

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250109004

引用格式: 聂宇嫦, 曹淑芳, 解梦汐, 等. 花生纳豆制备过程中品质分析及贮藏稳定性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(8): 180–188.

NIE YC, CAO SF, XIE MX, et al. Quality analysis and storage stability of *Arachis hypogaea* L. natto during preparation [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(8): 180–188. (in Chinese with English abstract).

花生纳豆制备过程中品质分析及贮藏稳定性研究

聂宇嫦¹, 曹淑芳¹, 解梦汐², 于森², 石太渊², 杨立娜^{1,2*}

(1. 渤海大学食品科学与工程学院, 锦州 121013; 2. 辽宁省农业科学院食品与加工研究所, 沈阳 110161)

摘要: **目的** 探究纳豆芽孢杆菌发酵对红花生制成的花生纳豆品质特性及贮藏稳定性的影响。**方法** 通过采用纳豆芽孢杆菌发酵4粒红花生制得一款新型的花生制品——花生纳豆, 并对其品质特性及贮藏稳定性进行系统观察。本研究测定了花生纳豆的蛋白质含量、脂肪含量、风味物质等, 并在贮藏期间监测了感官评分和 L^* , 同时测定了总挥发性盐基氮(total volatile base nitrogen, TVB-N)含量、氨基酸态氮含量和 a^* 等指标。**结果** 与未接种花生相比, 花生纳豆的蛋白质含量降至25.84%, 脂肪含量降至17.72%。发酵促进了醇类和芳香族物质的产生, 使花生纳豆的风味与其他处理方式的花生呈现显著差异, 主要体现在酸味、咸味、鲜味和苦味上。发酵过程中脂肪水解产生亚油酸, 导致脂肪含量降低; 同时, 部分不易流动水向弱结合水迁移。贮藏期间, 花生纳豆的感官评分、 L^* 及 b^* 随时间延长而降低, 而TVB-N含量与氨基酸态氮含量则随之升高。**结论** 纳豆芽孢杆菌发酵显著改变了花生纳豆的营养成分和风味特性; 在贮藏过程中, 花生纳豆的感官品质有所下降, 这些发现为利用纳豆芽孢杆菌发酵花生提供了理论依据, 并为开发新型花生制品提供了新的思路。

关键词: 花生; 纳豆; 品质分析; 贮藏稳定性

Quality analysis and storage stability of *Arachis hypogaea* L. natto during preparation

NIE Yu-Chang¹, CAO Shu-Fang¹, XIE Meng-Xi², YU Miao², SHI Tai-Yuan², YANG Li-Na^{1,2*}

(1. College of Food Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121013, China;

2. Food and Processing Research Institute, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of *Bacillus natto* fermentation on the quality characteristics and storage stability of *Arachis hypogaea* L. natto produced from red *Arachis hypogaea* L.. **Methods** A novel *Arachis hypogaea* L. product, *Arachis hypogaea* L. natto, was prepared through fermentation using *Bacillus natto*, and its quality characteristics and storage stability were systematically evaluated. In this study, the protein content, fat content and flavor compounds of *Arachis hypogaea* L. natto were determined. Sensory scores and L^* were monitored

收稿日期: 2025-01-09

基金项目: 辽宁省“揭榜挂帅”科技攻关项目(2021JH1/1040003402)

第一作者: 聂宇嫦(1999—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为粮食、油脂及植物蛋白工程。E-mail: 2489646130@qq.com

*通信作者: 杨立娜(1987—), 女, 教授, 主要研究方向为粮油食品加工与食品营养。E-mail: yangln10@lzu.edu.cn

during the storage period. Additionally, the levels of total volatile basic nitrogen (TVB-N), amino acid nitrogen and a^* were assessed. **Results** The results indicated that compared with unfermented *Arachis hypogaea* L., the protein content of *Arachis hypogaea* L. natto decreased to 25.84%, and the fat content reduced to 17.72%. Fermentation promoted the production of alcohol and aromatic compounds, resulting in distinct flavor profiles characterized by sourness, saltiness, umami and bitterness. During fermentation, lipolysis produced linoleic acid, leading to a reduction in fat content. Moreover, some free water became less mobile, transitioning into weakly bound water. Over time, the sensory score and L^* and b^* of *Arachis hypogaea* L. natto declined, whereas the levels of TVB-N, amino acid nitrogen increased. **Conclusion** *Bacillus natto* fermentation significantly alters the nutritional composition and flavor characteristics of *Arachis hypogaea* L. natto. sensory quality deteriorates during storage. These findings provide a theoretical foundation for utilizing *Bacillus natto* in *Arachis hypogaea* L. fermentation and offer new insights into developing innovative *Arachis hypogaea* L. products.

KEY WORDS: *Arachis hypogaea* L.; natto; quality analysis; storage stability

0 引言

花生又名落花生, 豆科落花生属一年生草本植物。花生富含碳水化合物、蛋白质、脂肪、膳食纤维及 8 种必需氨基酸。含有多种维生素和矿物质, 不含胆固醇, 含 50% 单不饱和脂肪酸, 有助于降低心血管疾病风险、改善血脂、保护心脏。植物甾醇可降低血液胆固醇。花生能降低结直肠癌、阿尔茨海默症、糖尿病风险, 含锌促进脑细胞发育, 增强记忆, 延缓衰老。高饱腹感使其成为理想的食品工业原料。

发酵是一种利用微生物将有机大分子转化为小分子的过程, 它能够为食品带来一系列理想的变化。通过发酵, 食品中的维生素和必需氨基酸含量得以增加, 同时减少有害及抗营养因子。此外, 发酵还能改善食品的外观和风味, 并延长其保质期, 提高产品的抗氧化能力^[1]。微生物具有分解代谢和合成代谢的双重功能, 分解复杂的化合物, 合成维生素和其他生长因子^[2]。纳豆芽孢杆菌(*Bacillus natto*)作为一种革兰氏阳性好氧菌, 在生长繁殖过程中能够产生多种有助于营养物质消化吸收的酶类, 包括蛋白酶(尤其是碱性蛋白酶)、脂肪酶和淀粉酶等。在发酵过程中, 这种微生物能够水解蛋白质产生生物活性肽, 这些活性肽在抗氧化、抗高血压、抗血栓形成、抗脂肪生成、抗菌和抗炎以及免疫调节等方面发挥重要作用^[3], 与人工合成的生物活性肽相比, 通过微生物发酵获得的生物活性肽在经济性和安全性上更具优势。研究表明, 发酵能够降低原料的原有异味, 并产生新的芳香化合物, 从而改善产品的风味^[4]。此外, 发酵还能降低食品的致敏性, 相较于其他方法, 发酵是一种更安全、成本更低的处理方式。周阳^[5]研究发现, 花生蛋白粉经枯草芽孢杆菌发酵 44 h 后, 其的 Ara h 1 和 Ara h 2 水平显著降低使其致敏性显著降低。因此, 选择纳豆芽孢杆菌进行发酵, 不仅可以提高食品的营养价值和健

康益处, 还能改善食品的风味和安全性, 这使得纳豆芽孢杆菌成为发酵过程中一个理想的微生物选择。

目前, 纳豆在中国并未得到广泛食用, 主要是因为纳豆发酵后产生的刺鼻氨味让人望而却步。市场上的纳豆产品多采用传统黄豆作为原料, 口感单一且氨味过重。为解决这一问题, 许多学者正在通过调整原料和优化工艺的方法来改善纳豆的口感。与此同时, 国内对于纳豆芽孢杆菌发酵花生类物质的研究主要集中在发酵花生粕, 而对于发酵花生的研究较少, 花生作为一种备受喜爱且食用方式多样的食材, 如果用花生作为原料, 不仅可以使纳豆产品具有更丰富的营养价值, 还可以改良传统的纳豆发酵工艺, 为消费者提供更为健康美味的产品体验。

因此本研究通过用纳豆芽孢杆菌发酵四粒红花生制得一款新型的花生制品——花生纳豆, 并利用电子鼻、电子舌、激光共聚焦、低场核磁等手段对其品质特性以及贮藏期的稳定性进行观察, 为花生深加工提供了新方向, 对花生资源开发和利用十分有意义。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

四粒红花生(锦州大润发超市); 纳豆芽孢杆菌(安琪酵母股份有限公司)。

正己烷(色谱纯)、甲醇(色谱纯)(上海阿拉丁生化科技股份有限公司); 3,5-二硝基水杨酸(3,5-dinitrosalicylic acid, DNS)(广州和为医药科技有限公司); 尼罗蓝、尼罗红(北京博奥拓达科技有限公司); 葡萄糖标准溶液(北京雷根生物技术有限公司); 氢氧化钠(NaOH)、氢氧化钾、硫酸、无水硫酸钠、盐酸(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

K9840 自动凯氏定氮仪(山东海能科学仪器有限公司); SER148/6 全自动脂肪测定仪(意大利威尔普公司); Airsense

PE 电子鼻(德国 AIRSENSE 公司); SA402B controller 电子舌(味觉分析系统)(日本 INSENT 公司); GCMS-TQ8040NX 三重四级杆气相质谱联用仪、UV-2550 紫外可见分光光度计(日本岛津仪器有限公司); MesoMR23-040H-I 低场核磁共振仪(苏州纽迈分析仪器股份有限公司); LEICA STELLA 激光共聚焦显微镜(德国徕卡相机股份有限公司); ZD-2 自动电位滴定仪(上海雷磁仪器有限公司); CR-400 彩色差计(柯尼卡美能达(中国)投资有限公司); CM-1850 冷冻切片机[徕卡显微系统(上海)贸易有限公司]。

1.3 实验方法

1.3.1 花生纳豆的制备

参考李恋龙等^[6]、刘野等^[7]、王丽娜等^[8]的方法并稍做修改。将 10 g 花生剥去花生红衣(花生生组)后,室温下在水中浸泡 9 h(浸泡花生组),将花生隔水蒸 40 min(蒸花生组),待温度降到 50 °C 以下,接种 0.6% 纳豆芽孢杆菌,41 °C 发酵 36 h,发酵结束后,于 4 °C 下后熟 24 h,即得花生纳豆(花生纳豆组)。蒸花生冷却后置于 41 °C 下 36 h 为未接种花生组。

1.3.2 蛋白质含量测定

蛋白质含量测定参照 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中凯氏定氮法进行测定。

1.3.3 脂肪含量测定

脂肪含量测定参照 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中索氏抽提法进行测定。

1.3.4 总糖含量测定

总糖含量测定参考索化夷等^[9]的方法。葡萄糖标准曲线的制备:吸取 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6 mL 的 1 mg/mL 葡萄糖标准溶液,加入 25 mL 比色管中,加水至 2 mL,加 1.5 mL DNS 溶液,混匀后于沸水浴中加热 5 min,冷却后加水至 25 mL,于 540 nm 波长处测定吸光度。以吸光度为纵坐标(Y),葡萄糖的含量为横坐标(X, %),绘制标准曲线,回归方程为 $Y=0.5132X-0.0152$,相关系数(r^2)为 0.9991。

称取研磨均匀的样品 1.0 g 于烧杯中,加入 10 mL 6 mol/L 的盐酸和 15 mL 蒸馏水,沸水浴 15 min,冷却后加入一滴酚酞指示剂,用 6 mol/L NaOH 溶液中和至微红色,过滤,将滤液定容于 100 mL 容量瓶中,待用。取待测液 1 mL 于 25 mL 比色管中,加水至 2 mL,然后加入 1.5 mL DNS,混匀后沸水浴 5 min,冷却后加水至 25 mL,于 540 nm 波长处测定吸光度,样品中总糖的含量按式(1)计算:

$$X\%=(C \times V_1)/(m \times V_2) \times 0.9 \times 100\% \quad (1)$$

式中: X 为样品中总糖的含量,%; C 为查标准曲线所得水解后还原糖含量,%; V_1 为提取液总体积, mL; V_2 为测定时取用液体积, mL; m 为样品质量, g; 0.9 为校正系数,将总还原糖含量转换为葡萄糖含量。

1.3.5 电子鼻测定

将 10 g 样品置于 50 mL 离心管中,用保鲜膜封住管口,静置 15 min 使气味均匀分散于离心管中,将电子鼻针头插入离心管中进行测定。程序设置:自清洗传感器 90 s,样品分析时间为 120 s。10 个传感器名称和对挥发物的响应特性如下: W1C(芳香族化合物)、W5S(氮氧化合物)、W3C(氨和芳香族化合物)、W6S(氢类化合物)、W5C(烯烃和芳香族化合物)、W1S(烃类)、W1W(硫化氢)、W2S(醇和部分芳香族化合物)、W2W(芳香族化合物和有机硫化物)、W3S[烷烃(甲烷等)]。

1.3.6 电子舌测定

称取 12.5 g 样品碾碎,均匀分散于 50 °C 100 mL 蒸馏水中,50 °C 水浴 1 h。冷却后过 0.22 μm 的滤膜得澄清透明的样品滤液,将滤液装入电子舌专用杯中进行检测。电子舌系统包括 5 个测试传感器:酸味传感器(CA0)、咸味传感器(CT0)、鲜味传感器(AAE)、苦味传感器(C00)、涩味传感器(AE1)和两个参考传感器。程序设置:(1)传感器清洗 3 次,清洗时长分别为 90、120、120 s。(2)测试前,传感器平衡 30 s。(3)测样时长 30 s。

1.3.7 激光共聚焦显微镜观察

用切片机将样品切成 10 μm 的薄片,置于载玻片上,滴加 0.1% 尼罗红染料和 0.1% 尼罗蓝染料各 10 μL,染色 10 min 后盖上盖玻片,指甲油封片,488 nm 处激发尼罗红,633 nm 处激发尼罗蓝。10×目镜镜检。

1.3.8 水分分布测定

参考 WU 等^[10]的方法稍作修改。将 3.0 g 样品放入样品托中。对样品进行低场核磁共振(low-field nuclear magnetic resonance, LF-NMR)实验,回波个数为 10000,回波时间为 0.20 ms。90°和 180°脉冲的持续时间分别为 12.52 s 和 22.56 s。用自旋回波成像序列获得质子密度加权图像。

1.3.9 脂肪酸种类及含量测定

参考谢艳华等^[11]的方法稍作修改。粗脂肪提取:准确称取干燥、粉碎样品 0.12 g 于试管中,加入 6 mL 正己烷,然后于超声波功率为 350 W 下,40 °C 提取 30 min。

脂肪酸甲酯化:在提取出的粗脂肪中加入 3 mL 0.5 mol/L 氢氧化钾-甲醇溶液,60 °C 水浴酯化 15 min,冷却至室温后,加入 3 mL 5% 硫酸-甲醇溶液,60 °C 水浴酯化 15 min,4000 r/min 离心 2 min,静置,吸取上清液于干燥洁净试管中,加入适量无水硫酸钠,通过 0.22 μm 的滤膜过滤后注入干燥洁净的 2 mL 顶空瓶中。

色谱条件:取 1 μL 滤液进样分析,流速为 1.0 mL/min,升温程序:140 °C 保留 2 min,然后以 6 °C/min 升温至 200 °C,保留 2 min,以 2 °C/min 升温至 230 °C 保留 2 min,最后以 4 °C/min 升温至 250 °C,保留 2 min。分流比 20:1。质谱条件:离子化方式为电子轰击电离(electron ionization,

ED); 电离电压为 70 eV; 质量扫描范围(m/z)全扫描。

1.3.10 贮藏期品质测定

活菌数测定参照 GB 4789.2—2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验菌落总数的测定》进行测定。

1.3.11 感官评分测定

随机选取 5 名男生和 5 名女生组成 10 人的专业评价小组, 对花生纳豆样品的色泽、气味、口感、拉丝和黏液量 4 方面进行感官并给予打分, 感官评分标准见表 1。

表 1 花生纳豆的感官评分标准
Table 1 Criteria for the sensory scoring of *Arachis hypogaea* L. natto

评价项目	评价标准	评分
色泽	黄色, 有明显光泽	21~25
	暗黄色, 有光泽	16~20
	暗黄色, 稍有光泽	11~15
	褐色, 光泽不明显	6~10
	暗褐色, 无光泽	1~5
气味	有纳豆制品特有的焦香味, 无氨味	21~25
	焦香味较淡, 稍有氨味	16~20
	无花生香气和焦香味, 有氨味	11~15
	氨味较重	6~10
	氨味浓烈	1~5
口感	软硬适中, 无苦味	21~25
	软硬适中, 有略微苦味	16~20
	较软或较硬, 较苦	11~15
	较软或较硬, 苦	6~10
	太软或太硬, 苦	1~5
拉丝和黏液量	拉丝多, 细长, 黏液量丰富	21~25
	拉丝较多, 细长, 黏液量较多	16~20
	拉丝略少, 短, 黏液量一般	11~15
	拉丝极少且短, 黏液量少	6~10
	无拉丝, 无黏液	1~5

1.3.12 活菌数测定

活菌数测定参照 GB 4789.2—2022 进行测定。

1.3.13 挥发性盐基氮含量测定

总挥发性盐基氮(total volatile base nitrogen, TVB-N)含量测定参照 GB 5009.228—2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》进行测定。

1.3.14 氨基酸态氮含量测定

氨基酸态氮含量测定参照 GB 5009.235—2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸态氮的测定》中酸度计法进行测定。

1.3.15 色差特性测定

每组花生纳豆选取 10 个颗粒, 使用色差计测量其

L^* (亮度)、 a^* (红度)、 b^* (黄度)并计算 C^* (平均色度和颜色), $C^*=(a^{*2}+b^{*2})^{1/2}$ [12]。

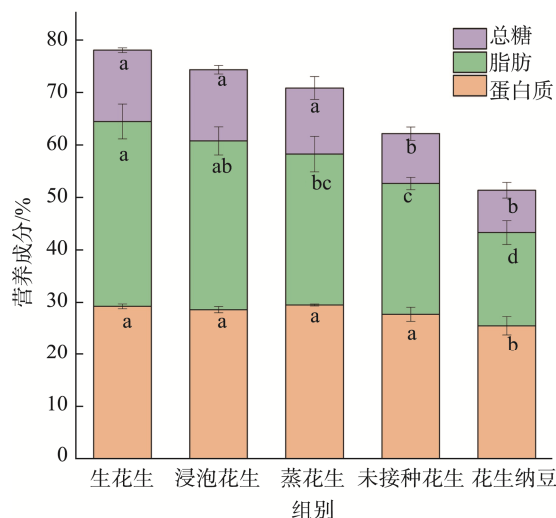
1.4 数据处理

每个实验重复 3 次, 结果以平均值±标准偏差表示, 用 Origin 2022 进行绘图。通过 SPSS 23.0 软件进行单因素方差分析, $P<0.05$ 为结果差异显著。

2 结果与分析

2.1 不同处理方式下花生的基本营养成分

如图 1 所示, 花生纳豆的蛋白质含量为 25.84%、脂肪含量为 17.72%、总糖含量为 8.02%, 相较于未接种花生, 花生纳豆的蛋白质含量降低了 2.19%, 脂肪含量降低了 7.13%。这与焦迎春等 [13] 的研究结果一致。花生纳豆蛋白质和脂肪含量降低的原因可能是由于在发酵过程中纳豆芽孢杆菌产生的蛋白酶和脂肪酶使花生中的蛋白质和脂肪水解 [14] 为各种小分子物质, 如氨基酸、多肽 [15]、脂肪酸。



注: 同一物质字母不同表示差异显著($P<0.05$), 图 7、8 同。

图 1 不同处理方式下花生的营养成分组成(干重计)

Fig.1 Nutrient composition of *Arachis hypogaea* L. treated in different ways (dry weight)

2.2 不同处理方式下花生的电子鼻分析

如图 2 所示, 除未接种花生组其余不同方式处理的花生在 W1C、W3C、W6S、W5C、W2W 和 W3S 传感器的响应值差异很小, 主要源于不同处理方式引发的理化与微生物代谢变化: 花生纳豆组通过蛋白水解和脂质分解显著提升 W2S/W3S 响应值, 产生四甲基吡嗪、苯乙醇等醇类及芳香族物质; 未接种组发生脂质氧化(W3C 响应值), 释放己醛、2-戊基呋喃等青草味成分。相较传统蒸煮仅引发物理性挥发性前体释放, 发酵通过微生物代谢重构了风味物质谱系, 尤其是苯环类及吡嗪类物质的特异性积累, 形

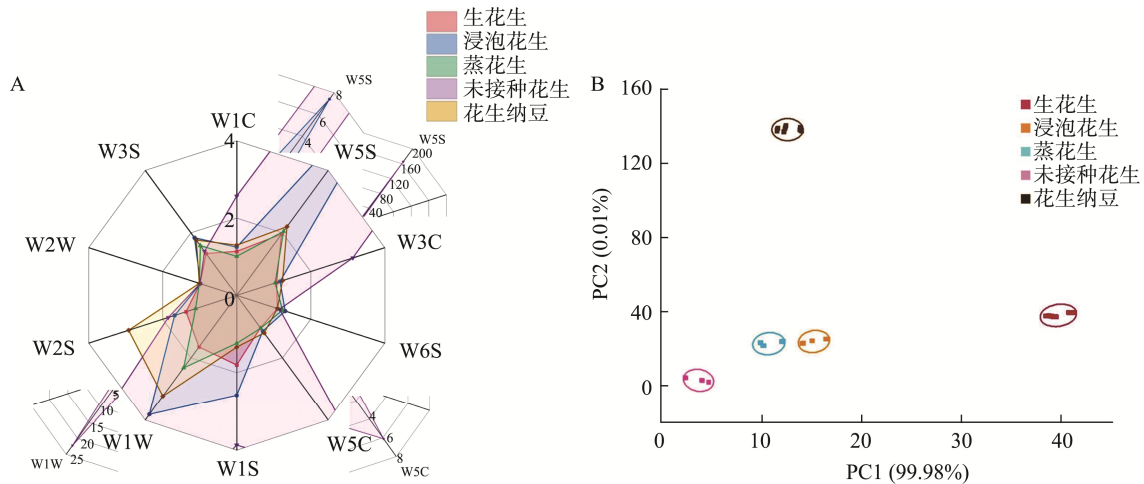


图 2 不同处理方式下花生的电子鼻分析
Fig.2 Electronic nose analysis of *Arachis hypogaea* L. treated in different ways

成了发酵花生特有的复杂香气特征。电子鼻检测到的 5 种样品气味信号数据经过主成分分析(principal component analysis, PCA), 其中第 1 主成分和第 2 主成分的累积方差贡献率为 99.99%(图 2B), 整体累积方差大于 85%, 说明通过 PC1-PC2 的二维判别图可以很好地代表样品的主要信息特征。从图 2B 中可以看出 5 种样品处于第一象限, 样品之间未呈现聚集, 说明不同处理方法可使花生风味呈现差异性。浸泡花生、蒸花生两者之间距离较近, 说明两者挥发性成分相差较小; 与生花生、花生纳豆组距离较远, 说明它们之间挥发性成分相差较大, 可能是因为在发酵过程中产生新的风味物质所导致^[16]。

2.3 不同处理方式下花生的电子舌分析

如图 3 所示, 生花生、浸泡花生、蒸花生、未发酵花生这 4 种不同方式处理的花生味觉差异不明显, 而花生纳豆与其他 4 种处理方式的花生味觉存在明显差异, 差异主

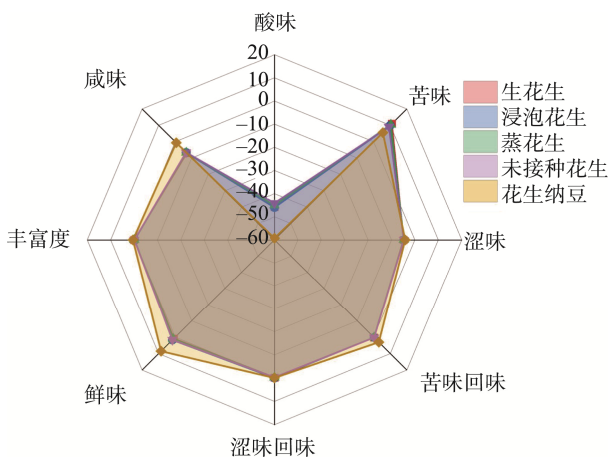
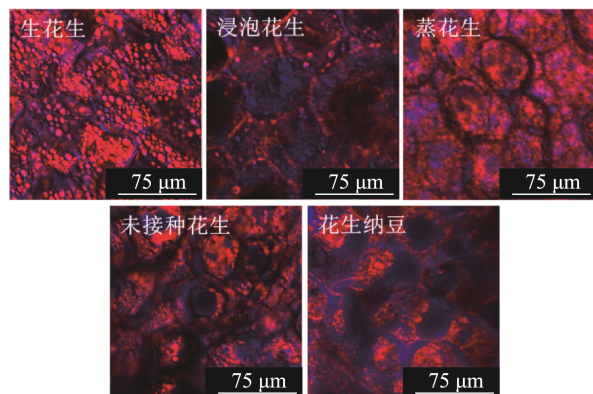


图 3 不同处理方式下花生的电子舌分析
Fig.3 Electronic tongue analysis of *Arachis hypogaea* L. treated in different ways

要体现在酸味、咸味、鲜味和苦味, 花生纳豆的酸味和苦味低于其他 4 种处理方式的花生, 花生纳豆的鲜味和咸味明显高于其他 4 种处理方式的花生, 可能是由于发酵过程中纳豆芽孢杆菌对花生成分的深度代谢重构。微生物蛋白酶将花生蛋白分解为游离谷氨酸、天冬氨酸及鲜味短肽, 并生成肌苷酸等核苷酸类物质, 通过鲜味受体协同作用大幅提升鲜味强度; 同时, 乳酸、琥珀酸等有机酸与矿物质结合形成的盐类及钠离子释放增强了咸味感知^[17]。发酵过程消耗原有酸性物质并水解多酚氧化产物、疏水性苦味肽, 转化为甘氨酸等甜味氨基酸, 结合 γ -氨基丁酸的生成, 共同抑制酸苦味受体激活^[18]。

2.4 不同处理方式下花生油脂与蛋白分布

如图 4 所示, 生花生中含有大量脂滴, 呈颗粒状结构清晰, 蛋白则较均匀的分布于细胞内; 浸泡花生脂肪含量较低, 但仍能观察到颗粒状脂肪, 这可能与浸泡使其水分含量升高有关; 蒸花生中的脂肪颗粒感下降, 可能是蒸煮



注: 脂肪用尼罗红标记呈红色, 蛋白质用尼罗蓝标记呈蓝色。
图 4 不同处理方式下花生的脂肪和蛋白激光共聚焦显微图
Fig.4 Laser confocal micrographs of fat and protein of *Arachis hypogaea* L. treated in different ways

使花生中脂肪水解结构被破坏^[19]; 通过对比花生纳豆与未接种花生和蒸花生染色结果, 可以发现花生纳豆脂肪含量明显少于未接种花生和蒸花生, 蛋白分布得更加均匀, 因此发酵可以明显降低花生的脂肪含量, 同时蛋白的聚集体更小且网络结构更松散。脂肪含量的降低应该是在发酵过程中纳豆芽孢杆菌产生脂肪酶, 将脂肪水解所致^[15]。

2.5 不同处理方式下花生水分分布

样品中水分的自由度与弛豫时间(T2)紧密相关, T2 越短表明水与底物紧密结合, 该状态下的水分越稳定, T2 越长该状态下的水分自由度越高, 具有良好的流动性^[20]。可以跟据水分峰位置的不同, 可以将水分的状态分为结合水(0.1~1.0 ms)、弱结合水(1.0~10.0 ms)、不易流动水(10.0~100.0 ms)、自由水(100.0~1000.0 ms)^[21], 因此可以根据 T2 分析出样品中结合水、弱结合水、不易流动水、自由水的含量与变化情况。如图 5 所示, 对比蒸花生与花生纳豆的结果可以得出发酵可以使花生中部分不易流动水向弱结合水迁移, 可能与发酵造成水分吸附于极性基团上有关。峰面积代表样品中的水分含量, 如图 5, 浸泡花生水分含量最高, 生花生水分含量最低, 花生纳豆水分含量高于未发酵花生, 说明发酵可以使花生的持水性增加^[22]。

磁共振成像技术可以直接将样品中水分子的空间分布可视化, 可有效分析食品在加工及贮藏过程中的水分迁移情况。信号强度的强弱能直接反映食品组分的质子密度及水分含量^[21]。高核磁信号强度区域(红色区域)通常代表样品中的水分含量高, 质子密度高, 低核磁信号强度区域(蓝色区域)通常代表样品中的水分含量低, 质子密度低, 绿色和黄色则介于蓝色和红色之间。图 6 是不同处理方式下花生的核磁共振成像技术(magnetic resonance imaging, MRI)图, 从图 6 中可以看出花生浸泡后水分含量明显升高, 花生纳豆中的水分分布更均匀。从 MRI 图中也可以看出, 花生纳豆的水分含量高于未接种纳豆芽孢杆菌的花生, 可能是由于发酵导致纤维素和半纤维素的降解, 从而形成更多的多孔疏松结构和多糖, 使其比表面积增加^[23], 增加持水能力。而未接种花生水分含量降低可能是由于较高的防止温度使其水分蒸发所致。

2.6 不同处理方式下花生游离脂肪酸种类及含量

如表 2, 生花生、浸泡花生、蒸花生、未接种花生和花生纳豆分别被检测到 6 种、8 种、9 种、10 种、12 种游离脂肪酸, 与蒸花生相比花生纳豆未检出二十三碳酸, 但检测出癸酸、月桂酸、二十一碳酸和亚油酸。生花生被检测到 2 种饱和脂肪酸, 3 种单不饱和脂肪酸和 1 种多不饱和脂肪酸; 蒸花生被检测到 5 种饱和脂肪酸, 3 单不饱和脂肪酸和 1 种多不饱和脂肪酸; 花生纳豆被检测到 7 种饱和脂肪酸, 3 种单不饱和脂肪酸和 2 种多不饱和脂肪酸; 亚油酸是一种多不饱和脂肪酸具有降血脂、降血压、防治动脉粥

样硬化及心血管疾病的作用^[24], 亚油酸在花生纳豆中被检测出, 含量为 588.59 mg/100 g, 却未在其他 4 种方式处理的花生中检测到, 表明发酵使脂肪分解产生亚油酸^[25-26]。

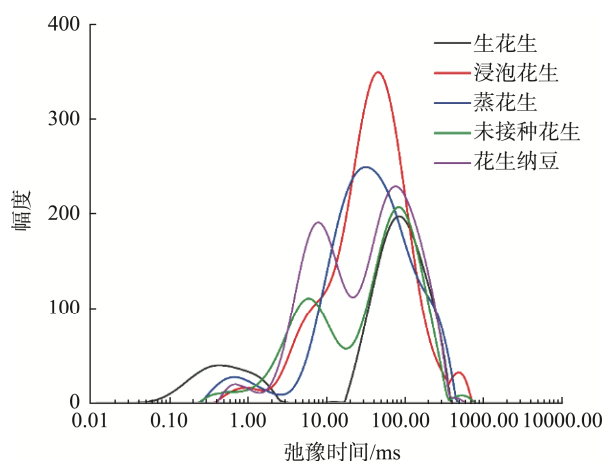


图 5 不同处理方式下花生的 T2 反演图
Fig.5 T2 inversion plots of *Arachis hypogaea* L. treated in different ways

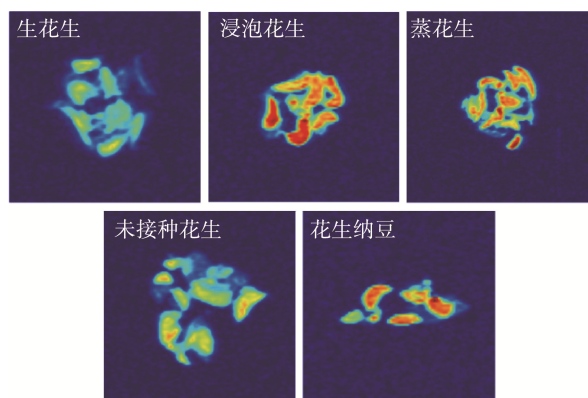


图 6 不同处理方式下花生的 MRI 图
Fig.6 MRI imaging of *Arachis hypogaea* L. treated in different ways

2.7 花生纳豆贮藏期品质分析

2.7.1 感官评价分析

花生纳豆的色泽、气味、拉丝情况等能够直观地反映贮藏过程中花生纳豆制品的变化, 是消费者判断水产品的主要方法。于是在色泽、气味、口感、拉丝 4 个方面对花生纳豆进行评价。如图 7A 所示, 贮藏于 25 °C 的花生纳豆, 其感官评分随着贮藏时间的延长呈现先下降后上升再下降的趋势, 其原因可能是在贮藏过程中花生纳豆二次发酵, 使感官得分在贮藏期间呈现出先下降后上升的趋势, 由于在贮藏期间花生纳豆蛋白质分解和脂肪氧化及含氮物质的产生导致花生纳豆产生不愉快的气味^[27], 质地变软, 口感下降, 拉丝效果变差, 感官评分也随之降低。贮藏于 4 °C 的花生纳豆, 感官评分随着贮藏时间的延长而降低, 主要原因可能是随着贮藏时间的延长, 导致花生纳豆拉丝效

表 2 不同处理方式下花生游离脂肪酸种类及含量
Table 2 Types and content of free fatty acids of *Arachis hypogaea* L. treated in different ways

脂肪酸名称	游离脂肪酸含量/(mg/100 g)				
	花生	浸泡花生	蒸花生	未接种花生	花生纳豆
癸酸	ND	ND	ND	ND	0.28±0.01 ^a
月桂酸	ND	ND	ND	ND	2.55±0.18 ^a
十五碳酸	ND	0.46±0.01 ^a	0.15±0.01 ^b	0.15±0.01 ^b	0.46±0.01 ^a
棕榈酸	114.61±4.50 ^b	139.37±2.73 ^a	111.93±2.88 ^b	112.96±2.78 ^b	112.75±3.55 ^b
十七碳酸	1.12±0.01 ^b	1.57±0.12 ^a	1.12±0.01 ^b	1.57±0.12 ^a	1.12±0.01 ^b
二十一碳酸	ND	ND	ND	0.26±0.01 ^a	0.13±0.01 ^b
二十三碳酸	ND	2.10±0.06 ^a	1.75±0.03 ^b	1.05±0.05 ^c	ND
二十四碳酸	ND	222.92±7.02 ^c	595.70±11.55 ^b	664.61±12.04 ^a	664.61±12.04 ^a
油酸	721.00±9.03 ^b	876.75±6.49 ^a	706.60±5.77 ^{cd}	714.60±6.11 ^{bc}	699.00±8.76 ^d
反式油酸	13.09±0.62 ^b	13.09±0.62 ^b	12.04±0.12 ^c	13.61±0.13 ^b	15.45±0.49 ^a
芥酸	2.17±0.01 ^a	1.79±0.05 ^c	1.53±0.06 ^d	1.79±0.05 ^c	1.92±0.01 ^b
顺-11,14-二十碳二烯酸	1.79±0.05 ^a	ND	1.43±0.06 ^b	1.07±0.05 ^c	1.43±0.06 ^b
亚油酸	ND	ND	ND	ND	588.59±6.57 ^a

注: 同一行上标字母不同表示差异显著($P < 0.05$); ND 表明未检测到该游离脂肪酸。

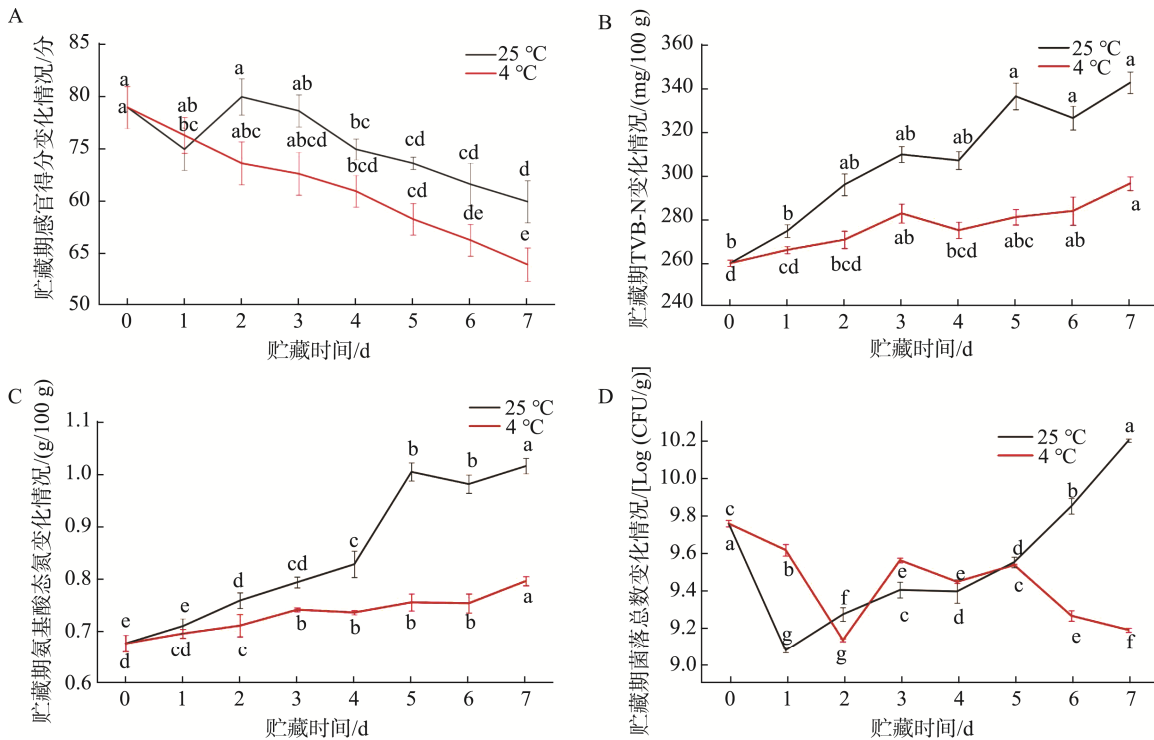


图 7 贮藏期花生纳豆感官评分、TVB-N、氨基酸态氮和菌落总数变化情况

Fig.7 Changes of sensory scoring, TVB-N, amino acid nitrogen and colonies number of *Arachis hypogaea* L. natto during storage period

果变差, 以及不良气味的增强。贮藏于 4 °C 的花生纳豆在贮藏 2 d 之后其感官得分低于贮藏于 25 °C 的花生纳豆, 可能是因为低温贮藏条件下, 虽然能够减缓化学反应的速率, 但同时低温贮藏可能不利于某些微生物的活性, 从而影响发酵过程中风味物质的形成, 进而影响花生纳豆的感官得分。

2.7.2 挥发性盐基氮含量分析

花生纳豆发酵过程中, 微生物代谢物料, 产生纳豆激酶的同时, 并生成特殊的氨臭味。TVB-N 指氨及胺类碱性

含氮物质, 能一定程度上反映花生纳豆的氨臭味大小^[28]。花生纳豆贮藏期间 TVB-N 值的变化如图 7B。由图 7B 可知, 花生纳豆初始 TVB-N 为 259.11 mg/100 g, 随着贮藏时间的延长, 7 d 内不同贮藏温度下花生纳豆的 TVB-N 值整体呈现随贮藏时间的延长而升高的趋势。25 °C 下贮藏的花生纳豆 TVB-N 值增长速率快, 第 7 d 时, TVB-N 值最高, 为 341.76 mg/100 g; 4 °C 条件下贮藏的花生纳豆 TVB-N 值在第 7 d 增长至 295.61 mg/100 g。由此可知, 贮藏温度越高, 花生纳豆产生挥发性盐基氮的速度越快, 导

致花生纳豆氨臭味越重, 这与 KUBO 等^[12]结果相一致。

2.7.3 氨基酸态氮含量分析

氨基酸态氮主要是指以氨基酸形式存在的氮元素的含量。纳豆中富含多种氨基酸, 包括谷氨酸、亮氨酸和缬氨酸等。纳豆中氨基酸态氮含量最低不得少于 0.3 g/100 g。由图 7C 可知, 在 25 °C 贮藏时, 花生纳豆中的氨基酸态氮含量呈现先上升后逐渐趋于稳定的波动趋势, 在 4 °C 贮藏的过程中, 氨基酸态氮含量总体呈缓慢上升的趋势。贮藏温度为 25 °C 时, 其氨基酸态氮含量在第 5 d 迅速上升至 0.99 g/100 g, 贮藏温度为 4 °C 时, 贮藏 7 d 的花生纳豆氨基酸态氮含量为 0.74 g/100 g。这与 KUBO 等^[12]的研究结果一致, 造成这一现象的原因可能是因为在贮藏期间, 微生物分解蛋白质用于生长繁殖, 温度越高越有利于微生物的生长繁殖, 微生物分解蛋白质产生的氨基酸就越多^[29]。

2.7.4 菌落总数分析

样品中的初始纳豆芽孢杆菌活菌数量为 9.75 Log (CFU/g), 纳豆芽孢杆菌在储存过程中继续存活, 贮藏于 25 °C 的花生纳豆, 其活菌数随着贮藏时间的延长呈现先下降后上升趋势, 贮藏于 4 °C 的花生纳豆, 其活菌数随着贮藏时间的延长呈现先下降后上升再下降的趋势(图 7D)。纳豆芽孢杆菌在储存过程中继续存活, 活菌转变成孢子形态, 后在稳定温度下繁殖, 最后由于营养物质的缺乏导致活菌减少。

贮藏于 4 °C 的花生纳豆在第 5 d 时出现肉眼可见的菌斑, 贮藏于 25 °C 的花生纳豆在第 3 d 时出现肉眼可见的菌斑。

2.7.5 色差特性分析

色差值能够客观准确地反映样品颜色的变化情况。其中, L^* 表示花生纳豆的亮度, 高 L^* 的花生纳豆更有利于被消费者接受。由图 8A 可知, 随着贮藏时间的延长, 不同贮藏温度花生纳豆的 L^* 均呈下降趋势, 新鲜花生纳豆的 L^* 为 57.65, 贮藏 1 d 后花生纳豆亮度显著降低, 可能是由于脂质的氧化以及美拉德反应导致的^[30]。25 °C 条件下贮藏的花生纳豆的 L^* 的降低速率较 4 °C 快, 说明贮藏温度对花生纳豆的亮度影响较大。 a^* 代表产品红度, b^* 代表产品黄度, 与第 0 d 的样品相比, 在 25 °C 和 4 °C 下贮藏 2 d 以上样品的 a^* 显示出显著差异 ($P < 0.05$) (图 8B)。 b^* 也受到温度的影响, 在贮藏温度为 4 °C 时, 随着贮藏时间的延长, 花生纳豆的 b^* 呈先上升后降低的趋势, 贮藏温度 25 °C 时, 随着贮藏时间的延长, 花生纳豆的 b^* 呈逐渐降低的趋势(图 8C)。贮藏温度越高 b^* 下降时间越早, 以上结果表明, 纳豆的颜色变化很大程度上是由于褐变引起的, 褐变通常受到储存温度的影响, 这种颜色变化可能与美拉德反应有关。 C^* 为产品平均色度和颜色, 在贮藏过程中不同贮藏温度的 C^* 与 b^* 趋势相似, 随着储存期的延长, C^* 有降低的趋势, 这种趋势在更高的温度下更为明显(图 8D)。

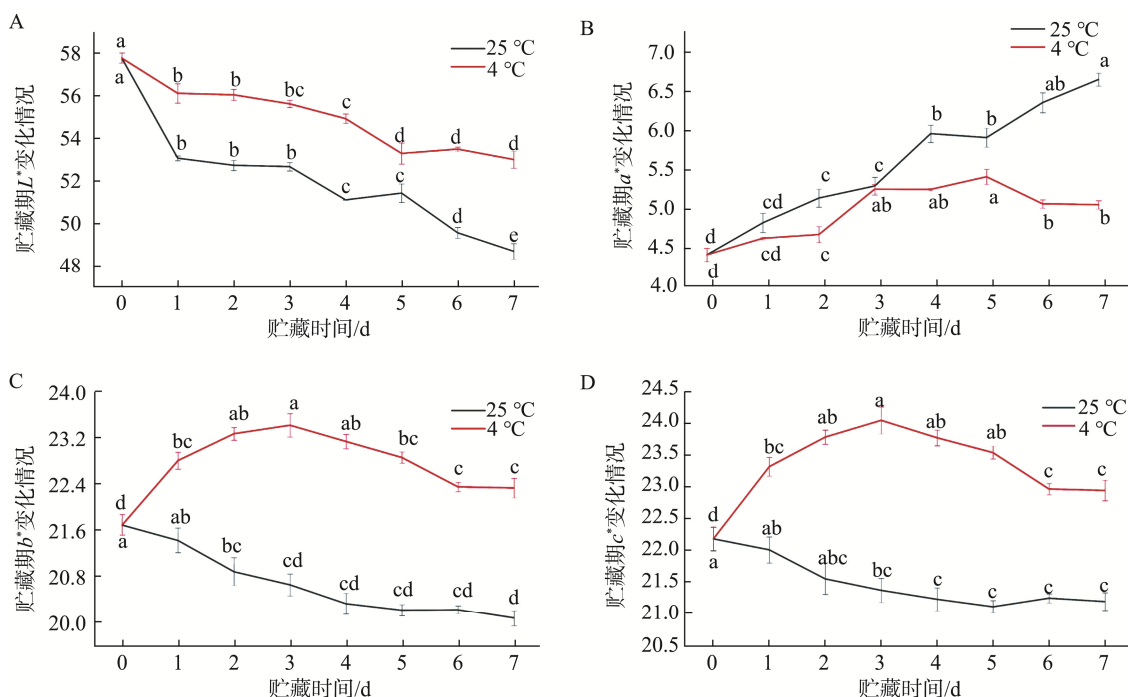


图 8 贮藏期花生纳豆色差变化

Fig.8 Color difference parameters of *Arachis hypogaea* L. natto during storage period

3 结论

本研究制备的花生纳豆蛋白质和脂肪含量分别为 25.84% 和 17.72%, 较未接种组明显降低, 发酵过程通过脂

肪水解促进亚油酸释放; 挥发性物质以吡嗪类(如四甲基吡嗪)为主, 辅以苯乙醇等醇类及芳香族化合物, 赋予其独特烘烤香与醇香; 味觉特征呈现“鲜咸突出、酸苦抑制”的差异性, 主要源于谷氨酸、肌苷酸等鲜味物质与有机酸盐

的协同作用;低场核磁结果表明发酵可以使花生中部分不易流动水向弱结合水迁移。贮藏期间随贮藏时间的延长感官评分、 L^* 及 b^* 下降,TVB-N与氨基酸态氮升高,表明美拉德反应持续驱动品质劣变。本研究通过系统性解析花生纳豆加工与贮藏中的多尺度变化规律,为风味强化型产品开发及传统工艺革新提供了科学基础与方法论支持。

参考文献

- [1] SHARMA R, GARG P, KUMAR P, *et al.* Microbial fermentation and its role in quality improvement of fermented foods [J]. *Fermentation*, 2020, 6(4): 106.
- [2] REN J, YUAN T, LI H, *et al.* Sex differences of radiation damage in high-fat-diet-fed mice and the regulatory effect of melatonin [J]. *Nutrients*, 2022, 15(1): 64.
- [3] JAKUBCZYK A, KARAŚ M, RYBCZYŃSKA-TKACZYK K, *et al.* Current trends of bioactive peptides—New sources and therapeutic effect [J]. *Foods*, 2020, 9(7): 846.
- [4] WANG Z, GAO T, HE Z, *et al.* Reduction of off-flavor volatile compounds in okara by fermentation with four edible fungi [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 155: 112941.
- [5] 周阳. 微生物发酵对花生蛋白中致敏因子的影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014.
- [6] ZHOU Y. Study on the impact of microbial fermentation on allergenic factors in peanut protein [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2014.
- [7] 李恋龙, 高云霞, 杜亚飞. 风味纳豆的制备工艺研究[J]. *生物化工*, 2022, 8(1): 122–127.
- [8] LI LL, GAO YX, DU YF. Research on the preparation process of flavor natto [J]. *Biochemical Engineering*, 2022, 8(1): 122–127.
- [9] 刘野, 苏杭, 宋焕禄, 等. 基于纳豆激酶活性的纳豆加工条件的优化研究[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(7): 170–175.
- [10] LIU Y, SU H, SONG HL, *et al.* Optimization of natto processing conditions based on natto enzyme activity [J]. *Food Science and Technology Research*, 2016, 37(7): 170–175.
- [11] 王丽娜, 付华峰, 张永清, 等. 花生纳豆的研究及风味改良[J]. *中国调味品*, 2014, 39(6): 9–12, 22.
- [12] WANG LN, FU HF, ZHANG YQ, *et al.* Research and flavor improvement of peanut natto [J]. *China Condiment*, 2014, 39(6): 9–12, 22.
- [13] 索化夷, 赵欣, 蒋宇, 等. 永川豆豉发酵过程中总糖和氨基酸变化与滋味的形成[J]. *食品科学*, 2015, 36(21): 100–104.
- [14] SUO HY, ZHAO X, QIAN Y, *et al.* Changes in total sugar and amino acids during yongchuan douchi fermentation and the formation of flavor [J]. *Food Science*, 2015, 36(21): 100–104.
- [15] WU J, LI Y, GAO X. Monitoring a typical fermentation process of natto by low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) and magnetic resonance imaging (MRI) techniques [J]. *Analytical methods*, 2016, 8(39): 7135–7140.
- [16] 谢艳华, 谢靓, 李跑, 等. GC-MS 分析毛霉型、细菌型、曲霉型豆豉中脂肪酸组成[J]. *中国油脂*, 2017, 42(7): 115–119, 123.
- [17] XIE YH, XIE J, LI P, *et al.* GC-MS analysis of fatty acid composition in mucor-type, bacterial-type, and aspergillus-type douchi [J]. *China Oils*, 2017, 42(7): 115–119, 123.
- [18] KUBO Y, NOGUCHI T, KIMURA K. Storage temperature and quality changes of natto [J]. *Food Science and Technology Research*, 2021, 27(3): 497–504.
- [19] 焦迎春, 尹璐, 元王涛. 纳豆制备及冷藏干燥制品条件优化研究[J]. *中国调味品*, 2012, 37(5): 44–46.
- [20] JIAO YC, YIN Y, YUAN WT. Optimization of natto preparation and refrigerated drying conditions [J]. *China Condiments*, 2012, 37(5): 44–46.
- [21] 孙晓鸣, 王萍, 黄云飞. 几株芽孢杆菌产消化酶分析[J]. *江西畜牧兽医杂志*, 2009(2): 13–15.
- [22] SUN XM, WANG P, HUANG YF. Analysis of digestive enzymes produced by several bacillus subtilis strains [J]. *Jiangxi Journal of Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2009(2): 13–15.
- [23] HU Y, GE C, YUAN W, *et al.* Characterization of fermented black soybean natto inoculated with bacillus natto during fermentation [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2010, 90(7): 1194–1202.
- [24] ZHANG Q, LAN G, TIAN X, *et al.* Effect of adding bifidobacterium animalis bz25 on the flavor, functional components and biogenic amines of natto by *Bacillus subtilis* GUTU09 [J]. *Foods*, 2022, 11(17): 2674.
- [25] AN J, WICAKSANA F, LIU C, *et al.* Current food processing methods for obtaining umami peptides from protein-rich foods: A review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2024, 153: 104704.
- [26] 黄晓辰, 蔡友华, 马金魁, 等. 发酵食品源功能活性肽及其应用研究进展[J]. *现代食品科技*, 2021, 37(8): 364–374.
- [27] HUANG XC, CAI YH, MA JK, *et al.* Research progress on functional peptides from fermented foods and their applications [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2021, 37(8): 364–374.
- [28] CAPUANO E, PELLEGRINI N, NTONO E, *et al.* *In vitro* lipid digestion in raw and roasted hazelnut particles and oil bodies [J]. *Food & Function*, 2018, 9(4): 2508–2516.
- [29] 鲍佳彤, 宁云霞, 杨洪越, 等. TGase 和 Ca^{2+} 联合作用对未经漂洗的革胡子鲶鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(14): 50–57.
- [30] BAO JT, NING YX, YANG QY, *et al.* Effects of TGase and Ca^{2+} on the gel properties of unwashed leatherjacket fish paste [J]. *Food Science*, 2020, 41(14): 50–57.
- [31] 时文六, 胡乔乔, 冯裕杰, 等. 基于核磁共振及成像技术研究速冻汤圆在冻融过程中的水分迁移变化[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(21): 20–27.
- [32] SHI WL, HU QQ, FENG YJ, *et al.* Study on water migration changes in quick-frozen tangyuan during freezing-thawing process based on nuclear magnetic resonance and imaging techniques [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(21): 20–27.
- [33] 解梦汐, 孙玉, 张良晨, 等. 微生物发酵技术在花生及其副产物中的应用[J]. *中国酿造*, 2023, 42(2): 10–15.
- [34] XIE MX, SUN Y, ZHANG LC, *et al.* Application of microbial fermentation technology in peanuts and by-products [J]. *China Brewing*, 2023, 42(2): 10–15.
- [35] CHU J, ZHAO H, LU Z, *et al.* Improved physicochemical and functional properties of dietary fiber from millet bran fermented by *Bacillus natto* [J]. *Food Chemistry*, 2019, 294: 79–86.
- [36] MARANGONI F, AGOSTONI C, BORGHI C, *et al.* Dietary linoleic acid and human health: Focus on cardiovascular and cardiometabolic effects [J]. *Atherosclerosis*, 2020, 292: 90–98.
- [37] ZHANG Y, ISHIKAWA M, KOSHIO S, *et al.* Optimization of soybean meal fermentation for aqua-feed with *Bacillus subtilis natto* using the response surface methodology [J]. *Fermentation*, 2021, 7(4): 306.
- [38] CHEN Q, KONG B, HAN Q, *et al.* The role of bacterial fermentation in lipolysis and lipid oxidation in harbin dry sausages and its flavour development [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 77: 389–396.
- [39] 孙莹, 王龙, 周斌, 等. 大豆蛋白基素肉预制菜贮藏品质分析及其货架期预测[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(14): 300–307.
- [40] SUN Y, WANG L, ZHOU B, *et al.* Storage quality analysis and shelf-life prediction of pre-prepared soybean protein-based vegetarian meat [J]. *Food Industry Science and Technology*, 2024, 45(14): 300–307.
- [41] 郑丹妮, 王梦颖, 胡艺涵, 等. 双菌混合发酵纳豆工艺优化[J]. *食品与机械*, 2020, 36(12): 183–188.
- [42] ZHENG DN, WANG MY, HU YH, *et al.* Optimization of mixed fermentation process for natto [J]. *Food and Machinery*, 2020, 36(12): 183–188.
- [43] WANG HJ, CHANG L, LIN YS. Changes in functionality of germinated and non-germinated brown rice fermented by *Bacillus natto* [J]. *Foods*, 2021, 10(11): 2779.
- [44] WANG Y, XIONG C, LUO W, *et al.* Effects of packaging methods on the quality of heavy metals-free preserved duck eggs during storage [J]. *Poultry Science*, 2021, 100(5): 101051.

(责任编辑: 安香玉 韩晓红)