DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240228005

核桃大豆植物奶加工工艺研究及品质分析

张素姣[1,2], 杨大霞[1,2], 吴彦兵[1,2], 戴胜兴[1,2], 张 博[1,2],
徐 姗[1,2], 宋丽娟[1], 夏君霞[1,2*]

(1. 河北养元智汇饮品股份有限公司, 衡水 053000; 2. 河北省核桃饮品技术创新中心, 衡水 053000)

摘 要: 目的 深入探究核桃大豆植物奶的加工工艺, 提升产品感官品质和营养价值。**方法** 研究大豆磨浆温度、磨浆 pH 和高压均质压力等因素对产品感官品质的影响, 确定最佳加工条件, 并探讨不同预处理方式对产品品质的影响。**结果** 实验研究了大豆磨浆温度、pH 和均质压力的最佳组合, 并进行了正交试验以优化加工工艺, 最终确定大豆磨浆温度 80℃、大豆磨浆 pH 8.0、豆浆高压均质压力 75 MPa 的工艺条件, 产品的感官评分最高。对比了不同预处理工艺对产品常规理化性质和香气品质的影响, 发现浸泡条件显著改变豆浆中的可溶性固形物含量(P<0.05), 进而影响产品的品质和营养价值, 香气分析揭示了醛类化合物在豆腥味中的重要作用。**结论** 通过优化加工工艺, 显著改善了产品的感官品质和营养价值, 为核桃大豆植物奶的工业化生产提供了重要参考。

关键词: 核桃; 大豆; 工艺; 品质; 香气

Research on the processing technology of walnut-soybean plant milk and analysis of its quality

ZHANG Su-Jiao[1,2], YANG Da-Xia[1,2], WU Yan-Bing[1,2], DAI Sheng-Xing[1,2],
ZHANG Bo[1,2], XU Shan[1,2], SONG Li-Juan[1], XIA Jun-Xia[1,2*]

(1. *Hebei Yangyuan Zhihui Beverage Co., Ltd., Hengshui* 053000, *China*;
2. *Hebei Technology Innovation Center for Walnut Beverage, Hengshui* 053000, *China*)

ABSTRACT: Objective To thoroughly explore the processing techniques of walnut-soybean plant milk, and enhance the sensory quality and nutritional value of the product. **Methods** The research examined the effects of variables such as grinding temperature, grinding pH, and high-pressure homogenization pressure on the sensory quality of the product, identified the optimal processing conditions, and explored the impact of different pre-treatment methods on product quality. **Results** The research determined the ideal combination of grinding temperature, pH, and homogenization pressure. Orthogonal experiments were conducted to refine the processing technique, ultimately identifying the optimal conditions as a soybean grinding temperature of 80℃, a grinding pH of 8.0, and a soy milk high-pressure homogenization pressure of 75 MPa, under which the product achieved the highest sensory score. The effects of different pretreatment processes on the conventional physicochemical properties and aroma quality of the

基金项目: 河北省科学技术厅院士合作重点单位和院士工作站项目(V1679624813508)、河北省高层次人才资助项目(C20221076)

Fund: Supported by the Hebei Province Department of Science and Technology Academician Cooperation Key Units and Academician Workstation Project (V1679624813508), and the Hebei High-level Talent Support Project (C20221076)

***通信作者:** 夏君霞, 正高级工程师, 主要研究方向为食品科学与工程。E-mail: yangyuanshengjibu@hbyangyuan.com

***Corresponding author:** XIA Jun-Xia, Professor, Hebei Yangyuan Zhihui Beverage Co., Ltd., New Zone 6 Road Fuyang 4 Road, North District of Hebei Hengshui Economic Development Zone, Hengshui 053000, China. E-mail: yangyuanshengjibu@hbyangyuan.com

products were compared. It was found that soaking conditions significantly alter the content of soluble solids in soy milk (P<0.05), thus impacting the product's quality and nutritional value. Furthermore, the analysis of aroma quality highlighted the crucial role of aldehyde compounds in mitigating the beany flavor. **Conclusion** Optimizing the processing technology significantly enhance the sensory quality and nutritional value of the product, providing vital guidance for the industrial production of walnut-soybean plant milk.

KEY WORDS: walnut; soybean; technology; quality; aroma

0 引 言

近年来，随着消费者健康意识的提高以及对可持续食物来源的关注，植物基食品需求显著上升。植物蛋白饮料因其环保特性和营养优势逐渐成为市场的热点[1]。两种或两种以上的植物原料混合的乳品替代物，可以增强产品的营养或感官特性[1–2]。大豆有“豆中之王”之称，主要营养成分有蛋白质、脂肪、碳水化合物、维生素及矿物质，其中蛋白质含量占比 35%~40%[3]。但大豆中含有胰蛋白酶抑制剂等抗营养因素，影响蛋白质消化和吸收。浸泡、煮沸或发酵等加工工艺，可以显著提高大豆蛋白消化率[4]。核桃含有丰富的蛋白质和不饱和脂肪酸[5]，有助于降低心血管疾病的风险[6–7]。核桃大豆植物奶结合了大豆和核桃的丰富营养和显著的功能特性[8]，展现出巨大的市场潜力。

核桃大豆植物奶以核桃和大豆为原料，经磨浆、灭酶、均质和杀菌等工艺制成。其中磨浆分为以大豆为原料研磨豆浆和以核桃仁为原料制成核桃浆。豆浆的生产工艺过程如浸泡、研磨、均质和氧气等会影响其感官品质，如豆腥味和细腻度等。因此，研究不同加工工艺，提高豆浆的感官品质尤为重要。部分学者已对隔氧磨浆(改装磨浆仪，充二氧化碳隔绝氧气)[9]做了深入研究，证明了隔氧磨浆不仅能显著抑制其酶活，阻止不饱和脂肪酸氧化产生的过氧化氢产物分解为己醛和戊醛等芳香物质，减少腥味物质的产生，还能有效减缓其美拉德反应速率。与非隔氧磨浆相比，采用隔氧磨浆工艺的豆浆风味和色泽更佳。但将该工艺应用于核桃大豆植物奶产品的研究鲜有报道。

本研究旨在探究脱皮大豆在隔绝空气的密闭管道输送，隔绝氧气下粗磨和精细研磨制备豆浆，探讨核桃大豆植物奶的加工工艺(包括大豆磨浆温度、磨浆 pH、高压均质压力等)，分析其理化性质和香气品质，并探讨了不同预处理方式对产品品质的影响，以期为改善其品质和提升消费者体验提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

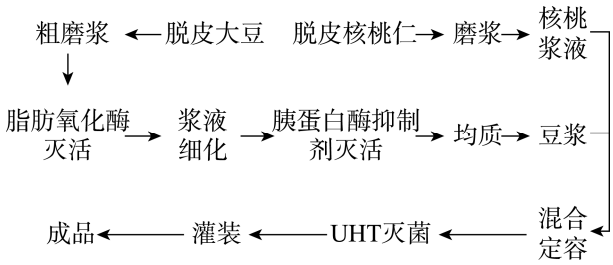
核桃仁、脱皮大豆(河北养元智汇饮品股份有限公司)；石油醚(30~60℃)、硫酸、硼酸、甲基红指示剂、溴甲酚绿指示剂、亚甲基蓝指示剂、氢氧化钠(分析纯，上海国药集团化学试剂有限公司)；甲醇(色谱纯，北京迪科马科技有限公司)；三氟化硼-甲醇溶液[50%，梯希爱(上海)化成工业发展有限公司]；无水硫酸钠(分析纯，天津市光复精细化工研究所)。

1.2 仪器与设备

FE 28 型 pH 计(梅特勒－托利多仪器上海有限公司)；BSA224S 型万分之一电子分析天平(德国赛多利斯公司)；GZX-9030MBE 型电热鼓风干燥箱(上海博讯实业有限公司)；SOX406 型索氏提取仪(山东海能科学仪器有限公司)；JM-80A 型胶体磨(廊坊市惠友机械有限公司)；Tetra Alex 400 型高压均质机(瑞典利乐公司)；SPX FLOW 超高温瞬时杀菌机(美国斯必克流体公司)；Turbiscan Lab 稳定性分析仪(法国 Formulaction 公司)；TGL-20000 CR 型高速台式冷冻离心机(上海安亭科学仪器厂)；7820A 型气相色谱仪配备氢火焰离子检测器、8860-5977B 型气相色谱质谱联用仪、HP-5MS 色谱柱(30 m×0.32 mm, 0.25 μm)(安捷伦中国公司)；实验室级小型脱皮豆制浆系统(定制)，包括隔氧粗磨设备和隔氧精磨设备。

1.3 实验方法

1.3.1 工艺流程



1.3.2 操作要点

脱皮大豆与反渗透(reverse osmosis，RO)水投入粗磨设备的储料槽，经过隔氧粗磨设备制得粗豆浆，同时进行脂肪氧化酶灭活；然后送入隔氧精细研磨设备制得精细豆浆，并进行胰蛋白酶抑制剂灭活，均质备用；核桃仁经磨浆后与豆浆混合定容，经超高温瞬时灭菌(ultra-high temperature processing, UHT)后无菌灌装，即得成品。

(1)大豆隔氧磨浆温度对产品感官品质影响

通过实验室级小型脱皮豆制浆系统(定制)磨浆。脱皮

大豆在隔绝空气的密闭管道输送, 隔绝氧气下粗磨和精细研磨。设定大豆磨浆温度分别为: 70、75、80、85 和 90℃, 在其他工艺参数一致的情况下, 考察核桃大豆植物奶的感官品质。重复 3 次, 取平均值分析。

(2)脱皮大豆磨浆过程中 pH 对产品感官品质的影响

根据预实验结果, 设定磨浆 pH 分别为 7.0、7.5、8.0、8.5 和 9.0, 在其他工艺参数一致的情况下, 考察核桃大豆植物奶的感官品质。重复 3 次, 取平均值分析。

(3)豆浆高压均质压力对产品感官品质的影响

根据预实验结果和高压均质机的压力承受能力, 设定高压均质压力分别为 50、60、70、80、90 MPa, 在其他工艺参数一致的情况下, 考察核桃大豆植物奶的感官品质。重复 3 次, 取平均值分析。

1.3.3　正交试验

在单因素实验的基础上, 大豆隔氧磨浆温度(*A*)、大豆磨浆 pH (*B*)和豆浆高压均质压力(*C*)为研究对象, 采用 $L_9(3^4)$正交试验来研究不同工艺条件下核桃大豆植物奶的感官品质, 并做平行试验。以感官品质为指标, 因素水平表如表 1 所示。

表 1　正交试验因素水平表

Table 1　Factors and levels of orthogonal experiment

水平	因素		
	A: 大豆磨浆温度/℃	*B*: 大豆磨浆 pH	*C*: 豆浆高压均质压力/MPa
1	75	8.0	65
2	80	8.5	70
3	85	9.0	75

1.3.4　核桃大豆植物奶感官评价标准

按照上述定义的感官评价标准对核桃大豆植物奶进行评分。品评小组共 15 人, 年龄 30~40 周岁, 均为经专业培训的感官评定人员, 每个风味实行 10 分制, 具体评分标准见表 2。

1.3.5　样品制备

为了研究不同预处理方法对核桃大豆植物奶品质的影响, 本研究设计了 4 种大豆预处理方案, 并应用最优化的加工工艺进行植物奶的制备。以下是各样品的详细预处理步骤。

样品 A: 脱皮大豆与水按质量比 1:4 的比例混合, 然后在 4℃的条件下浸泡 12 h。样品 B: 脱皮大豆与水按质量比 1:4 的比例混合, 在 25℃下浸泡 12 h。样品 C: 脱皮大豆与水按质量比 1:4 的比例混合, 在 85℃的条件下浸泡 5 h。样品 D: 脱皮大豆未经过任何浸泡处理。

1.3.6　品质分析

(1)常规理化指标分析

蛋白质含量测定参考 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》凯氏定氮法;

脂肪含量测定参考 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中总脂肪的测定》索氏抽提法;

水分含量测定参考 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》直接干燥法。

脂肪酸的测定[10]: 取 0.1 g 核桃油样品, 加入 5 mL 2%氢氧化钾-甲醇溶液, 回流至油滴消失。加入 7 mL 15%三氟化硼-甲醇溶液, 继续回流 2 min。用正庚烷提取后经无水硫酸钠脱水, 取上层溶液进样, 经气相色谱(配置火焰离子检测器)分离和分析。色谱柱: DB-WAX (30 m×0.32 mm, 0.25 μm), 进样口温度 270℃, 检测器温度 280℃。升温程序: 100℃保持 13 min, 以 10℃/min 升至 180℃并保持 6 min, 以 1℃/min 升至 200℃保持 20 min, 再以 4℃/min 升至 230℃并保持 10.5 min。脂肪酸定量采用面积归一化法。

(2)香气品质分析

通过气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)测定样品中挥发性风味物质[11]。将 1 mL

表 2　感官评价标准

Table 2　Sensory evaluation criteria

编号	感官描述/分值	8~10 分	5~7 分	0~4 分
A	豆腥味 (10 分)	无明显豆腥味	略有豆腥味	豆腥味较浓
B	豆浆本身香甜味 (10 分)	有较浓郁的豆香味、烤香的麦片味	有豆香味、烤香的麦片味	豆香味、烤香的麦片味很弱
C	不良气味 (10 分)	无不良气味	有轻微焦糊味	有明显的焦糊味、氧化哈败味
D	细腻度 (10 分)	均匀一致、圆润饱满且光滑, 不黏不糊口	质地略粗糙, 不黏不糊口	有明显分层, 质地粗糙, 黏腻糊口
E	豆浆苦涩感 (10 分)	无苦涩感	略有类似茶叶的微苦感	有明显的类似茶叶的微苦感、收敛感

样品转移到 15 mL 顶空瓶中 40℃平衡 20 min，使用 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 固相微萃取头在 40℃吸附 20 min。GC-MS 分析条件：HP-5MS 色谱柱(30 m×0.32 mm, 0.25 μm)，载气为高纯氦气(99.999%)，流速为 1.2 mL/min，采用不分流模式。进样口温度设定为 270℃。程序升温设置为：初始温度 35℃，保持 4 min; 35~100℃，升温速率 3℃/min，保持 4 min; 100~250℃，升温速率 5℃/min，保持 3 min。离子源温度为 250℃，四极杆温度 130℃，质量扫描范围 *m/z* 35~350。采用 NIST 17 数据库进行定性分析，并通过面积归一化法计算相对含量。

1.4 数据处理

进行 3 次重复实验，并利用 SPSS 22.0、Design-Expert 11.1.2.0、Origin Pro 2021 软件进行显著性差异分析、正交实验设计和作图。

2 结果与分析

2.1 单因素实验

2.1.1 隔氧磨浆温度的影响

大豆隔氧磨浆温度是影响核桃大豆植物奶感官品质的重要因素。通常加热温度 80℃以上即可使脂肪氧化酶失活。在磨浆过程中，提高温度可使蛋白质适度热变性，同时导致脂肪氧化酶失活，进而抑制豆腥味物质的产生，加热产生的香味还可部分掩盖豆腥味[12]。

如图 1(A、B)所示，随着磨浆温度的升高，产品的豆腥味逐渐减小，豆浆本身香甜味逐步明显，不良气味也较小，产品接受度较高，感官品质逐步提升。但超过 85℃后，感官品质提升不再明显，表现为细腻度变差，口感略显粗糙、苦涩收敛感，且能耗增加，再升温的意义不大。大豆磨浆温度低时，一方面未经浸泡的大豆组织较硬，对设备的机械磨损较严重，另一方面由于脂肪氧化酶灭酶不及时，豆腥味一旦产生就很难去除，产品风味很难接受。大豆磨浆温度高时，脂肪氧合酶活性很低甚至失活，酶促反应速度很低，能有效减少豆腥味的产生[13]。若磨浆温度偏低，蛋白质没有充分变性，其末端氨基和羧基对醛类有较强的结合能力，形成的豆腥味化合物复杂且难以除去从而导致熟豆浆豆腥味重；若磨浆温度偏高，蛋白质变性过度，豆浆出现粗糙口感[14–15]。因此确定 80℃为最佳磨浆温度。

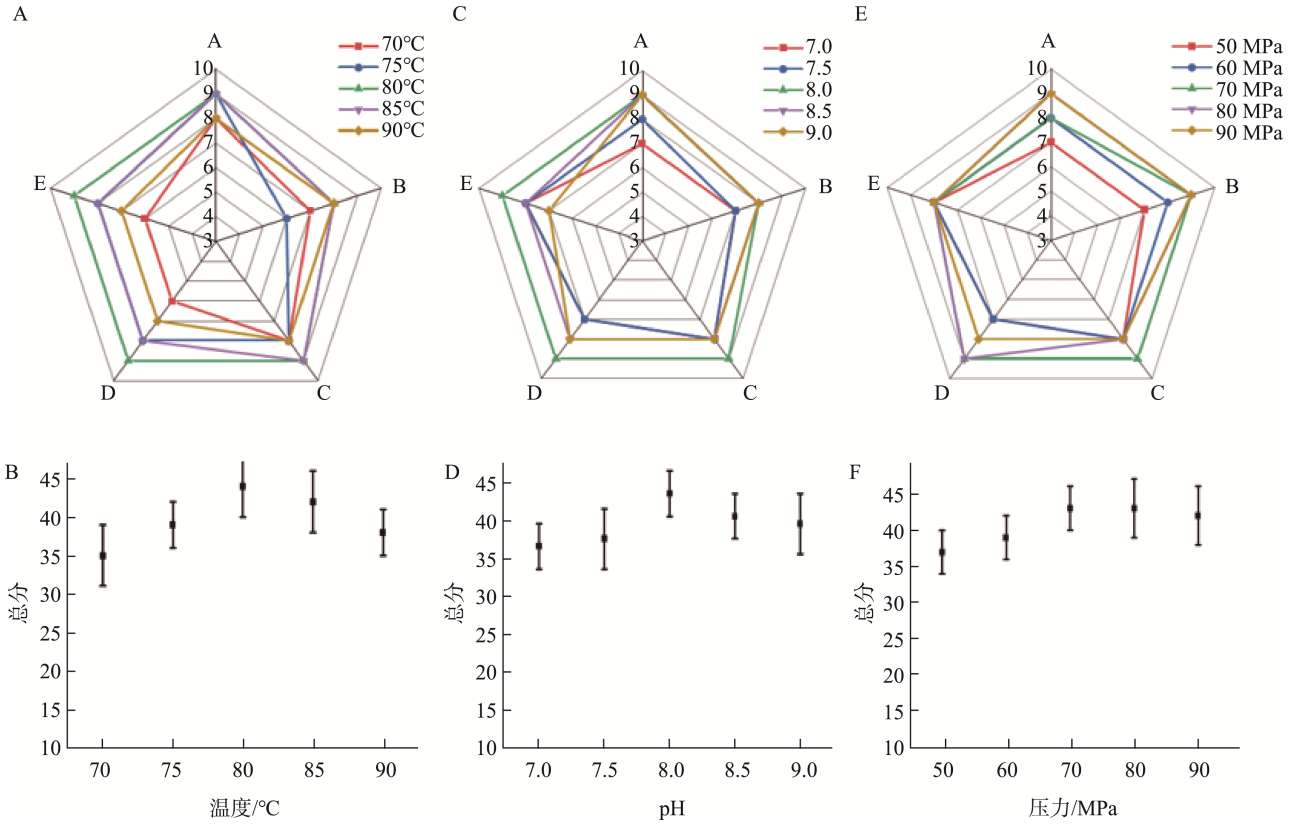


图1 隔氧磨浆温度、pH、定容后均质压力对核桃大豆植物奶感官品质的影响

Fig.1 Influences of deoxygenation grinding temperature, pH, and homogenization pressure after volumetric adjustment on the sensory quality of walnut-soybean plant milk

2.1.2　大豆磨浆 pH 的影响

如图 1(C、D)所示, 随着磨浆过程中 pH 的升高, 产品的豆腥味、异味逐步减小, 香甜味越来越明显, 产品细腻度也明显改善, 感官品质明显提升, 整体喜好程度明显增加。当磨浆过程中 pH 超过 8.5 后, 碱味重导致风味不够协调, 苦涩感也逐步凸显, 感官品质略有下降。因此确定 pH 8.0 为最佳磨浆 pH。

pH 主要影响脂肪氧化酶的活性, 因此偏离最适 pH 可在一定程度上减弱其活性, 进而减少豆腥味、异味的产生。另一方面碱性物质与大豆中的酸类物质结合[16], 使产品风味更纯净、愉悦。

2.1.3　豆浆高压均质压力的影响

大豆磨浆后未进行脱渣处理, 保留了大豆所有的原生膳食纤维, 此时需要对豆浆进行高压均质处理, 使豆浆颗粒进一步剪切细化, 蛋白质和脂肪受到不同程度的破坏并重新排列, 增强自身乳化效果, 使口感更细腻, 提高产品稳定性。

如图 1(E, F)所示, 均质压力为 50~70 MPa 时, 随着均质压力的升高, 产品的豆腥味等、不良异味减少, 同时本身的香甜味凸显、苦涩收敛感减弱, 且细腻度增加, 适口性明显提高, 即高压均质能显著提高核桃大豆植物奶的总体感官评分[17]。当均质压力超过 70 MPa 后, 感官品质提升的不再明显, 且生产成本明显增加, 因此确定 70 MPa 为最佳均质压力。这与 POLISELI-SCOPEL 等[18]的研究结果一致, 高压均质能降低产品的豆腥味, 且随着均质压力的升高, 储藏期间形成的苦涩味及豆腥味均有所减少。可能是因为均质通过剪切力将豆乳中的大分子蛋白质变成小分子物质, 重新包裹在脂质表面, 使脂质与氧气接触面积减小, 豆腥味物质不易形成。

2.2　正交试验

通过正交试验结果可知(表 3、4), 对核桃大豆植物奶感官总分的影响大小为 $A>C>B$, 即磨浆温度>高压均质压力>磨浆 pH, 同时, 直观分析得出核桃豆奶植物蛋白饮料的最佳加工工艺条件组合为 $A_2B_1C_3$, 即大豆磨浆温度 80℃、大豆磨浆 pH 8.0、豆浆高压均质压力 75 MPa。

对上述最优组合做验证实验得出, 在大豆磨浆温度 80℃、大豆磨浆 pH 8.0、豆浆高压均质压力 75 MPa 的工艺条件下, 产品的感官评分为 48 分, 感官评分最高。

2.3　常规理化指标分析

前处理步骤在核桃大豆植物奶的生产过程中至关重要, 本研究探讨了 4 种大豆预处理方案结合最优加工工艺(隔氧磨浆温度、磨浆 pH 和高压均质压力), 对核桃大豆植物奶品质的影响。不同的浸泡条件对豆浆中可溶性固形物的含量有显著影响。温度和时间的变化会改变大豆和核桃中溶解成分的量, 进而影响豆浆的品质和营养价值[19]。如表 5 显示: 样品 D 的固形物含量显著高于其他 3 个样品, 这主要是由于浸泡增加了大豆的膨胀力, 使得更多的可溶性固形物在浸泡过程中进入水中, 而采用直接精磨, 减少了可溶性固形物的损失。不同的浸泡条件(如温度和时间)显著影响大豆产品的蛋白质、脂肪和纤维含量[20]。更长时间的浸泡和较高的浸泡温度可增加大豆中的蛋白质和纤维含量。大豆是重要的优质蛋白来源, 其中赖氨酸和色氨酸含量较高[21]。植物蛋白饮料中蛋白质含量是衡量其品质的重要指标[21]。D 样品的蛋白质含量最高, 这可能是因为没有进行浸泡处理, 因此蛋白质更多地保留在最终产品中。相比之下, 其他 3 个样品经历了不同条件的浸泡过程, 可能导致部分蛋白质的流失。与蛋白质类似、脂肪、双糖、总碳水化合物也出现同样的趋势。

表 3　正交试验设计与结果

Table 3　Orthogonal array design with experimental results

序号	*A*: 大豆磨浆温度/℃	*B*: 大豆磨浆 pH	*C*: 豆浆高压均质压力/MPa	感官评分
1	1	1	1	32
2	1	2	2	36
3	1	3	3	38
4	2	1	2	46
5	2	2	3	43
6	2	3	1	40
7	3	1	3	44
8	3	2	1	42
9	3	3	2	39
k_1	35.333	40.667	38.000	
k_2	43.000	40.333	40.333	
k_3	41.667	39.000	41.667	
R	7.667	1.667	3.667	

表 4　方差分析表

Table 4　Analysis of variance

因素	偏差平方和	自由度	*F*	*F* 临界值	显著性
A: 大豆磨浆温度/℃	100.667	2	21.570	19.000	*
B: 大豆磨浆 pH	4.667	2	1.000	19.000	
C: 豆浆高压均质压力/MPa	20.667	2	4.428	19.000	
误差	4.67	2			

注: *表示差异显著($P<0.05$)。

表 6 列出了 4 个样品的脂肪酸组成结果，可知 4 个植物蛋白饮料的主要脂肪酸为棕榈酸(C16:0、9.778%~11.334%)、硬脂酸(C18:0、3.460%~3.944%)、油酸(C18:1、20.382%~23.404%)、亚油酸(C18:2、49.012%~55.699%)和亚麻酸(C18:3、9.883%~11.914%)。研究表明脂肪酸相对含量样品制备中的温度[20,22]和持续时间[20]密切相关。加热会影响各种脂肪酸的水平。与样品 A 相比，其他 3 个样品中棕榈酸和油酸含量明显降低。而亚油酸相对含量明显升高。

2.4 香气品质分析

表 7 显示、4 个样品中共检测出 74 个香气成分。样品 A 共检出 42 种，样品 B 共检出 39 种，样品 C 共检出 40 种，样品 D 共检出 44 种。共检测到醛类物质 21 种、烃类 18 种、醇类 17 种、酮类 8 种、酯类 4 种、羧酸类 5 种和其他化合物种类有 1 种。

含大豆的植物蛋白饮料的异味通常为豆腥味、主要表现为青草味、蘑菇味等。醛类物质具有清香、果香、脂肪香等香气特征，醛类检出浓度较高且香气阈值较低，对 4 个样品整体香气特征有显著贡献作用。醛类形成的主要原因是美拉德反应和 Strecker 降解反应[28]。己醛(青草香、果香、脂肪香)、戊醇(油味、脂肪香、甜香)和 2-戊基呋喃[27]等物质与豆乳中的青草味和豆腥味等形成存在紧密联系。特别地，己醛的含量对豆乳的风味质量影响最为显著，含量较低的豆浆更受消费者青睐。如表 7 中所示，样品 4 的己醛含量显著降低，这与其较高的感官评分相符合。与此同时，虽然样品 4 中的正己醇(嫩枝叶香、脂肪香、果香、酒香)[25]含量略有上升，但总体豆腥味水平仍呈现下降趋势。这一现象可以归因于正己醇相较己醛具有更高的感官阈值，且其含量的增加幅度有限。

研究表明，脂质的酶促氧化和非酶促氧化作用对风味的形成至关重要[29]。脂质的酶促氧化是醛类物质生成的主要来源。与其他 3 个样品相比，样品 2 中的 *E*-2-己烯醛(青草味、香蕉、脂肪味、奶酪味)含量较高。这也与样品 2 的较大的豆腥味相关。另外，样品 4 中的庚醛(清新、草香、果香、甜杏香、坚果香)[24]、*E*-2-辛烯醛(坚果香、脂肪香、草本香、清新香、青草味、脂肪香、香蕉味、黄瓜味)、*E*-2-庚烯醛(刺鼻、青草味、脂肪香)[24]、壬醛(脂蜡香、玫瑰味、柑橘味、青草味)[25]，这几种物质也是豆制品中典型豆腥味物质[30]。苯甲醛(苦杏仁味、樱桃味、坚果香)、4-乙基-苯甲醛(甜香、杏仁香、苦味)等芳香醛类化合物具有香甜气味的特征，这些化合物的产生有利于豆腥味和酸涩味的掩盖[31]。在豆腥味风味物质的整体构成中，醛类化合物相较于酸类化合物，在豆腥味贡献更大[32]。

表 5 不同预处理后核桃大豆植物奶的理化性质

Table 5 Physicochemical properties of walnut-soybean plant milk with different pretreatments

样品	可溶性固形物/%	pH	密度/(g/cm^3)	蛋白质/%	脂肪/%	双糖/%	水分/%	灰分/%	总碳水化合物/%
A	8.52±0.49^a	6.76±0.25^a	1.0141±0.0070^a	3.4198±0.0900^a	1.880±0.087^a	0.43±0.01^a	91.66±2.52^a	0.2255±0.0180^a	2.8147±0.4140^a
B	8.85±0.32^a	6.72±0.28^a	1.0144±0.0130^a	3.5128±0.0670^a	1.760±0.055^a	0.49±0.01^a	91.46±1.29^a	0.2387±0.0100^a	3.0285±0.5000^a
C	8.61±0.47^a	6.68±0.17^a	1.0173±0.0090^a	3.5373±0.0790^a	2.630±0.085^b	0.75±0.01^b	90.91±1.58^a	0.3038±0.0190^b	2.6189±0.1500^b
D	10.57±0.63^b	6.71±0.18^a	1.0217±0.0110^a	3.6690±0.0470^b	2.560±0.065^b	1.29±0.02^c	89.86±1.27^a	0.4831±0.0200^c	3.4279±0.2300^c

注：同列不同字母代表显著性差异，显著性水平设置为 0.05，表 6 同。

表 6 不同预处理后核桃大豆植物奶的脂肪酸含量

Table 6 Fatty acids content of walnut-soybean plant milk with different pretreatments

	样品 A	样品 B	样品 C	样品 D
棕榈酸 C16:0	11.334±0.819^a	10.201±0.472^b	9.778±0.064^b	9.800±0.413^b
硬脂酸 C18:0	3.944±0.119^a	3.527±0.140^a	3.529±0.230^a	3.460±0.164^a
油酸 C18:1	23.404±1.430^a	20.709±1.100^b	20.468±0.910^b	20.382±1.660^b
亚油酸 C18:2	49.012±1.661^a	55.318±3.660^b	55.528±2.761^b	55.699±2.565^b
亚麻酸 C18:3	11.914±0.900^a	9.883±0.560^b	10.393±0.911^c	10.349±0.474^c
花生酸 C20:0	0.1910±0.0130^a	0.1810±0.0093^a	0.1790±0.0098^a	0.1670±0.0150^a
花生一烯酸 C20:1	0.1310±0.0054^a	0.0720±0.0068^b	0.1250±0.0059^a	0.1220±0.0036^a

表 7　GC-MS 分析 4 个样品的香气物质相对含量

Table 7　Relative contents of volatile components in four samples analyzed by GC-MS

名称	分子式	分子量	CAS 号	相对含量/%				香气描述	参考文献
				样品 A	样品 B	样品 C	样品 D		
乙酸	$C_2H_4O_2$	60.05	64-19-7	0.855	/	/	1.098	尖锐、刺鼻、酸、醋	[23]
E-2-戊烯醛	C_5H_8O	84.12	1576-87-0	0.256	0.390	/	0.000	辛辣、青草香、果香	[24]
2-甲基-2-丁烯醛	C_5H_8O	84.12	1115-11-3	0.600	/	/	0.197	樱桃香、发酵蜜糖香、果香	FlavorDB
Z-2-戊烯-1-醇	$C_5H_{10}O$	86.13	1576-95-0	1.138	/	/	0.848	蘑菇味、青草香	FlavorDB
1-戊醇	$C_5H_{12}O$	88.15	71-41-0	7.114	8.405	1.646	4.020	油味、脂肪香、甜香	[24]
3-甲基-1-丁醇	$C_5H_{12}O$	88.15	123-51-3	0.046	/	0.240	0.566	酒香、果香、香蕉香	[25]
2-甲基丁醇	$C_5H_{12}O$	88.15	137-32-6	0.065	/	0.187	0.427	酒香、果香、花香、清新	FlavorDB
E-2-己烯醛	$C_6H_{10}O$	98.14	6728-26-3	/	1.143	/	/	青草味、香蕉、脂肪味、奶酪味	[25]
己醛	$C_6H_{12}O$	100.16	66-25-1	45.020	44.382	38.495	36.139	青草香、果香、脂肪香	[26]
正己醇	$C_6H_{14}O$	102.17	111-27-3	10.280	7.798	11.470	11.961	嫩枝叶香、脂肪香、果香、酒香	[25]
苯甲醛	C_7H_6O	106.12	100-52-7	2.974	2.776	4.009	4.728	苦杏仁味、樱桃味、坚果香	FlavorDB
E,*E*-2,4-庚二烯醛	$C_7H_{10}O$	110.15	4313-03-5	0.522	0.613	/	0.637	脂肪香、青草味、蔬菜味	[25]
E-4-庚醛	$C_7H_{12}O$	112.17	929-22-6	0.116	0.136	/	/	清新、草香、果香、甜杏香、坚果香	[24]
Z-2-庚烯醛	$C_7H_{12}O$	112.17	57266-86-1	1.812	/	0.932	/	刺鼻、青草味、脂肪香	[24]
2-庚酮	$C_7H_{14}O$	114.19	110-43-0	0.322	0.354	0.771	0.553	果香、甜味、香蕉香、椰子香	FlavorDB
庚醛	$C_7H_{14}O$	114.19	111-71-7	3.811	3.034	1.818	1.174	清新、草香、果香、甜杏香、坚果香	[24]
3,5-辛二烯-2-酮	$C_8H_{12}O$	124.18	30086-02-3	2.788	3.171	2.385	4.715	脂肪香、水果香、草香、蘑菇味、青草味	FlavorDB
3-辛烯-2-酮	$C_8H_{14}O$	126.19	1669-44-9	0.678	0.782	0.306	1.097	坚果味、草本香、泥土味、干草味	FlavorDB
E-2-辛烯醛	$C_8H_{14}O$	126.20	2548-87-0	0.656	0.602	0.684	0.490	坚果香、脂肪香、草本香、清新香、青草味	FlavorDB
1-辛烯-3-酮	$C_8H_{14}O$	126.20	4312-99-6	0.080	0.126	/	/	蘑菇香、青香、泥土香	FlavorDB
Z-2-戊烯醇乙酸酯	$C_7H_{12}O_2$	128.17	42125-10-0	0.333	0.308	/	/	-	-
4-乙基环己醇	$C_8H_{16}O$	128.21	4534-74-1	/	/	0.908	/	-	-
3-辛酮	$C_8H_{16}O$	128.21	106-68-3	1.994	2.788	/	2.266	黄油味、草药味、蘑菇味、甜味	FlavorDB
E-2-辛烯-1-醇	$C_8H_{16}O$	128.21	22104-78-5	0.209	0.260	/	0.287	柑橘味、肥皂味、青草香、塑料味	FlavorDB
辛醛	$C_8H_{16}O$	128.22	124-13-0	1.109	1.002	2.718	1.193	柠檬味、肥皂味、脂肪、脂肪的、青草味	FlavorDB
2、4-二甲基庚烷	C_9H_{20}	128.26	2213-23-2	/	/	0.063	/	-	-
3-辛醇	$C_8H_{18}O$	130.23	20296-29-1	/	0.175	/	/	柑橘味、坚果香、草本、泥土味、木本味、甜瓜味、薄荷、蘑菇味、辛辣味	FlavorDB
正辛醇	$C_8H_{18}O$	130.23	111-87-5	0.562	/	0.672	/	烧焦味、蜡、化学味、金属味、蘑菇香	[24]
6-甲基-3-庚醇	$C_8H_{18}O$	130.23	18720-66-6	/	/	/	0.254	-	-
2-乙基己醇	$C_8H_{18}O$	130.23	104-76-7	/	/	2.857	1.679	-	-
4-乙基苯甲醛	$C_9H_{10}O$	134.18	4748·						FlavorDB
D-柠檬烯	$C_{10}H_{16}$	136.23	5989-27-5	2.694	1.938	2.137	1.172	薄荷味、柠檬味、柑橘味、新鲜、甜	[25]
2-戊基呋喃	$C_9H_{14}O$	138.08	3777-69-3	/	/	7.338	/	豆腥味	[27]
E,*E*-2,4-壬二烯醛	$C_9H_{14}O$	138.21	5910-87-2	/	0.289	/	/	天竺葵、辛辣味	FlavorDB
2,5-辛烷二酮	$C_8H_{14}O_2$	142.20	3214-41-3	5.770	7.620	/	/	-	-
2-壬酮	$C_9H_{18}O$	142.24	821-55-6	/	/	/	0.325	肥皂味、鱼腥味、泥土味、甜味、肥皂味	FlavorDB
壬醛	$C_9H_{18}O$	142.24	124-19-6	3.074	2.491	5.841	4.390	脂蜡香、玫瑰味、柑橘味、青草味	[25]
3-乙基-3-甲基庚烷	$C_{10}H_{22}$	142.28	17302-01-1	0.087	0.069	0.288	/	-	-
2,2-二甲基己酸	$C_8H_{16}O_2$	144.21	813-72-9	/	0.124	/	0.174	-	-
4-乙基-3-壬烯-5-炔	$C_{11}H_{18}$	150.26	74685-67-9	/	0.237	/	0.000	-	-
E-2-庚烯醛	$C_{10}H_{18}O$	154.25	18829-55-5	/	2.015	/	1.239	刺鼻、青草味、脂肪香	[24]
2,3,7-三甲基-2-辛烯	$C_{11}H_{22}$	154.29	33933-75-4	/	0.133	/	/	-	-
己酸烯丙酯	$C_9H_{16}O_2$	156.22	123-68-2	/	/	/	0.312	-	-
癸醛	$C_{10}H_{20}O$	156.27	112-31-2	0.264	/	1.648	1.211	甜香、蜡味、橙皮味、柑橘味、花香	FlavorDB

表 7(续)

名称	分子式	分子量	CAS 号	相对含量/%				香气描述	参考文献
				样品 1	样品 2	样品 3	样品 4		
丁酸异戊酯	$C_9H_{18}O_2$	158.24	106-27-4	/	0.095	0.273	0.223	啤酒花油、杏子、威士忌、水果味	FlavorDB
3,7-二甲基-辛烯-2-醇	$C_{10}H_{22}O$	158.28	18479-57-7	/	0.085	/	/	-	-
十二烷	$C_{12}H_{26}$	170.34	112-40-3	0.273	0.244	0.689	0.242	-	-
肉豆蔻醛	$C_9H_8O_4$	180.16	5780-07-4	/	0.922	/	/	柑橘味、肥皂味、蜡味、花香、甜香	FlavorDB
E,*E*-2,4-十二碳二烯醛	$C_{12}H_{20}O$	180.29	21662-16-8	/	/	1.839	/	脂肪味、蜡质、天竺葵、油炸味、青草味	FlavorDB
E-2-十二烯-1-醇	$C_{12}H_{24}O$	184.32	69064-37-5	1.316	1.301	/	/	油味、脂肪香	FlavorDB
十二醛	$C_{12}H_{24}O$	184.32	112-54-9	0.144	0.155	0.353	0.606	柑橘味、脂肪、花香、肥皂味、青草味	FlavorDB
十二醇	$C_{12}H_{26}O$	186.33	112-53-8	/	/	/	0.284	椰子味、脂肪香、泥土味、蜂蜜味	FlavorDB
正十四碳烷	$C_{14}H_{30}$	198.39	629-59-4	0.325	1.481	1.239	1.465	蜡、温和香	FlavorDB
4,6-二甲基十二烷	$C_{14}H_{30}$	198.39	61141-72-8	/	/	0.236	/	-	-
十三烷酸	$C_{13}H_{26}O_2$	214.34	638-53-9	/	/	/	0.478	木头味、蜡味	FlavorDB
1-十四醇	$C_{14}H_{30}O$	214.39	112-72-1	/	/	0.609	0.273	椰子味、鸢尾香、果味、蜡味	FlavorDB
2-十五烷酮	$C_{15}H_{30}O$	226.40	2345-28-0	/	/	/	0.244	鲜香、茉莉花香、芹菜味	FlavorDB
十五醛	$C_{15}H_{30}O$	226.40	2765-11-9	/	/	0.320	1.761	鲜香、蜡味	FlavorDB
十六烷	$C_{16}H_{34}$	226.44	544-76-3	0.071	/	0.132	/	-	-
肉豆蔻酸	$C_{14}H_{28}O_2$	228.37	544-63-8	/	/	/	4.081	油腻味、肥皂味、蜡味、椰子饭	FlavorDB
乙酸月桂酸酯	$C_{14}H_{28}O_2$	228.37	112-66-3	/	/	/	0.175	-	-
十六醛	$C_{16}H_{32}O$	240.42	629-80-1	0.164	/	0.299	1.216	-	-
正十七烷	$C_{17}H_{36}$	240.47	629-78-7	0.281	0.956	0.123	1.026	-	-
十五烷酸	$C_{15}H_{30}O_2$	242.40	1002-84-2	/	/	/	2.567	蜡味	-
2-己基-1-癸醇	$C_{16}H_{34}O$	242.44	2425-77-6	/	0.051	/	/	-	-
8-甲基-十七烷	$C_{18}H_{38}$	254.49	13287-23-5	0.076	/	0.216	/	-	-
2,6,10-三甲基十五烷	$C_{18}H_{38}$	254.49	3892-00-0	/	/	0.578	/	-	-
7-甲基十七烷	$C_{18}H_{38}$	254.49	20959-33-5	/	/	/	0.149	-	-
3-甲基十七烷	$C_{18}H_{38}$	254.49	6418-44-6	0.154	/	0.359	0.289	-	-
十八烷	$C_{18}H_{38}$	254.49	593-45-3	0.547	/	4.220	1.769	-	-
2-辛基癸烷-1-醇	$C_{18}H_{38}O$	270.49	45235-48-1	/	0.944	/	/	-	-
二十烷	$C_{20}H_{42}$	282.55	112-95-8	0.205	/	0.234	/	-	-
8-己基十五烷	$C_{21}H_{44}$	296.57	13475-75-7	/	/	0.386	/	-	-
二十一烷	$C_{21}H_{44}$	296.57	629-94-7	0.939	/	0.482	/	-	-

注: /表示未检出; -表示未有文献具体表述; 香气描述来源: FlavorDB (https://cosylab.iiitd.edu.in/flavordb/)。

3 结 论

本研究通过系统地优化核桃大豆植物奶的加工工艺，显著提升了产品的感官品质和营养价值。研究结果显示，在 80℃的磨浆温度、pH 为 8.0 以及 75 MPa 的高压均质压力下处理，能够有效地减少豆腥味，同时提升豆浆的整体口感和营养质量。通过比较不同预处理方案，发现适当的浸泡和温度控制显著影响了产品中可溶性固形物的含量，降低胰蛋白酶抑制剂等抗营养因素。香气分析揭示了醛类化合物在控制豆腥味中的重要性，通过优化工艺参数可以显著改变这些挥发性化合物的组成，从而改善最终产品的风味。本研究为工业生产中的原料预处理提供了重要的技术参考，也为制定和优化工艺提供了科学依据。未来可以进一步研究不同植物蛋白源的组合，如大豆与其他豆类、坚果类的组合，分析其对产品营养价值和感官品质的影响，以开发多样化的植物基乳制品[33]。

参考文献

[1] REYES-JURADO F, SOTO-REYES N, DÁVILA-RODRÍGUEZ M, *et al*. Plant-based milk alternatives: Types, processes, benefits, and characteristics [J]. Food Rev Int, 2023, 39(4): 2320–2351.

[2] KUNDU P, DHANKHAR J, SHARMA A. Development of non dairy milk alternative using soymilk and almond milk [J]. Curr Res Nutr Food S, 2018, 6(1): 203–210.

[3] 初百吉, 徐庆利, 刘宝华, 等. 植物奶研究进展及应用现状[J]. 中国乳业, 2023, (9): 119–124.
CHU BJ, XU QL, LIU BH, *et al*. Research progress and application status of plant milk [J]. China Dairy, 2023, (9): 119–124.

[4] KETNAWA S, OGAWA Y. *In vitro* protein digestibility and biochemical characteristics of soaked, boiled and fermented soybeans [J]. Sci Rep,

2021, 11(1): 14257.

[5] GENG S, NING D, MA T, *et al*. Comprehensive analysis of the components of walnut kernel (*Juglans regia* L.) in China [J]. J Food Qual, 2021, 2021: 1–11.

[6] LIU X, GUASCH-FERRÉ M, TOBIAS DK, *et al*. Association of walnut consumption with total and cause-specific mortality and life expectancy in U.S. adults [J]. Nutrients, 2021, 13(8): 2699.

[7] NI Z, ZHANG Y, CHEN S, *et al*. Exploration of walnut components and their association with health effects [J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2021, 62(19): 5113–5129.

[8] AYDAR EF, TUTUNCU S, OZCELIK B. Plant-based milk substitutes: Bioactive compounds, conventional and novel processes, bioavailability studies, and health effects [J]. J Funct Foods, 2020, 70: 103975.

[9] 郭晓菲, 郭琪琪, 何志刚, 等. 大豆复水协同隔氧磨浆对脱除豆腥味及提高豆浆综合品质的影响[J]. 福建农业学报, 2020, 35(12): 1385–1390.
GUO XF, GUO QQ, HE ZG, *et al*. Beany note reduction and overall quality improvement on soymilk by optimized processing [J]. Fujian J Agric Sci, 2020, 35(12): 1385–1390.

[10] ZHENG Y, WU S, WANG R, *et al*. Analysis and correlation ship of chemical components of various walnut (*Juglans regia* L.) cultivars [J]. J Food Meas Charact, 2020, 14(6): 3605–3614.

[11] KALOGIOURI N P, MANOUSI N, ROSENBERG E, *et al*. Exploring the volatile metabolome of conventional and organic walnut oils by solid-phase microextraction and analysis by GC-MS combined with chemometrics [J]. Food Chem, 2021, 363: 130331.

[12] 杨道强, 邢建荣, 陆胜民. 大豆不同前处理方式对豆浆品质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(1): 69–73.
YANG DQ, XING JR, LU SM. Effect of different soybean pretreatment methods on the quality of soy milk [J]. Food Sci, 2016, 37(1): 69–73.

[13] MUNEKATA P, DOMÍNGUEZ R, BUDARAJU S, *et al*. Effect of innovative food processing technologies on the physicochemical and nutritional properties and quality of non-dairy plant-based beverages [J]. Foods, 2020, 9: 288.

[14] GIRI SK, MANGARAJ S. Processing influences on composition and quality attributes of soymilk and its powder [J]. Food Eng Rev, 2012, 4(3): 149–164.

[15] ZUO F, PENG X, SHI X, *et al*. Effects of high-temperature pressure cooking and traditional cooking on soymilk: Protein particles formation and sensory quality [J]. Food Chem, 2016, 209: 50–56.

[16] 朱芙蓉, 徐宝才, 周辉. 大豆制品中腥味形成机理及去腥工艺研究进展[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(4): 150–158.
ZHU FR, XU BC, ZHOU H. Review on formation mechanism and deodorization technology of beany flavor in soybean and soybean products [J]. J Chin Cere Oils Assoc, 2023, 38(4): 150–158.

[17] HE A, XU B. High-pressure homogenisation improves food quality of plant-based milk alternatives [J]. Int J Food Sci Technol, 2024, 59(1): 399–407.

[18] POLISELI-SCOPEL FH, GALLARDO-CHACÓN J, JUAN B, *et al*. Characterization of volatile profile in soymilk treated by ultra high pressure homogenization [J]. Food Chem, 2013, 141(3): 2541–2548.

[19] 潘婷婷, 韦智, 李佳钰, 等. 浸泡时间对豆浆品质的影响及相关性分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(9): 45–53.
PAN TT, WEI Z, LI JY, *et al*. Effect of soaking time on the quality of soymilk and their correlation analysis [J]. Sci Technol Food Ind, 2024, 45(9): 45–53.

[20] CHAUHAN D, KUMAR K, AHMED N, *et al*. Impact of soaking, germination, fermentation, and roasting treatments on nutritional, anti-nutritional, and bioactive composition of black soybean (*Glycine max* L.) [J]. J Appl Biol Biotechnol, 2022, 10(5): 186–192.

[21] QIN P, WANG T, LUO Y. A review on plant-based proteins from soybean: Health benefits and soy product development [J]. J Agric Food Res, 2022, 7: 100265.

[22] CHERIF A, SLAMA A, ELFALLEH W. Stability and change in fatty acids composition of soybean, corn, and sunflower oils during the heating process [J]. J Food Qual, 2022, 2022: 6761029.

[23] SCHREINER L, BAUER P, BUETTNER A. Resolving the smell of wood-identification of odour-active compounds in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) [J]. Sci Rep, 2018, 8(1): 8294.

[24] XI B, ZHANG J, XU X, *et al*. Characterization and metabolism pathway of volatile compounds in walnut oil obtained from various ripening stages via HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS [J]. Food Chem, 2024, 435: 137547.

[25] GUO X, HO C, WAN X, *et al*. Changes of volatile compounds and odor profiles in Wuyi rock tea during processing [J]. Food Chem, 2021, 341: 128230.

[26] 李欢康, 杨佳玮, 刘文玉, 等. 不同工艺核桃油挥发性物质比对及关键香气成分表征[J]. 食品科学, 2021, 42(16): 185–192.
LI HK, YANG JW, LIU WY, *et al*. Comparison of volatile components and characterization of key aroma components of walnut oil produced by different processes [J]. Food Sci, 2021, 42(16): 185–192.

[27] 徐文, 余小贞, 张雪儿, 等. 基于电子鼻和 GC-MS 分析 3 种市售大豆组织蛋白中挥发性豆腥味物质[J]. 中国调味品, 2022, 47(8): 145–149.
XU W, YU XZ, ZHANG XER, *et al*. Analysis of volatile beany compounds in textured soybean protein of three kinds of soybean for sale based on electronic nose and GC-MS [J]. China Cond, 2022, 47(8): 145–149.

[28] HAO J, XU X, JIN F, *et al*. HS-SPME GC–MS characterization of volatiles in processed walnuts and their oxidative stability [J]. J Food Sci Technol, 2020, 57(7): 2693–2704.

[29] 杜雅荣, 刘霞, 李喜宏, 等. 低温储藏大豆对其所制豆浆腥味物质调控效应研究[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(10): 20–25.
DU YR, LIU X, LI XH, *et al*. Study on the effect of cryogenic storage on regulation of soybean milk odor substances [J]. Cere Oils, 2017, 30(10): 20–25.

[30] 陈臣, 田同辉, 刘政, 等. 可减弱豆腥味酵母菌的筛选及其在豆渣饮料中的应用[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(17): 175–183.
CHEN C, TIAN TH, LIU Z, *et al*. Screening of yeast with the ability to reduce beany flavor and its application in okara beverage [J]. Food Res Dev, 2022, 43(17): 175–183.

[31] 杨杨, 杨春华, 王冰, 等. 基于气相色谱-质谱联用技术分析酸浆豆腐加工过程中风味物质的变化[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(17): 5982–5991.
YANG Y, YANG CH, WANG B, *et al*. Analysis of flavor compounds in the processing of fermented soybean whey tofu based on gas chromatography-mass spectrometry [J]. J Food Saf Qual, 2020, 11(17): 5982–5991.

[32] 杨杨, 葛爱媛, 任丽琨, 等. 豆浆豆腥味形成机理及其去除方法的研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(10): 401–411.
YANG Y, GE AIY, REN LK, *et al*. Research progress on formation mechanisms and removal methods of soybean milk and bean odor [J]. Sci Technol Food Ind, 2024, 45(10): 401–411.

[33] 刘绪, 汪巧琴, 文瑞悦, 等. 苦荞芽粉对大豆生乳腥味的影响及应用研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(3): 301–309.
LIU X, WANG QQ, WEN RY, *et al*. Effects of tartary buckwheat bud powder on the beany flavour of soybean raw milk and application [J]. J Food Saf Qual, 2024, 15(3): 301–309.

(责任编辑: 韩晓红 蔡世佳)

作者简介

张素姣, 工程师, 主要研究方向为食品科学与工程。
E-mail: 911237425@qq.com

夏君霞, 正高级工程师, 主要研究方向为食品科学与工程。
E-mail: yangyuanshengjibu@hbyangyuan.com