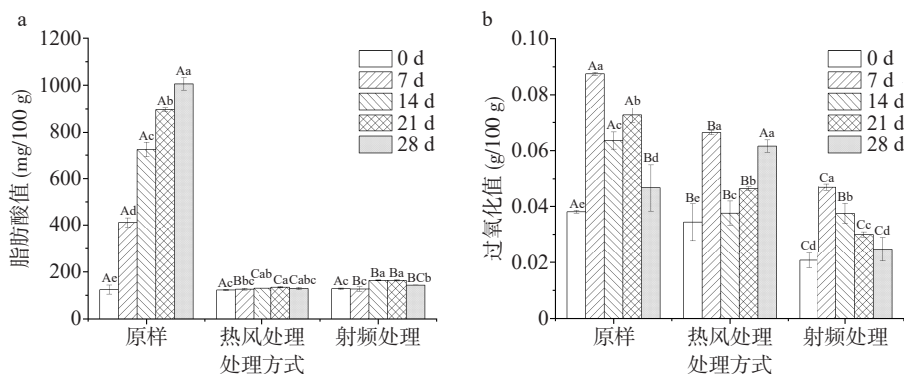


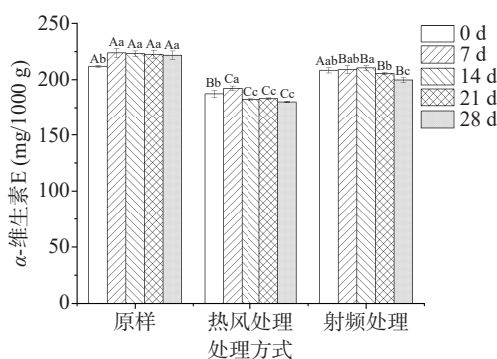
图 3 不同处理方式对小麦胚芽脂肪酸值(a)和过氧化值(b)的影响

Fig.3 Effect of different treatments on fatty acid value (a) and peroxide value (b) of wheat germ

过氧化值是反映油脂氧化程度的参数,即初级氧化的程度。由图 3 可知,原样、热风处理、射频处理组的小麦胚芽均在 7 d 时达到最高值,分别为 0.087、0.066、0.047 g/100 g,且各组之间均有显著差异($P<0.05$),随后不同样品过氧化值均呈现下降趋势,但原样和热风处理在 21 d 时呈上升趋势。原因可能是不同处理的小麦胚芽贮藏前期先氧化,过氧化值持续升高;后在持续氧化过程中初级氧化产物再分解导致下降;而在贮藏后期,微生物繁殖产生过氧化物导致再次上升^[22];而射频具有良好的杀菌效果,有文献报道其在预包装食品中具有较好的杀菌效果,因此过氧化值后期依然呈现下降趋势^[24]。综上所述,贮藏期间相对于未处理小麦胚芽,热风处理和射频处理组的过氧化值有较低的峰值和较小的波动,说明处理后的小麦胚芽具有更好的贮藏稳定性,其中射频处理后的小麦胚芽贮藏稳定性优于热风处理。

2.4 不同处理下小麦胚芽贮藏期内 α -维生素 E 的变化

α -维生素 E 是小麦胚芽中最主要功能性成分之一^[25]。如图 4 所示,相较于未处理组经过热风处理后小麦胚芽 α -维生素 E 显著下降 16.03%($P<0.05$),而射频处理组与未处理的新鲜小麦胚芽中 α -维生素 E 无显著性差异($P>0.05$),这主要是由于热风处理的高温会导致小麦胚芽中的 α -维生素 E 含量降低,而射频处理可以有效保护物料中的活性成分。随着贮藏时间的增加,原样中的 α -维生素 E 含量先上升后

图 4 不同处理方式对小麦胚芽 α -维生素 E 的影响Fig.4 Effect of different treatments on α -vitamin E of wheat germ

平稳趋势,这可能是由于新鲜小麦胚芽在贮藏过程中氧化酸败变化程度较大,细胞壁被破坏, α -维生素 E 与蛋白等物质共价键被破坏,促进 α -维生素 E 释放变多导致^[26-27];热风处理组小麦胚芽中的 α -维生素 E 含量呈现先上升后下降的趋势,射频处理组处于一直下降的趋势,但贮藏 28 d 后射频组的 α -维生素 E 含量高于热风处理组 12.86%($P<0.05$)。其原因可能是热风处理中高温使 α -维生素 E 与脂质自由基氧化反应 α -生育氢醌,而 α -生育氢醌可作为还原剂将 α -维生素 E 自由基还原为 α -维生素 E^[28],后随着贮藏时间的延长逐渐消耗氧化 α -维生素 E 导致其下降。结果表明,相对热风,射频处理可以有效的保护小麦胚芽内 α -维生素 E 的活性。

2.5 不同处理下小麦胚芽贮藏期内风味物质的变化

电子鼻可以有效捕捉样品的挥发性成分,对其差异性成分进行分析^[29]。由图 5 可以看出,原样、热风处理、射频处理的三组的挥发性物质在 W1W、W2W、W1S、W2S 和 W5S 传感器的响应值较高,其所对应的风味物质种类分别为无机硫化物、芳香成分和有机硫化物、烷类、醇类和醛酮类、氮氧化合物。未处理组小麦胚芽原样在 W1W、W2W、W1S 和 W2S 的响应值均强于热风及射频处理组小麦胚芽;未处理组小麦胚芽原样在 W5S 的响应值介于热风 and 射频处理组之间,热风处理组小麦胚芽在 W1W 的响应值强于射频处理组。热风 and 射频处理

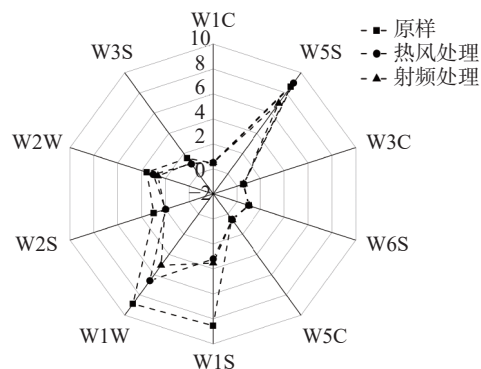


图 5 不同处理方式小麦胚芽风味物质电子鼻分析结果

Fig.5 Results of electronic nose analysis of flavor substances in wheat germ with different treatments

组小麦胚芽的电子鼻传感器雷达图中总峰面积减小,说明小麦胚芽经过热风处理和射频处理后的挥发性风味物质与未处理小麦胚芽原样有一定差异。

对三种处理方式的小麦胚芽电子鼻数据进行主成分分析,具体见图6。由图可以看出主成分1的贡献率为90.40%,主成分2的贡献率为9.40%,总成分贡献率99.80%,大于85.00%,说明该结果能够准确反映出样品的主要信息,可以很好的表征各样品间差异性。图中三种处理方式样品的挥发性物质95%置信区间区域无重叠现象,说明三种样品的风味物质类型具有差异。

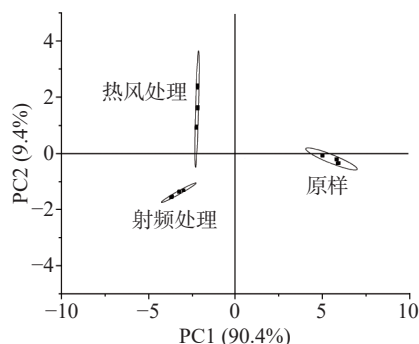


图6 不同处理方式小麦胚芽风味物质电子鼻主成分分析
Fig.6 Electronic nose principal component analysis of wheat germ flavor substances in different treatments

通过变量投影重要性分析值(Variable importance in project, VIP)可以得到表征不同样品差异性的标志物,如图7所示。VIP值大于1说明该物质为可以表达样品间差异的标志物,即W1S(烷类),W5S(氮氧化合物)和W1W(无机硫化物)三类物质可以作为区别不同处理方式小麦胚芽的标志性物质。

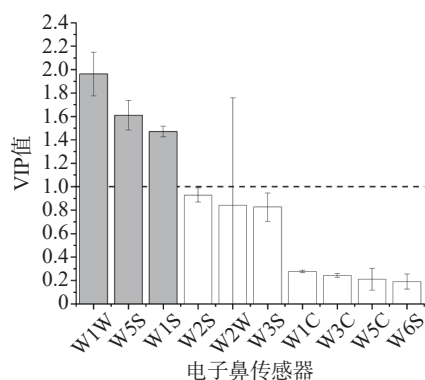


图7 不同处理方式小麦胚芽风味物质变量投影重要性分析
Fig.7 Projected importance analysis of wheat germ flavor substances under different treatments

通过顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用(Headspace-solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)对不同方式处理后的小麦胚芽风味物质成分进行鉴定。一共鉴定出92种出现较为稳定的风味物质,主要包括15种醇、8种醛、8种烯、15种酯、28种烷

烃、3种酮、2种酸、1种呋喃、5种吡嗪和7种其他风味物质。为分析不同处理方式后小麦胚芽的风味物质差异,以各风味物质的相对含量绘制风味物质层次聚类热图,结果如图8所示。整体风味物质分为三大簇,其中第一簇物质在射频处理后的小麦胚芽中含量较高;第二簇物质在未处理的小麦胚芽原样中含量较多;而第三簇物质在热风处理后含量较高;热图中三组样品有部分重叠,说明部分风味物质没有发生改变。整体结果说明热风和射频处理后风味物质发生了显著变化,而不同方式处理后的小麦胚芽风味也有显著差异。

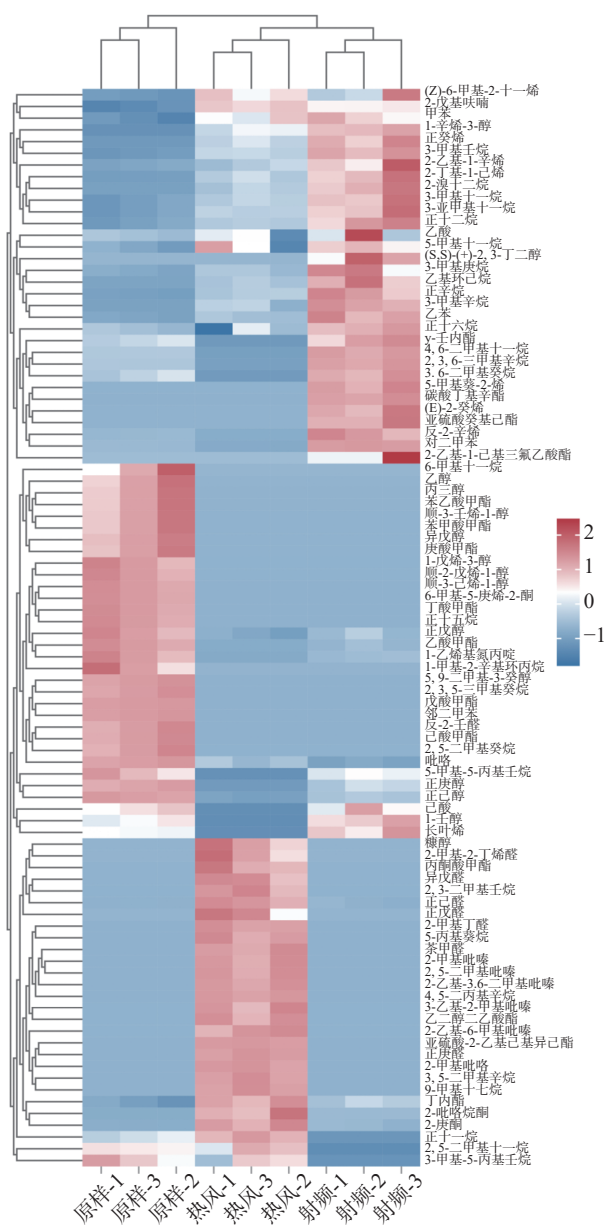


图8 不同处理小麦胚芽风味物质层次聚类热图
Fig.8 Hierarchical clustering heat map of wheat germ flavor substances in different treatments

如图9所示,热风处理组小麦胚芽有较多的吡嗪类、酮类和醛类物质,这三种物质是烘烤后的特征物质,呈现出烘烤香味;其中酮是由糖的热降解形成的,可以增强风味的物质;醛类主要来源于脂质氧化

表 2 基于 VIP 值的重要影响风味物质含量及风味描述
Table 2 Content and flavor description of important flavor substances based on VIP value

化合物名称	VIP值	峰面积(%)			风味描述
		原样	热风处理	射频处理	
正己醇	2.91026	19.13±0.50 ^a	0.66±0.30 ^c	5.45±0.51 ^b	树脂, 青草 ^[17]
正十一烷	2.42074	5.56±1.12 ^b	11.36±0.94 ^a	ND	
对二甲苯	2.26261	1.32±0.04 ^b	0.33±0.04 ^c	9.46±0.09 ^a	
正辛烷	2.12598	3.16±0.10 ^c	6.00±0.33 ^b	12.50±1.66 ^a	甜香 ^[31]
正己醛	2.11504	0.59±0.02 ^b	8.50±0.83 ^a	0.65±0.22 ^b	
甲苯	2.03536	8.61±0.89 ^b	16.11±1.76 ^a	17.67±1.69 ^a	
3-甲基壬烷	1.9285	3.75±0.20 ^c	6.98±0.26 ^b	11.61±0.78 ^a	酒味, 辛辣 ^[32]
乙醇	1.80409	6.65±1.87	ND	ND	
2,5-二甲基吡嗪	1.50556	ND	3.97±0.36	ND	
己酸甲酯	1.50458	4.48±0.46	ND	ND	水果, 新鲜 ^[33]
2-乙基-3,6-二甲基吡嗪	1.33939	ND	3.14±0.20	ND	
2-甲基丁醛	1.29292	ND	2.93±0.18	ND	
苯甲醛	1.25998	ND	2.78±0.25	ND	咖啡, 可可 ^[35]
3-甲基十一烷	1.15427	0.99±0.18 ^c	1.99±0.13 ^b	3.84±0.71 ^a	
正十二烷	1.10799	0.49±0.18 ^c	1.28±0.05 ^b	3.07±0.58 ^a	
异戊醛	1.06918	ND	2.03±0.36	ND	可可 ^[33]
1-戊烯-3-醇	0.88648	1.57±0.23	ND	ND	
顺-2-戊烯-1-醇	0.80506	1.29±0.16	ND	ND	

注: 同行不同小写字母表示数据差异显著(P<0.05)。

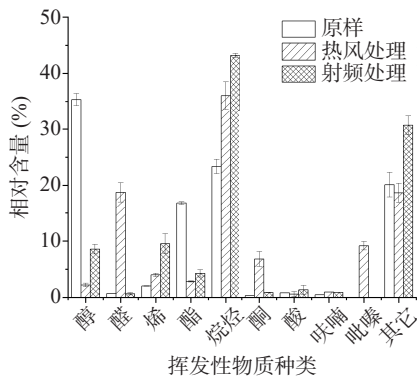


图 9 不同处理小麦胚芽各类风味物质分布比例
Fig.9 Distributionproportion of various flavor substances in wheat germ under different treatments

和氨基酸降解产生; 这些风味物质的变化可能与热风处理引起的美拉德反应和热降解有关^[30]。射频处理组小麦胚芽中芳香烃和烷烃类物质增多、醇类物质减少, 其中醇类物质一般是呈现青草味, 这表明射频处理小麦胚芽后产生了更多的甜香味、减轻了青草味。

根据最小偏二乘法回归方程 (Partial least squares regression, PLSR) 计算 VIP 值大于 1 的有效挥发性风味物质和具有显著差异的风味物质, 结果如表 2 所示, 相关载荷数据如图 10 所示。未处理的小麦胚芽原样中含有大量的正己醇、1-戊烯-3-醇、顺-2-戊烯-1-醇等物质, 呈现出青草风味; 射频处理组的小麦胚芽中对二甲苯、3-甲基十一烷等物质含量上升, 呈现出甜香风味; 热风处理组含有大量的 2,5-二甲基吡嗪、2-乙基-3,6-二甲基吡嗪、2-甲基丁醛等物

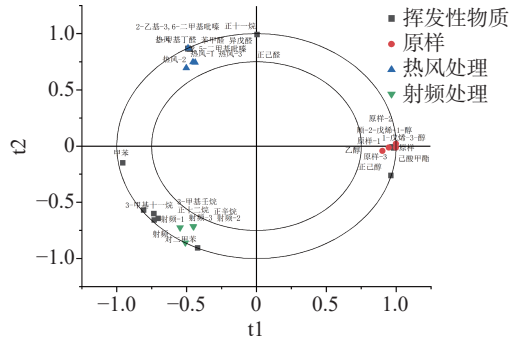


图 10 基于不同样品和主要挥发性物质的载荷图
Fig.10 Loadings plot based on different samples and major volatile substances

质, 呈现出烘焙风味, 这可能是因为热风处理过程中产生了更强的美拉德反应和氧化反应^[17]。

3 结论

本文探究热风处理和射频处理对小麦胚芽贮藏稳定性及其品质的影响。结果表明热风 and 射频处理均能提高小麦胚芽的贮藏稳定性, 减少脂肪氧化速率。但相比热风处理, 射频处理对脂肪酶灭酶率提高了 12.38%, α -维生素 E 保留率提高了 9.83%($P<0.05$); 综合比较两种处理方法, 射频处理的小麦胚芽可以保持较好的品质, 适用于对营养品质有较高要求的加工。通过电子鼻分析确定了烷类、氮氧化合物、无机硫化物可以作为区分未处理小麦胚芽、热风干燥、射频加热组的差异性标志物。应用 HS-SPME-GC-MS 技术检测出 92 种检测较为稳定的风味物质, 通过 VIP 值筛选出不同处理方式关键差异挥发性成分 16 个, 确定未处理的小麦胚芽呈现出青草香

味,热风处理组呈现出烘焙香味,射频处理组呈现出甜香香味;总之,不同处理方式对小麦胚芽的风味形成有不同的影响。总体结果说明不同处理方式对小麦胚芽的品质和风味有不同的影响,可为小麦胚芽的稳定化加工提供理论指导。由于小麦胚芽中营养物质较多,但该研究目前只对小麦胚芽中 α -维生素E进行了分析,后续研究可在加工和贮藏过程中对其营养品质变化的情况及机理进行深入研究。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] LIU J, ZHANG Y M, LIU J Y, et al. Effect of non-covalently bound polyphenols on the structural and functional properties of wheat germ protein[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 149: 109534.
- [2] BOUKID F, FOLLONI S, RANIERI R, et al. A compendium of wheat germ: Separation, stabilization and food applications[J]. *Trends in Food Science Technology*, 2018, 78: 120–133.
- [3] DIVAN E K, HADI S R. Wheat germ valorization by fermentation: A novel insight into the stabilization, nutritional/functional values and therapeutic potentials with emphasis on anti-cancer effects[J]. *Trends in Food Science Technology*, 2023, 131: 175–189.
- [4] ZENG S Y, LI M G, LI G H, et al. Innovative applications, limitations and prospects of energy-carrying infrared radiation, microwave and radio frequency in agricultural products processing[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 121: 76–92.
- [5] 周博. 小米糠稳定化处理及其在面条中的应用研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023. [ZHOU B. Process research on the stabilization of millet bran and its compounding of noodles[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023.]
- [6] YAGMUR E K. Degradation kinetic modeling of bioactive compounds and enzyme activity in wheat germ during stabilization[J]. *LWT*, 2022, 153: 112501.
- [7] LING B, LYNG G J, WANG S J. Radio-frequency treatment for stabilization of wheat germ: Dielectric properties and heating uniformity[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2018, 48: 66–74.
- [8] DONG Y F, YAN C, XUAN X T, et al. Improvement of protein structural and functional properties of indica-japonica hybrid rice by radio frequency treatment[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2023, 90: 103516.
- [9] 李永富, 王雪真, 黄金荣, 等. 基于自由基控制的青稞脂肪酶射频灭活技术研究[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(7): 46–54. [LI Y F, WANG X Z, HUANG J R, et al. Radio frequency for lipase inactivation of highland barley based on free radicals control[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(7): 46–54.]
- [10] LÜ P, LIU J L, WANG Q, et al. Influence of accelerating storage of foxtail millet on the edible and cooking quality of its porridge: An insight into the structural alteration of the in-situ protein and starch and physicochemical properties[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 240: 124375.
- [11] CHITSUTHIPAKORN K, THANAPORNPOONPONG S. Verification of rice quality during storage after drying with hot air and radio frequency heating[J]. *Food Chemistry*: X, 2023, 20: 100882.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 15684-2015, 谷物碾磨制品 脂肪酸值的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 15684-2015, Grain milling products, determination of fatty acid value[S]. Beijing: China Standard Press, 2016.]
- [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 5009.227-2023, 食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023. [National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration of Market Supervision and Administration. GB 5009.227-2023, National Standard for Food Safety, determination of Peroxide Value in Foods[S]. Beijing: China Standard Press, 2023.]
- [14] HUI L W, XINYAN B, CHRISTIANI H J. Carotenoids, tocopherols and phyloquinone content of 26 green leafy vegetables commonly consumed in Southeast Asia[J]. *Food Chemistry*, 2022, 385: 132729.
- [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 5009.82-2016, 食品安全国家标准 食品中维生素A、D、E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 of Market Supervision and Administration. GB 5009.82-2016, National Standard for Food Safety, determination of Vitamins A, D and E in Foods[S]. Beijing: China Standard Press, 2016.]
- [16] 刘杰梅, 李雪玲, 孙玥, 等. 核桃仁炒制工艺优化及其风味成分分析[J/OL]. *中国粮油学报*: 1–12[2023-12-11]. <https://doi.org/10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000657>. [LIU J M, LI X L, SUN Y, et al. Optimization of roasting process and analysis of flavor components of walnut[J/OL]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*: 1–12[2023-12-11]. <https://doi.org/10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000657>.]
- [17] ZHANG Y K, TANG N, SHI L, et al. Characterization and comparison of predominant aroma compounds in microwave-treated wheat germ and evaluation of microwave radiation on stability[J]. *Journal of Cereal Science*, 2020, 93: 102942.
- [18] 王文洁, 孙宇欣, 童志芳, 等. 小麦胚芽的灭酶稳定化及其在烘焙制品中的应用[J/OL]. *食品与发酵工业*: 1–11[2023-12-11]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.036275>. [WANG W J, SUN Y X, TONG Z F, et al. Enzyme inactivation on wheat germs and its application in bakery products[J/OL]. *Food and Fermentation Industries*: 1–11[2023-12-11]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.036275>.]
- [19] LING B, LYNG G J, WANG S J. Effects of hot air-assisted radio frequency heating on enzyme inactivation, lipid stability and product quality of rice bran[J]. *LWT*, 2018, 91: 453–459.
- [20] LING B, OUYANG S H, WANG S J. Radio-frequency treatment for stabilization of wheat germ: Storage stability and physicochemical properties[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2019, 52: 158–165.
- [21] ZHANG M, CHEN H Z, MUJUMDAR A S, et al. Recent developments in high-quality drying of vegetables, fruits, and aquatic products[J]. *Critical reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(6): 1239–1255.
- [22] ZHANG Y, PANDISELVAM R, ZHU H K, et al. Impact of radio frequency treatment on textural properties of food products: An updated review[J]. *Trends in Food Science Technology*, 2022, 124: 154–166.

- [23] LIU X, LI Y H, LIU Q, et al. Mechanism of electron beam irradiation on the lipid metabolism of paddy during high temperature storage[J]. *Journal of Cereal Science*, 2023, 111: 103668.
- [24] DESIRÉE B, RITA M, MARIA A S, et al. Wheat germ oil vitamin E cytoprotective effect and its nutrigenomics signature in human hepatocyte lipotoxicity[J]. *Heliyon*, 2022, 8(9): e10748.
- [25] CUI B Z, WANG K, HU N, et al. Combination of radio frequency heating and antibacterial agents for microorganism control in the production of packaged tofu[J]. *Food Control*, 2023, 154: 110015.
- [26] 洪晴悦. 不同热加工对青稞主要生物活性成分和体外消化与肠菌发酵特性的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2021. [HONG Q Y. Effects of different thermal processing on main bioactive components, *in vitro* digestion and fermentation characteristics of Qingke [D]. Chongqing: Southwest University, 2021.]
- [27] KARRAR E, AHMED I A M, MANZOOR M F, et al. Effect of roasting pretreatment on fatty acids, oxidative stability, tocopherols, and antioxidant activity of gurm seeds oil[J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2021, 34: 102022.
- [28] 周洋, 杨文婧, 操丽丽, 等. 生育酚抑制油脂氧化机制研究进展[J]. *中国油脂*, 2018, 43(8): 32–38. [ZHOU Y, YANG W J, CAO L L, et al. Progress in mechanism of tocopherol inhibiting oil oxidation[J]. *China Oils and Fats*, 2018, 43(8): 32–38.]
- [29] TIAN H X, XIONG J J, CHEN S, et al. Rapid identification of adulteration in raw bovine milk with soymilk by electronic nose and headspace-gas chromatography ion-mobility spectrometry[J]. *Food Chemistry*, 2023, 18: 100696.
- [30] 梁玲, 陈存社. 小麦胚芽饼干烘烤过程中麦香味的形成及分析[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(7): 64–69. [LIANG L, CHEN C S. Formation and analysis of wheat fragrance in wheat germ biscuit baking process[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(7): 64–69.]
- [31] 李国琰, 张雁, 廖娜, 等. 甜玉米成熟过程中挥发性风味物质的变化规律[J]. *食品科学*, 2022, 43(10): 271–280. [LI G Y, ZHANG Y, LIAO N, et al. Changes of volatile flavor compounds in sweet corn during maturation[J]. *Food Science*, 2022, 43(10): 271–280.]
- [32] PIATTI D, MARCON RICCARDO, CAPRIOLI G, et al. White acqualagna truffle (*Tuber magnatum* Pico): Evaluation of volatile and non-volatile profiles by GC-MS, sensory analyses and elemental composition by ICP-MS[J]. *Food Chemistry*, 2024, 439: 138089.
- [33] WU S L, YANG J, DONG H, et al. Key aroma compounds of Chinese dry-cured spanish mackerel (*Scomberomorus niphonius*) and their potential metabolic mechanisms[J]. *Food Chemistry*, 2020, 342: 128381.
- [34] RIGLING M, YADAV M, YAGISHITA M, et al. Biosynthesis of pleasant aroma by enokitake (*Flammulina velutipes*) with a potential use in a novel tea drink[J]. *LWT*, 2021, 140: 110646.
- [35] API A M, BELSITO D, BISERTA S, et al. RIFM fragrance ingredient safety assessment, 2-methylbutyraldehyde, CAS Registry Number 96-17-3[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2021, 149 (S1): 112093.
- [36] YU H Y, XIE T, XIE J R, et al. Aroma perceptual interactions of benzaldehyde, furfural, and vanillin and their effects on the descriptor intensities of Huangjiu[J]. *Food Research International*, 2020, 129: 108808.
- [37] DIAS L G, HACKE A, BERGARA S F, et al. Identification of volatiles and odor-active compounds of aromatic rice by OSME analysis and SPME/GC-MS[J]. *Food Research International*, 2021, 142: 110206.
- [38] HUANG J, YANG M F, ZONG Y J, et al. Characterization of the aroma in barley leaves from different cultivars and tillering stages by HS-SPME/GC-MS, GC-O and E-nose[J]. *Food Bioscience*, 2024, 60: 104117.