

李喜层,夏君霞,赵慧博,等. 发酵核桃乳的稳定剂复配配方优化及香气成分分析 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(10): 203-210. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080033

LI Xiceng, XIA Junxia, ZHAO Huibo, et al. Optimization of Formulation Stabilizer and Analysis of Volatile Component in Fermented Walnut Milk[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(10): 203-210. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080033

· 工艺技术 ·

发酵核桃乳的稳定剂复配配方优化及 香气成分分析

李喜层¹, 夏君霞¹, 赵慧博¹, 吴彦兵¹, 戴胜兴¹, 刘磊¹, 徐姗¹, 高飞¹, 路敏^{1,2,*}

(1. 河北养元智汇饮品股份有限公司, 河北衡水 053000;

2. 河北省核桃营养功能与加工技术重点实验室, 河北衡水 053000)

摘要: 本文以脱皮核桃仁为原料, 经发酵工艺制备发酵核桃乳, 以羧甲基纤维素钠添加量、果胶添加量、结冷胶添加量为考察因素, 以发酵核桃乳的稳定性指数、感官评分为评价指标, 通过单因素实验和正交试验对发酵核桃乳的各稳定剂单体的添加量进行优化, 同时通过顶空固相微萃取 (headspace solid phase microextraction, HS-SPME) 和气相色谱质谱 (gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) 联用技术对核桃乳发酵前后的香气成分及含量变化进行分析。结果表明: 发酵核桃乳的稳定剂优化组合是羧甲基纤维素钠添加量 2.5‰、果胶添加量 1.1‰、结冷胶添加量 0.3‰, 此条件下产品的稳定性指数为 1.1, 感官评分为 94.5 分, 产品稳定性较好, 口感酸甜可口; 醛类、酮类、醇类物质在发酵后出现较大变化, 核桃乳发酵后香气品质得到显著提升。

关键词: 发酵, 核桃乳, 稳定性指数, 口感, 香气成分

中图分类号: TS255.6

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2023)10-0203-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080033

本文网刊:



Optimization of Formulation Stabilizer and Analysis of Volatile Component in Fermented Walnut Milk

LI Xiceng¹, XIA Junxia¹, ZHAO Huibo¹, WU Yanbing¹, DAI Shengxing¹, LIU Lei¹, XU Shan¹,
GAO Fei¹, LU Min^{1,2,*}

(1. Hebei Yangyuan Zhihui Beverage Co., Ltd., Hengshui 053000, China;

2. Hebei Key Laboratory of Walnut Nutritional Function and Processing Technology, Hengshui 053000, China)

Abstract: Herein, walnut without pellicle was utilized as the raw material for the production of fermented walnut milk. The factors affecting quality of fermented walnut milk were investigated. The formulation of stabilizer in fermented walnut milk was optimized by a single factor experiment and orthogonal test with the amount of carboxymethylcellulose sodium (CMC-Na), pectin and gellan gum as investigation factors. The stability index and sensory score were used as evaluation indices. Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) combined with headspace solid-phase microextraction (HS-SPME) was used to characterize the volatile profile of walnut milk before and after fermentation. The results showed that the optimal formulation was 2.5‰ CMC-Na, 1.1‰ pectin and 0.3‰ gellan gum. Under these conditions, the walnut milk exhibited good stability and sour-sweet and delicious taste with the stability index 1.1 and sensory score 94.5. There was a great variability in aldehydes, ketones and alcohols and the aroma quality of walnut milk was significantly improved.

Key words: fermentation; walnut milk; stability index; taste; volatile components

核桃中含有丰富的营养成分, 包括蛋白质、不饱 和脂肪酸、多糖、多酚、维生素以及多种矿物质元素

收稿日期: 2022-08-03

基金项目: 河北省农业科技成果转化资金项目 (21627105D); 河北省创新能力提升计划项目 (22567667H)。

作者简介: 李喜层 (1990-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 食品加工技术, E-mail: 871775979@qq.com。

* 通信作者: 路敏 (1985-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 食品加工技术, E-mail: 312962834@qq.com。

等^[1-6]。目前,植物蛋白发酵饮品越来越受到国内外研究人员的追捧,其中主要以大豆、核桃、椰子、巴旦木等为原料进行发酵^[7-10]。与牛乳动物蛋白相比,我国植物蛋白的资源更加丰富,且在氨基酸组成上具有互补作用,因此发展植物蛋白的加工利用对解决我国奶源缺乏问题、改善饮食结构有重要意义^[11-12]。

发酵核桃乳是一种以核桃为原料,经磨浆、发酵、杀菌、灌装等步骤制得的乳酸菌发酵植物蛋白饮品^[13-14]。但由于核桃中脂肪含量丰富,不利于微生物的生长,核桃蛋白等电点分布多,成品稳定体系不易构建,使用纯核桃制作发酵核桃乳的工艺存在较大难度。目前,国外对于植物蛋白发酵饮品主要集中在发酵豆乳^[15]、发酵花生乳^[16],很少有关于发酵核桃乳的研究报道。国内部分研究人员通过将核桃与动物蛋白原料进行复合发酵来制备发酵核桃乳。例如赵娟娟等^[17]以核桃乳为主要原料,通过添加乳酸菌干粉制剂 HS101 及乳清粉经发酵凝固制成发酵型核桃乳,并确定了最佳的辅料条件及发酵条件;郑晓霞等^[18]以核桃和牛奶为原料,经乳酸菌发酵制备得到核桃发酵乳。虽然以上研究都制备得到发酵核桃乳,但不是纯核桃发酵制备的,因此,如何在添加外源蛋白质的情况下解决发酵核桃乳蛋白沉淀、油脂上浮和酸败变质等质量问题,增强其乳化性能、提高分散介质的黏度等是亟待解决的难题。同时目前对于发酵核桃乳的研究大多集中在生产工艺优化及改良配方层面,对于涉及的风味物质研究尚不足^[19]。香气成分的种类和含量影响饮品的风味和营养价值,是饮品研究中的重要考察指标之一。发酵核桃乳中有机酸、脂肪酸等营养成分含量的增减在一定程度上会改变物质的香气成分^[13]。

本文以脱皮核桃仁为原料,通过研究羧甲基纤维素钠、果胶、结冷胶 3 种稳定剂的协同使用,利用 Turbiscan Lab 全方位稳定性分析测试仪测定发酵核桃乳稳定性指数,研究其对稳定性的影响,并结合发酵核桃乳成品感官评价,优化稳定剂组合配比条件,利用发酵核桃乳生产技术制得一款稳定性良好、酸甜可口、营养美味的发酵核桃乳,同时对核桃乳发酵前后香气物质的变化进行研究分析,以期发酵核桃乳的稳定性研究和香气研究提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

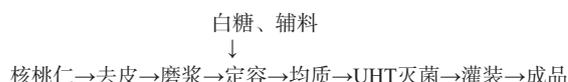
复合乳酸菌发酵剂(嗜热链球菌、保加利亚乳杆菌) 杜邦营养食品配料(北京)有限公司;核桃仁 河北养元智汇饮品股份有限公司;白砂糖 山东星光糖业有限公司;葡萄糖 保龄宝生物股份有限公司;氢氧化钠 分析纯,天津坤鹏化工有限公司;果胶(150H) 斯比凯可公司;羧甲基纤维素钠(FH9)、结冷胶(MAS100) 丹尼斯克(中国)投资有限公司。

TW-PB3X5L 型恒温加热、冷却水浴槽 上海沃迪自动化装备股份有限公司;HW30 型实验室搅拌

机 上海恒川机械设备有限公司;METTLER TOLED 型 pH 计、AL204/01 型电子分子天平 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;LDZM-60KCS 型立式压力蒸汽灭菌器 上海市申安医疗器械厂;JMS-80A 型胶体磨 廊坊市惠友机械有限公司;GYB60-6S 型高压均质机 上海市东华高压均质机厂;SW-CJ-2FD 型垂直净化工作台 上海博讯实业有限公司;GCMS-QP2010 型气质联用仪 日本岛津仪器有限公司;UHT 超高温瞬时杀菌机 利乐中国有限公司。

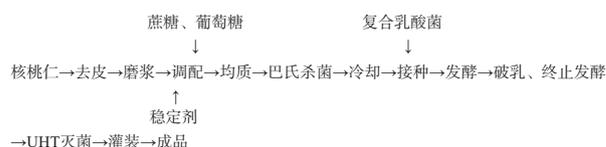
1.2 实验方法

1.2.1 未发酵核桃乳的加工工艺流程



1.2.2 发酵核桃乳的制备工艺

1.2.2.1 发酵核桃乳的加工工艺流程



1.2.2.2 工艺要点 选取成熟、饱满、新鲜、无虫蛀的核桃仁,去皮后备用;脱皮核桃仁经胶体磨按料水比 1:3 磨浆得到核桃浆液,将 2.5%羧甲基纤维素钠、1.1%果胶、0.3%结冷胶和 7%糖(葡萄糖:蔗糖=5:2)经高速剪切得到辅料溶液,然后将核桃浆液和辅料溶液混合后定容进行两次均质,均质压力分别为 (30±2)、(40±2) MPa;将均质好的料液在 (92±3) °C 条件下经 5~10 min 进行巴氏杀菌,冷却至 42~44 °C 接种,发酵时间 6~8 h 时破乳、冷却;将发酵好的核桃乳在 110~120 °C 条件下经 15~30 s 进行超高温瞬时灭菌得成品。

1.2.3 单因素实验 按照 1.2.2 发酵核桃乳的制备工艺制备发酵核桃乳,并保证在其他条件一致的前提下,以发酵核桃乳稳定性指数、感官评分为指标,考察羧甲基纤维素钠添加量(1.5‰、2‰、2.5‰、3‰、3.5‰)、果胶添加量(0.5‰、0.7‰、0.9‰、1.1‰、1.3‰)、结冷胶添加量(0.1‰、0.2‰、0.3‰、0.4‰、0.5‰)3 个因素对发酵核桃乳稳定性及口感的影响。

1.2.4 正交试验 在单因素实验的基础上,以羧甲基纤维素钠添加量(A)、果胶添加量(B)、结冷胶添加量(C)为研究对象,以发酵核桃乳稳定性指数、感官评分为考察指标,采用 $L_9(3^4)$ 正交试验研究组合下的发酵核桃乳最佳稳定剂添加量,因素水平表如表 1 所示。

1.2.5 核桃乳稳定性测试 将待测样品置于样品池中,装液量大约为 20 mL,选取背散射光对样品进行分析,采用多次扫描模式进行测量,扫描温度为室温,

表 1 正交试验因素水平
Table 1 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素		
	A 羧甲基纤维素钠添加量 (%)	B 果胶添加量 (%)	C 结冷胶添加量 (%)
1	2.25	1.0	0.25
2	2.50	1.1	0.30
3	2.75	1.2	0.35

探头从样品池的底部到样品池的顶部每隔 40 μm 测量一次,完成样品池从底部到顶部的测量称为 1 次扫描。设定样品扫描时间为 24 h,扫描间隔为 1 h,测试温度恒定为 25 ℃,扫描曲线第一次为蓝色,最后一次为红色^[20-21]。以初次扫描数据为 0 起始线,随着时间增加,样品内体系发生变化,与原起始线偏离越大,稳定性越差,反之则稳定性越好。稳定性动力学指数(TSI)曲线反映样品在整个扫描时间内浓度和颗粒粒径的变化幅度的综合情况,TSI 变化幅度越小,稳定性动力学指数越小,说明体系越稳定^[22-24]。

稳定性动力学指数是以 1 条选定时间的扫描曲线为参比曲线(系统默认以第 1 条曲线为参比)其他时间所得到的光强值按下式(1)^[21]进行计算:

$$d_1 = \frac{|\text{scan}_{\text{ref}}(h) - \text{scan}_1(h)|}{H} \quad \text{式 (1)}$$

式中: d_1 : 稳定性动力学指数(TSI); $\text{scan}_{\text{ref}}(h)$: 某测定时间的光强值(%); $\text{scan}_1(h)$: 参比曲线的光强值(%); H : 样品的高度(mm)。

1.2.6 成品感官评分标准 感官评价小组成员由 30 名受过训练的专业人士组成(15 男 15 女),评价人员以色泽、滋味、组织状态、气味为指标对发酵核桃乳进行评价,感官评分标准见表 2,满分为 100 分,得分结果取 30 人总分的平均值。评价人员在评定样品后将样品吐出至水槽内,两个样品品尝间隙休息大约 2 min,使用纯净水去除样品残留味道,尽量减少上次品尝样品余味的影响。

1.2.7 香气测定 采用顶空固相微萃取(headspace solid phase microextraction, HS-SPME)和气相色谱质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)联用技术测定核桃乳产品中的香气成分^[15]。吸取 3 mL 核桃乳,加入至 15 mL 顶空瓶置于磁力加热搅拌装置上加热至 40 ℃ 保持 20 min,插入固相微萃取头(50/30 μm DVB/CAR/PDMS)于 40 ℃ 吸附 20 min。立即取出萃取头于进样口解析 2 min。气

相色谱和质谱具体条件如下: HP-5MS 色谱柱(30 m×0.32 mm×0.25 μm)。载气: 高纯氦气(99.999%),流速 1.0 mL/min,不分流模式。进样口温度 270 ℃。程序升温: 初始温度 40 ℃,保持 3 min; 40~100 ℃,升温速率 3 ℃/min,保持 4 min; 100~250 ℃,升温速率 5 ℃/min,保持 5 min。离子源温度 250 ℃,四级杆温度 130 ℃,质量扫描范围 m/z 35~350。检索 NIST 17 数据库定性分析,筛选匹配度大于 85% 的化合物,面积归一化法定量。各种挥发性物质的香气特征,通过 TGSC 数据库进行检索。

1.3 数据处理

每个实验重复 3 次,取平均值,利用 Origin 2021 和 Excel 等软件进行绘图,通过 SPSS19.0 统计软件进行数据分析,差异显著性水平($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果

2.1.1 羧甲基纤维素钠添加量的影响 羧甲基纤维素钠属于阴离子多糖,在酸性条件下可吸附于蛋白质表面,该吸附层提供的空间位阻效应维持了体系稳定。当羧甲基纤维素钠添加量低时,羧甲基纤维素钠不能充分均匀吸附于蛋白质表面,即部分蛋白质分子自身可能发生聚集,体系无法维持稳定,感官评分也较低^[25]。

如图 1 所示,当添加量达到 2.5‰ 时,羧甲基纤维素钠足以覆盖于蛋白质表面,蛋白质能够被充分均匀地保护起来,稳定不聚集,此时感官评分较高,TSI 处于最小值;但当添加量超过 2.5‰ 时,羧甲基纤维素钠在蛋白质表面发生多层吸附,多余的羧甲基

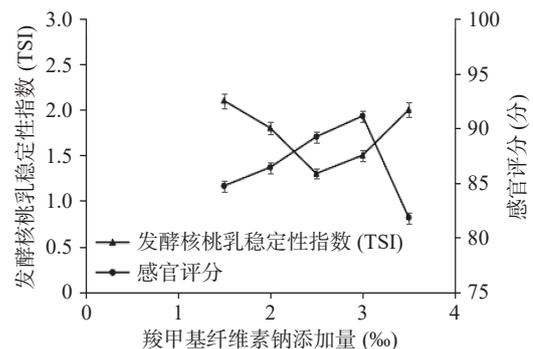


图 1 羧甲基纤维素钠对发酵核桃乳稳定性指数和感官评分的影响

Fig.1 Effect of sodium carboxylcellulose on stability index and sensory score of fermented walnut milk

表 2 发酵核桃乳感官评分标准

Table 2 Sensory scoring criteria for fermented walnut milk

指标(分值)	18~25分	10~17分	0~9分
色泽(25分)	颜色均匀一致	颜色略不均匀	颜色明显不均匀
滋味(25分)	酸甜可口,稠厚适中	略酸或略甜,略有粘稠感	过酸或过甜,有糊口感
组织状态(25分)	细腻光滑,无分层、沉淀	组织略粗糙,无分层、沉淀	有分层、沉淀,组织粗糙
气味(25分)	浓郁的核桃香和发酵香,无异味	核桃香略淡,但无异味	核桃香很弱,明显有异味

纤维素钠反而将稳定体系破坏掉,组织状态变差,且添加量超过 3‰后增稠效果明显,产品黏度过大,有糊口感,感官评分降低。因此,综合发酵核桃乳稳定性指数和感官评分,确定 2.5‰为羧甲基纤维素钠的适宜添加量。

2.1.2 果胶添加量的影响 果胶与蛋白质复合胶粒间的静电排斥作用维持着体系稳定。如图 2 所示,果胶添加量在 0.5‰~1.1‰之间时,随着果胶添加量增加,TSI 减小,即果胶添加量达到 1.1‰时,能够和蛋白质通过静电作用充分结合来阻止蛋白质分子聚集,保证体系均一稳定;但添加量超过 1.1‰时,由于静电作用以及分子间的摩擦力增大,导致发酵核桃乳黏度增加,同时感官评分降低。因此,确定 1.1‰为果胶的适宜添加量。

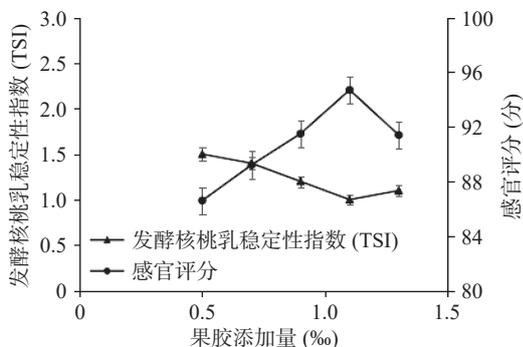


图2 果胶添加量对发酵核桃乳稳定性指数和感官评分的影响

Fig.2 Effect of pectin addition on the stability index and sensory score of the fermented walnut milk

2.1.3 结冷胶添加量的影响 结冷胶是一种阴离子线性微生物多糖,一定范围内,随着结冷胶添加量增大,TSI 减小。从图 3 中可以看出,添加量过小不能起到稳定悬浮作用,产品组织状态差,口感也较差;当添加量达到 0.3‰时,TSI 最小,即结冷胶能够控制发酵核桃乳成品颗粒沉淀及体系分层现象,产品稳定性较好;当添加量超过 0.3‰时,发酵核桃乳容易产生弱凝胶,体系失稳;当添加量超过 0.4‰后产品口感变差,感官评分降低,这是由于结冷胶添加量过高,造成

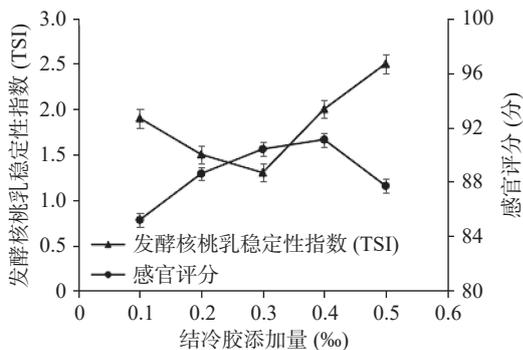


图3 结冷胶添加量对发酵核桃乳稳定性指数和感官评分的影响

Fig.3 Effect of the amount of cold glue addition on the stability index and sensory score of the fermented walnut milk

产品增稠明显,口感不愉悦。因此,综合考虑发酵核桃乳稳定性指数和感官评分,确定 0.3‰为结冷胶的适宜添加量。

2.2 正交试验结果

由表 3 和表 4 直观分析结果可知,以发酵核桃乳稳定性指数为考察指标时,3 个因素对稳定性指数的影响大小依次为 A>C>B,即羧甲基纤维素钠添加量>结冷胶添加量>果胶添加量, A₂B₂C₂D₂ 为最佳组合方案。以感官评分为考察指标时,3 个因素对感官评分的影响大小依次为 A>C>B,即羧甲基纤维素钠添加量>结冷胶添加量>果胶添加量, A₂B₂C₂D₂ 为最佳组合方案。虽然考察指标不同,但 3 个因素所起主次作用相同,即羧甲基纤维素钠和结冷胶是主要影响因素,果胶是次要影响因素。综合考虑,以发酵核桃乳稳定性指数、感官评分为参考标准,确定最佳稳定剂组合为 A₂B₂C₂D₂,即羧甲基纤维素钠添加量 2.5‰、果胶添加量 1.1‰、结冷胶添加量 0.3‰。

表3 正交试验设计与结果
Table 3 Design and result of orthogonal experiment

序号	A	B	C	D	发酵核桃乳稳定性指数TSI	感官评分(分)
1	1	1	1	1	2.1	86.8
2	1	2	2	2	1.6	88.9
3	1	3	3	3	2.0	86.6
4	2	1	2	3	1.2	93.2
5	2	2	3	1	1.5	91.6
6	2	3	1	2	1.5	91.8
7	3	1	3	2	1.9	86.7
8	3	2	1	3	2.0	86.9
9	3	3	2	1	1.7	88.7
k ₁	1.900	1.733	1.867	1.767		
k ₂	1.400	1.700	1.500	1.667		
k ₃	1.867	1.733	1.800	1.733		
R	0.500	0.033	0.367	0.100		
k ₁ '	87.433	88.900	88.500	89.033		
k ₂ '	92.200	89.133	90.267	89.133		
k ₃ '	87.433	89.033	88.300	88.900		
R'	4.767	0.233	1.967	0.233		

表4 方差分析表
Table 4 Analysis of variance

因素	偏差平方和	自由度	F比	F临界值	显著性
A	0.469	2	234.500	19.000	*
B	0.002	2	1.000	19.000	
C	0.229	2	114.500	19.000	*
D	0.016	2	8.000	19.000	
误差	0.00	2			
A'	45.442	2	554.171	19.000	*
B'	0.082	2	1.000	19.000	
C'	7.029	2	85.720	19.000	*
D'	0.082	2	1.000	19.000	
误差	0.08	2			

注:“*”表示差异显著(P<0.05)。

对上述最佳稳定剂组合做验证试验,重复 3 次并取平均值,最终得测定得到发酵核桃乳稳定性指数

为 1.1, 感官评分为 94.5 分, 证明甲基纤维素钠添加量 2.5%、果胶添加量 1.1%、结冷胶添加量 0.3% 为最佳稳定剂组合。

2.3 核桃乳发酵前后香气品质分析

按照 1.2.2 发酵核桃乳的制备工艺并结合上述试验得到的最佳稳定剂组合制备发酵核桃乳, 与未发酵核桃乳(按照 1.2.1 未发酵核桃乳的加工工艺流程

制备)进行香气成分的对比及分析。发酵核桃乳的挥发性物质的含量及香气阈值决定了其香气品质。通过 HP-SPME/GC-MS 分析了核桃乳的挥发性物质, 共检测出匹配度大于 80% 的物质 47 种(表 5), 主要为醇类、醛类、酯类、酮类和烃类物质等^[26]。其中共有香气物质占检出香气物质的 28%。

醛类物质是核桃乳特征香味的主要来源, 主要

表 5 核桃乳挥发性物质分析
Table 5 Analysis of volatile substances in walnut milk

序号	未发酵核桃乳香气物质相对含量(%)	发酵核桃乳香气物质相对含量(%)	香气描述	
1	1-己醇	2.77	-	草本香味、花香、甜香、果香
2	1-戊醇	0.80	2.82	刺激性、发酵味
3	1-辛烯-3-醇	4.09	5.34	鸡肉、蘑菇和干草香气
4	2-乙基-1-己醇	-	0.55	玫瑰花香
5	2-丁基-1-辛醇	-	0.59	
6	庚醇	-	0.55	甜香、草本香、清香
7	3-甲基-1-丁醇	-	1.94	苹果、白兰地、辛辣味
小计	醇类	7.67	11.80	
8	正己醛	35.00	34.56	青草香、果香和脂肪香气
9	庚醛	2.63	1.44	柑橘、脂肪
10	苯甲醛	-	4.05	苦杏仁、甜香
11	壬醛	6.39	9.48	甜香、柑橘香、蜡香
12	癸醛	0.93	2.92	甜香、柑橘香、蜡香、花香
13	戊醛	3.13	-	酒香、巧克力香
14	辛醛	1.30	2.43	脂肪香、柑橘香
15	E-2-庚烯醛	-	4.96	脂肪香
16	E-2-辛烯醛	-	2.06	坚果、脂肪香
17	E-2-壬烯醛	-	0.59	肥皂味、黄瓜香
18	十二醛	-	0.22	肥皂味、蜡香、柑橘香
19	3-甲基丁醛	4.58	-	果香、坚果香
小计	醛类	53.96	62.70	
20	3-甲基戊酸甲酯	0.44	-	
21	4-甲基-2-戊醇乙酸酯	-	0.21	甜果香、类似香蕉
22	丁酸甲酯	0.74	2.16	果香、发酵乳香
23	乙酸异丁酯	0.63	-	水果甜香
24	乙酸异戊酯	1.00	-	刺激性、类似香蕉
25	棕榈酸乙酯	0.37	-	奶油香、发酵乳香味、黄油香
小计	酯类	3.18	2.37	
26	6-甲基-5-庚烯-2-酮	0.77	-	发霉、苹果、香蕉和绿豆香
27	2-甲基四氢噻吩-3-酮	-	2.31	果香
28	2,3-庚二酮	-	0.24	奶香、黄油香、焦糖
29	2-壬酮	-	0.24	奶酪香、果香、乳香
30	3-己酮	-	10.45	甜香、果香、蜡香
31	2-庚酮	-	0.55	奶酪香、果香、椰子香、蜡香
32	3-甲基-2-戊酮	-	0.77	
小计	酮类	0.77	14.58	
33	甲苯	4.07	-	
34	2-戊基呋喃	-	0.65	青豆、黄油、青香
35	庚烷	2.91	-	
36	对二甲苯	1.82	0.43	
37	3-甲基-己烷	-	1.18	
38	乙基环己烷	1.94	-	
39	2,2-二甲基己烷	8.24	-	
40	2,3,4-三甲基己烷	3.22	-	

续表 5

序号		未发酵核桃乳香气物质相对含量(%)	发酵核桃乳香气物质相对含量(%)	香气描述
41	D-柠檬烯	2.11	0.58	草香、柑橘香、薄荷香
42	α -蒎烯	0.34	-	松木、樟木香、松节油香
43	(E)-5-十三烯	-	1.43	
44	十二烷	5.34	0.53	
45	十四烷	2.47	2.08	
46	十五烷	1.28	-	蜡香
47	十七烷	0.68	1.61	
小计	其他	34.42	8.49	

来自加工过程中美拉德反应、Strecker 氧化降解、亚油酸和亚麻酸的氧化降解^[27]。醛类物质通常具有甜香、坚果香、脂肪香和果香等特征。核桃乳经过发酵后,醛类物质相对占比由 53.96% 升至 62.70%(表 5)。正己醛(青草香、果香和脂肪香气)为亚油酸的氧化产物之一^[28-29]。在核桃乳中正己醛是最主要的醛类物质,其次是壬醛、戊醛和庚醛。发酵前后,正己醛的相对占比变化小。经发酵后,核桃乳中出现了苯甲醛(来源于苯丙氨酸的 Strecker 降解^[30])、E-2-庚烯醛(来源于不饱和脂肪酸氧化)^[31-32]、E-2-辛烯醛和 E-2-壬烯醛等醛类物质,这些物质都具有典型的坚果香气和脂肪香气,而戊醛和 3-甲基丁醛降低。

酮类化合物多由氨基酸分解、美拉德反应和多种不饱和脂肪酸热氧化降解生成^[14,33]。6-甲基-5-庚烯-2-酮是类胡萝卜素代谢的重要中间化合物^[34]。经复合乳酸菌发酵后,酮类物质相对含量变化最为明显,6-甲基-5-庚烯-2-酮含量降低,而新出现了 6 种酮类物质,说明发生了更多氧化反应,发酵核桃乳呈现更多的奶香和果香味。

醇类也是核桃香气特征组成的关键物质^[35],主要来源于脂肪酸分解。发酵核桃乳的醇类相对占比为 11.80%。1-己醇具有草本香味、花香、甜香和果香^[36],在核桃或者加工核桃产品中 1-己醇是主要的醇类物质之一^[28],表 5 显示发酵核桃乳中 1-己醇含量降低,而 1-戊醇(刺激性、发酵味)、1-辛烯-3-醇(亚油酸氧化产物,鸡肉、蘑菇和干草香气)^[37]等六种醇类物质相对含量上升。

经过发酵后,4-甲基-2-戊醇乙酸酯(甜果香、香蕉香味)和丁酸甲酯(果香、发酵乳香)升高,其他四种酯类物质(3-甲基戊酸甲酯、乙酸异丁酯、乙酸异戊酯、棕榈酸乙酯)在发酵核桃乳中均未检出,由于酯类物质有很低的阈值,所以低浓度酯类物质仍然是发酵核桃乳风味的重要贡献者之一^[38]。

烃类物质香气阈值较高,通常对核桃乳的香气贡献较小,一般来源于核桃原料中或者在加工过程中产生^[30,39]。通过 HS-SPME-GC-MS 分析得知,醛类、醇类、酮类物质在发酵前后变化较大,烃类物质变化较小。

3 结论

本文以脱皮核桃仁为原料,通过单因素实验和正交试验,优化了发酵核桃乳的各稳定剂单体的添加

量,最优条件下测得发酵核桃乳的稳定性指数为 1.1,感官评分为 94.5 分,产品的稳定性较好,口感最佳。研究表明稳定剂协同使用可以提升发酵核桃乳的稳定体系。通过对核桃乳发酵前后香气物质及含量进行测定,可知醛类、酮类、醇类物质在发酵前后变化较大,烃类物质变化较小,核桃乳发酵后香气品质得到显著提升。该结论为发酵核桃乳的加工与开发提供了参考。

参考文献

- [1] WANG R, TIAN X, LI Q, et al. Walnut pellicle color affects its phenolic composition: Free, esterified and bound phenolic compounds in various colored-pellicle walnuts[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2022, 109: 104470.
- [2] SZE-TAO K W C, SATHE S K. Walnuts (*Juglans regia* L.) proximate composition, protein solubility, protein amino acid composition and protein *in vitro* digestibility[J]. *Sci Food Agr*, 2000, 80(9): 1393-1401.
- [3] 张亭, 杜倩, 李勇. 核桃的营养成分及其保健功能的研究进展[J]. *中国食物与营养*, 2018, 24(7): 64-69. [ZHANG T, DU Q, LI Y. Nutritional component and health functions of walnuts[J]. *Food and Nutrition in China*, 2018, 24(7): 64-69.]
- [4] PEREIRA J A, OLIVEIRA I, SOUSA A, et al. Bioactive properties and chemical composition of six walnut (*Juglans regia* L.) cultivars[J]. *Food Chem Toxicol*, 2008, 46(6): 2103-2111.
- [5] SOLAR A, COLARIC M, USENIK V, et al. Seasonal variations of selected flavonoids, phenolic acids and quinones in annual shoots of common walnut (*Juglans regia* L.)[J]. *Plant Sci*, 2006, 170(3): 453-461.
- [6] 冯春艳, 荣瑞芬, 刘雪峥. 核桃仁及内种皮营养与功能成分分析研究进展[J]. *食品工业科技*, 2011, 32(2): 408-411, 417. [FENG C Y, RONG R F, LIU X Z. Research progress in nutritional and functional compositions analysis of walnut kernel and pellicle[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2011, 32(2): 408-411, 417.]
- [7] 封晓毓, 王江漫, 李奕迅, 等. 发酵酸豆乳加工工艺的探讨和优化[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(6): 2189-2196. [FENG X Y, WANG J M, LI Y X, et al. Discussion and optimization on processing technology of fermented soybean milk[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(6): 2189-2196.]
- [8] 夏君霞, 李喜层, 赵慧博, 等. 益生菌发酵纯核桃乳的工艺研究[J]. *现代食品科技*, 2018, 34(7): 175-180, 272. [XIA J X, LI X C, ZHAO H B, et al. Study on fermentation technology of pure walnut milk with probiotics[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2018, 34(7): 175-180, 272.]

- [9] 韩喜艳, 宋菲, 赵松林, 等. 椰子植物酸奶制备工艺优化研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(20): 55-62. [HAN X Y, SONG F, ZHAO S L, et al. Study on optimization of preparation process of coconut plant-based yoghurt[J]. Food Research and Development, 2021, 42(20): 55-62.]
- [10] 王占东, 张居典, 邵景海, 等. 植物基酸奶作为市场乳制品替代的可行性研究[J]. 食品安全导刊, 2021(12): 166-167, 169. [WANG Z D, ZHANG J D, SHAO J H, et al. Feasibility study of plant-based yogurt as a market dairy alternative[J]. China Food Safety Magazine, 2021(12): 166-167, 169.]
- [11] 马志梅, 褚少兴. 植物蛋白发酵饮料的发展前景[J]. 食品工业科技, 2014, 35(11): 36-37. [MA Z M, CHU S X. Development prospects of plant protein fermented drinks[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(11): 36-37.]
- [12] 裴瓌花. 益生菌发酵核桃乳工艺研究及产品优化[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019. [PEI P H. Study on the processing technic of fermented walnut milk with probiotics and product optimization[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019.]
- [13] 秦明, 贾英民. 发酵核桃乳研究现状及展望[J]. 食品工业科技, 2020, 41(14): 354-360. [QIN M, JIA Y M. Research status and prospect of fermented walnut milk[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(14): 354-360.]
- [14] LIU W, PU X, SUN J, et al. Effect of *Lactobacillus plantarum* on functional characteristics and flavor profile of fermented walnut milk[J]. LWT, 2022, 160: 113254.
- [15] PENG X H, LIAO Y, REN K Y, et al. Fermentation performance, nutrient composition, and flavor volatiles in soy milk after mixed culture fermentation[J]. Process Biochemistry, 2022, 121: 286-297.
- [16] SUNNY-ROBERTS E O, OTUNOLA E T, IWAKUN B T. An evaluation of some quality parameters of a laboratory-prepared fermented groundnut milk[J]. European Food Research and Technology, 2004, 218(5): 452-455.
- [17] 赵娟娟, 吴荣荣, 程书梅. 发酵型核桃乳发酵工艺的研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(3): 101-105. [ZHAO J J, WU R R, CHENG S M. Study on walnut milk fermentation process[J]. Food Research and Development, 2017, 38(3): 101-105.]
- [18] 郑晓霞, 张慧芳, 罗文健, 等. 核桃发酵乳的制备工艺研究[J]. 农产品加工, 2016(6): 23-26. [ZHENG X X, ZHANG H F, LUO W J, et al. Preparation process development of walnut fermented drinks[J]. Farm Products Processing, 2016(6): 23-26.]
- [19] 黄周群. 含共轭脂肪酸的发酵核桃乳的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021. [HUANG Z Q. Study on the fermented walnut milk containing conjugated fatty acid[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.]
- [20] 姚奎章, 齐兵, 路敏, 等. 核桃乳酶解工艺及稳定性研究[J]. 现代食品科技, 2016, 32(8): 259-264. [YAO K Z, QI B, LU M, et al. Study on enzymatic hydrolysis process and stability of walnut milk[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(8): 259-264.]
- [21] 吕长鑫, 李萌萌, 徐晓明, 等. 利用 Turbiscan 稳定性分析仪检测紫苏酸性乳饮料乳化稳定性[J]. 中国食品学报, 2014, 14(4): 239-245. [LÜ C X, LI M M, XU X M, et al. Detection of emulsifying stability of perilla acid milk beverage by turbiscan stability analyzer[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2014, 14(4): 239-245.]
- [22] 王蔚瑜, 周雪松, 钟秀娟, 等. 利用 Turbiscan Lab 分散稳定性分析仪研究灭菌型褐色饮料稳定性[J]. 中国食品添加剂, 2016(2): 137-140. [WANG W Y, ZHOU X S, ZHONG X J, et al. Study on the stability of sterilized brown beverage by the Turbiscan Lab dispersion stability analyzer[J]. China Food Additives, 2016(2): 137-140.]
- [23] 王成祥, 刘辉, 段胜林, 等. 应用快速稳定性分析方法研究增稠剂对燕麦饮料稳定性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(3): 253-259. [WANG C X, LIU H, DUAN S L, et al. Research on the effect of thickening on the stability of oat beverage using rapid stability analysis instrument[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(3): 253-259.]
- [24] 钟秀娟, 张多敏, 周雪松, 等. 红枣豆奶稳定性分析[J]. 食品科技, 2011, 36(2): 86-89. [ZHONG X J, ZHANG D M, ZHOU X S, et al. The determination of the stability of soy milk with red date[J]. Food Science and Technology, 2011, 36(2): 86-89.]
- [25] 李艳如, 杨畅, 牛世祯, 等. 羧甲基纤维素钠在乳饮料体系中的应用评价[J]. 中国食品添加剂, 2020, 31(7): 92-98. [LI Y R, YANG C, NIU S Z, et al. Evaluation on the application of sodium carboxymethyl cellulose in milk beverage[J]. China Food Additives, 2020, 31(7): 92-98.]
- [26] WEI F, CHEN Q, DU Y, et al. Effects of hulling methods on the odor, taste, nutritional compounds, and antioxidant activity of walnut fruit[J]. LWT, 2020, 120: 108938.
- [27] HAO J, XU X, JIN F, et al. HS-SPME GC-MS characterization of volatiles in processed walnuts and their oxidative stability[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(7): 2693-2704.
- [28] MU H, GAO H, CHEN H, et al. Study on the volatile oxidation compounds and quantitative prediction of oxidation parameters in walnut (*Carya cathayensis* Sarg.) oil[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2019, 121(6): 1800521.
- [29] 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 H K, YANG J W, LIU W Y, et al. Comparison of volatile components and characterization of key aroma components of walnut oil produced by different processes[J]. Food Science, 2021, 42(16): 185-192.]
- [30] 朱庆珍, 随新平, 王羽桐, 等. 焙烤对核桃乳关键性香气成分的影响分析[J]. 精细化工, 2020, 37(12): 2562-2570. [ZHU Q Z, SUI X P, WANG Y T, et al. Analysis of the effect of roasting on the key aroma compounds of walnut milk[J]. Fine Chemicals, 2020, 37(12): 2562-2570.]
- [31] ELMORE J S, NISYRIOS I, MOTTRAM D S. Analysis of the headspace aroma compounds of walnuts (*Juglans regia* L.)[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2005, 20(5): 501-506.
- [32] GROSSO A L, ASENSIO C M, NEPOTE V, et al. Antioxidant activity displayed by phenolic compounds obtained from walnut oil cake used for walnut oil preservation[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2018, 95(11): 1409-1419.
- [33] 李开, 范蓉川, 丁岚, 等. 核桃蛋白酶解过程中香气成分的动态变化[J]. 食品工业科技, 2022, 43(6): 41-49. [LI K, FAN Y C, DING L, et al. Dynamic changes in volatile flavor components during enzymatic hydrolysis of walnut (*Juglans regia* L.) protein[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(6): 41-49.]
- [34] XU Y, BI S, NIU X, et al. Comparison of aroma active com-

pounds in cold-and hot-pressed walnut oil by comprehensive two-dimensional gas chromatography-olfactory-mass spectrometry and headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. *Food Research International*, 2023, 163(11): 112208.

[35] 王勇. HS-SPME-GC-MS 结合 ROAV 法对市售核桃油香气成分的研究 [J]. *粮食与油脂*, 2020, 33(6): 63-66. [WANG Y. Analysis of aroma component in commercial walnut oil by HS-SPME-GC-MS combined ROAV method[J]. *Cereals & Oils*, 2020, 33(6): 63-66.]

[36] 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 Chemistry*, 2021, 363:

130331.

[37] GRILO F S, WANG S C. Walnut (*Juglans regia* L.) volatile compounds indicate kernel and oil oxidation[J]. *Foods*, 2021, 10(2): 329.

[38] DAN T, WANG D, WU S, et al. Profiles of volatile flavor compounds in milk fermented with different proportional combinations of *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* and *Streptococcus thermophilus* [J]. *Molecules*, 2017, 22(10): 1633.

[39] 石天磊, 李晓颖, 左波, 等. 8 份核桃资源坚果主要香气物质分析 [J]. *果树学报*, 2020, 37(7): 1016-1024. [SHI T L, LI X Y, ZUO B, et al. Analysis of the main aroma substances in eight walnut accessions[J]. *Journal of Fruit Science*, 2020, 37(7): 1016-1024.]