

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20240103

网络首发日期: 2024-11-05; 网络首发地址: <http://link.cnki.net/urlid/12.1355.N.20241105.1603.007>

乳双歧杆菌 80 发酵对绿豆浆风味的影响

孙荣豪¹, 王心彤¹, 金 艳¹, 张国华², 吴 涛¹

(1. 天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457; 2. 山西大学生命科学学院, 太原 030006)

摘 要: 绿豆是一种绿色健康的豆科作物, 具有很高的营养价值和药用价值, 但其浓重的豆腥味限制了其作为植物蛋白饮料的推广。为了改善绿豆浆的风味, 研究乳双歧杆菌 (*Bifidobacterium lactis*) 80 (Bla80) 发酵对绿豆浆的理化性质、流变学特性和挥发性风味物质的影响。发酵使绿豆浆的 pH 降至 5.21 ± 0.01 , 蛋白颗粒平均加权直径 ($D_{4,3}$) 降至 $(115.70 \pm 1.25) \mu\text{m}$, 并提高了绿豆浆的流变黏度和结构黏度。发酵后绿豆浆中的醛类物质和呋喃类物质的含量分别下降了 73.36% 和 57.76%, 酯类物质和酮类物质的含量分别上升了 14.79% 和 383.78%, 且发酵绿豆浆具有花香、果香和甜味。发酵后, 绿豆浆中的典型豆腥味物质, 如己醛、2-己醛、1-己醇、2-戊基呋喃的含量分别下降了 83.52%、98.53%、96.80% 和 77.78%。实验结果表明, Bla80 发酵可以降低绿豆浆的豆腥味, 是一种可以改善绿豆浆风味的技术。

关键词: 绿豆浆; 乳双歧杆菌; 豆腥味; 发酵

中图分类号: TS214.9

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2025)05-0029-09

Effects of *Bifidobacterium lactis* 80 Fermentation on Flavor of Mung Bean Milk

SUN Ronghao¹, WANG Xintong¹, JIN Yan¹, ZHANG Guohua², WU Tao¹

(1. College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;

2. School of Life Sciences, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Mung bean is a green, healthful legume with significant nutritional and medicinal value, however, its strong beany odor limits its promotion as a plant-based protein beverage. To address undesirable flavors, the effects of *Bifidobacterium lactis* 80 (Bla80) fermentation on the physicochemical properties, rheological characteristics, and volatile flavor compounds of mung bean milk were investigated. After fermentation, the pH value of mung bean milk decreased to 5.21 ± 0.01 , the particle size distribution ($D_{4,3}$) decreased to $(115.70 \pm 1.25) \mu\text{m}$, and the rheological and structural viscosity of mung bean milk improved significantly. The content of aldehydes and furans in the fermented group decreased by 73.36% and 57.76%, respectively, while the content of esters and ketones increased by 14.79% and 383.78% compared to unfermented mung bean milk. Furthermore, the fermented mung bean milk exhibited enhanced floral, fruity and sweet notes. The contents of typical beany flavor substances such as hexanal, 2-hexanal, 1-hexyl alcohol and 2-amylfuran decreased by 83.52%, 98.53%, 96.80% and 77.78%, respectively. The experimental results show that Bla80 fermentation can reduce undesirable taste of mung bean milk, thus offering a promising technology for improving the taste of mung bean milk.

Key words: mung bean milk; *Bifidobacterium lactis*; beany flavor; fermentation

引文格式:

孙荣豪, 王心彤, 金艳, 等. 乳双歧杆菌 80 发酵对绿豆浆风味的影响[J]. 天津科技大学学报, 2025, 40(5): 29-37.

SUN R H, WANG X T, JIN Y, et al. Effects of *Bifidobacterium lactis* 80 fermentation on flavor of mung bean milk[J]. Journal of Tianjin university of science and technology, 2025, 40(5): 29-37.

收稿日期: 2024-05-12; 修回日期: 2024-07-31

基金项目: 天津市科技计划项目(23ZYCGSN00970)

作者简介: 孙荣豪(1998—), 男, 河北沧州人, 硕士研究生; 通信作者: 吴 涛, 教授, wutao@tust.edu.cn

绿豆是亚洲地区广泛种植的豆科植物,具有高蛋白、低脂肪的特点^[1]。绿豆含有丰富的蛋白质、膳食纤维等功能性成分,具有抗炎、抗癌、抗氧化、降血糖和解毒等功效^[2],可以作为开发绿色健康食品的优质原料。虽然绿豆具有很多优点,但其令人不快的豆腥味仍然限制了绿豆作为植物蛋白饮料原料的发展。豆腥味主要是由己醛、2-戊基呋喃、1-己醇、1-辛烯-3-醇等物质引起的,影响绿豆产品的感官品质^[3]。发酵技术在改善风味方面有很好的效果,尤其是在谷物和豆类加工过程中,还可以产生独特的发酵风味^[4],但发酵剂的选择至关重要。乳酸菌发酵对豆类加工具有很大的风味改善潜力,一些乳酸菌在发酵过程中通过生物转化形成醛、醇、酸、酯等化合物,从而减少令人不愉快的豆腥味^[5-6]。

目前,通常用于豆类发酵的菌种包括多种乳酸菌,例如乳双歧杆菌^[7]、植物乳杆菌^[8]、鼠李糖乳杆菌^[9]、干酪乳杆菌^[10]和嗜酸乳杆菌^[11]等。乳双歧杆菌常见于哺乳动物的结肠,被广泛应用于食品加工领域,如发酵乳制品等。临床研究表明,乳双歧杆菌在调节肠道菌群平衡、增强宿主免疫力、促进营养吸收、改善肠道代谢能力方面有很好的效果,进而可以改善整体胃肠道健康^[12-13]。Rao 等^[7]利用乳双歧杆菌和动物双歧杆菌发酵薏苡仁菊花饮料,对饮料的感官和营养品质具有调节作用。Wu 等^[14]研究发现,乳双歧杆菌(*Bifidobacterium lactis*) 80 (Bla80) 发酵苹果汁,可以改善挥发性风味物质对产品的影响。Dong 等^[15]研究动物双歧杆菌亚种,发现 Bla80 可以改善肠道菌群并缓解炎症。上述研究表明,乳双歧杆菌可以用来改善食品风味,有利于肠道菌群平衡。但是,利用乳双歧杆菌发酵改善豆制品风味的相关研究很少。为了降低绿豆浆的不良风味,本研究利用 Bla80 发酵绿豆浆,评估绿豆浆发酵前后挥发性风味物质的变化特征,以减少或消除不良风味,旨在为 Bla80 在绿豆产品中的应用研究提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料

白城绿豆(白绿9号),益海嘉里粮油食品工业有限公司;乳双歧杆菌(*Bifidobacterium lactis*) 80 (Bla80),微康益生菌(苏州)股份有限公司;白砂糖,安琪酵母股份有限公司;2-甲基-3-庚酮,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;MRS 肉汤,青岛海博生物

技术有限公司;氯化钠,国药集团化学试剂有限公司。

FA2204 型电子天平,天津天马衡基仪器有限公司;SP36S 型破壁机,浙江绍兴苏泊尔生活电器有限公司;HWS-250 型恒温恒湿培养箱,宁波赛福实验仪器有限公司;TA.XT Plus 型质构仪,英国 Stable Micro System;pHS-3BW 型 pH 计,上海仪电科学仪器股份有限公司;MODULYOD-203 型冷冻干燥机,北京四环科学仪器厂;GCMS-QP2010 型气相色谱质谱仪,日本岛津公司;MARS 60 型旋转流变仪,德国哈克公司;PEN3 型电子鼻,德国 AIRSENSE 公司;Betttersize 2600 型激光粒度分析仪,丹东百特仪器有限公司;EMS-18 型恒温磁力搅拌器,天津欧诺仪器仪表有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 绿豆浆的制备与发酵

按照湿法脱壳的方法,将绿豆在去离子水中室温浸泡 10 h,在此过程中逐渐脱皮^[16]。绿豆与去离子水质量比为 1:19,使用高速多功能破碎机持续匀浆 24 min。所得混合物通过过滤器(80 目)过滤。随后,将绿豆浆煮沸 15 min,以消除内源微生物,得到未发酵绿豆浆,然后冷却至约 38℃。Bla80 为冻干菌粉,采用直投式方法,将冻干菌粉(添加量为 1.5×10^7 CFU/g)与绿豆浆混合 30 s 后,在 38℃ 恒温恒湿烘箱中发酵 8 h,形成发酵绿豆浆。

1.2.2 发酵性能的测定

采用 pHs-3BW 型 pH 计,每隔 1 h 直接测量发酵绿豆浆样品的 pH^[17]。pH 计在 25℃ 下校准,所有测量值均进行温度补偿。按照 GB 5009.239—2016《食品安全国家标准 食品酸度的测定》测定发酵绿豆浆的可滴定酸度(TA)。

1.2.3 质构特性的测定

使用质构分析仪^[18](TPA)测定绿豆浆发酵前后的质构特性。样品的测量采用直径为 40 mm 的 TA/BE 圆柱形探头,测试前速度为 4.0 mm/s,测试速度为 2.0 mm/s,测试后速度为 2.0 mm/s,测试中试样压缩至变形 70%。测定结束后,得到硬度、稠度、黏聚性和黏聚指数。

1.2.4 粒度分布

采用激光粒度分析仪测定绿豆浆和发酵绿豆浆的粒度分布^[19]。测定条件:样品溶液散射体的折射率设为 1.46,水分散剂的折射率设为 1.333。将样品滴入充满水的检测室中,直到达到最佳稀释度和遮光率。使用体积加权平均直径($D_{4,3}$)表示绿豆浆中蛋白

质颗粒的大小。

1.2.5 流变特性的测定

采用流变仪测定绿豆浆发酵前后储能模量、损耗模量、表观黏度和蠕变恢复性^[20]。测量采用直径 30 mm 的不锈钢平探头, 间隙 1.0 mm。控制检测温度为 $(25 \pm 0.5)^\circ\text{C}$, 对样品进行了一系列测定, 包括: (1) 在 1.0 Hz 条件下, 在 0.1% ~ 10% 的应变幅值范围内进行振荡应变扫描实验, 以确定 0.5% 的一致应变; (2) 在 $0.10 \sim 100.00 \text{ s}^{-1}$ 范围内, 分析剪切速率和表观黏度的变化关系; (3) 固定应变为 0.5%, 在 0.1 ~ 100 Hz 范围内进行频率扫描实验; (4) 在 3 Pa 应力下记录 300 s 蠕变阶段, 然后在 0 Pa 应力下记录 300 s 恢复阶段。

1.2.6 电子鼻分析

采用 PEN3 型电子鼻对样品进行风味分析^[21], 内含的 10 个不同传感器分别检测不同的风味物质。测定条件为: 取 2.0 g 冻干后的样品粉末置于 20 mL 顶空瓶中, 加入 5 mL 超纯水和 1 g NaCl, 放入转子; 在水浴加热装置中 60°C 平衡 30 min; 载气(合成空气)流量为 150 mL/min, 数据采集时间为 120 s, 采集延迟时间 60 s。手动进样, 每个样品平行进样 3 次。电子鼻传感器的性能描述见表 1。

表 1 电子鼻传感器的性能描述

Tab. 1 Performance description of electronic nose sensors

阵列序号	传感器名称	性能描述
1	W1C	芳香成分(苯类)
2	W5S	对氮氧化合物很灵敏
3	W3C	对芳香成分灵敏, 氨类
4	W6S	对氢化物有选择性
5	W5C	短链烷烃及芳香成分
6	W1S	对甲基类灵敏
7	W1W	对硫化物灵敏
8	W2S	对醇类、醛类和酮类灵敏
9	W2W	对有机硫化物灵敏
10	W3S	对长链烷烃灵敏

1.2.7 挥发性风味物质的测定

样品前处理^[22]: 取 2.0 g 冻干后的样品粉末置于 20 mL 顶空瓶中, 加入 5 mL 超纯水和 1 g NaCl, 并加入 10 μL 2-甲基-3-庚酮作为内标。在磁力搅拌装置中 60°C 平衡 25 min。使用固相微萃取的萃取头(75 μm CAR/PDMS), 60°C 顶空吸附 45 min。

GC 条件: 使用 DB-Wax FS 色谱柱(30 m $\times$ 0.32 mm $\times$ 0.50 μm , BRUKER, USA)。升温程序如下: 50°C 保持 1 min, 然后以 $3^\circ\text{C}/\text{min}$ 升至 180°C , 保持 1 min, 再以 $8^\circ\text{C}/\text{min}$ 升至 250°C , 保持 3 min。初

始温度为 40°C , 载气为高纯氦气。

MS 条件: 离子源温度 220°C , 进样口温度 220°C , 进样器温度 250°C , 质谱扫描范围 m/z 40.0 ~ 500.0, 扫描速度设置为 1000。检测峰与 NIST11s Library 进行对比, 选择匹配度大于 85 的化合物, 并按内标归一化进行分析。

1.2.8 感官评价

根据先前的方法^[23](略作修改)对绿豆浆发酵前后的感官品质进行评价。感官评价包括 5 个指标: 香气、味道、颜色、组织状态和整体可接受性, 见表 2。邀请了 14 名训练有素的小组成员(男女比例为 1:1), 并要求他们使用 5 段爱好量表。强度、偏好和总体判断量表分别从 1(弱)到 5(强)、1(坏或不喜欢)到 5(好或喜欢)、1(不喜欢)到 5(喜欢)。参与者被引导品尝发酵前后的绿豆浆样品, 品尝每个样品之间饮用纯净水清洁口腔。样品的呈现顺序是随机的, 结果以平均值表示。

表 2 发酵绿豆浆感官评定表

Tab. 2 Sensory rating table of fermented mung bean milk

感官特性	感官描述	评分
香气	浓郁的绿豆香气, 酸味	5
	有发酵香气, 略有酸味	4
	正常发酵香气	3
	绿豆香气很淡, 略有异味	2
	无明显发酵香气, 异味明显	1
味道	酸甜兼有, 味道浓厚	5
	酸甜适中, 口感柔和	4
	酸甜比例失衡, 略带生绿豆味	3
	偏酸或偏甜, 有强烈的生绿豆味	2
	味道异常	1
颜色	均匀的淡绿色	5
	淡绿色, 但颜色不明显	4
	淡绿色, 光泽较浅	3
	暗绿色或灰色, 色调不和谐	2
	黑色, 颜色异常	1
组织状态	状态均匀光滑, 黏度适中, 质地细滑	5
	状态均匀, 黏度较适中, 质地较细滑	4
	状态较均匀, 黏度较适中, 质地较粗糙	3
	状态较差, 黏度较低, 质地粗糙	2
	状态差, 黏度低, 质地粗糙, 气泡很多	1
整体可接受性	愿意接受	5
	可以接受	4
	勉强接受	3
	有点不能接受	2
	不能接受	1

1.3 数据处理

采用 Excel 和 SPSS 24.0 进行数据统计分析并进行单因素方差分析(ANOVA)。使用 Origin 2019 程序进行数据处理和图表绘制。 $P < 0.05$ 表示组间具有显

著差异。

2 结果与分析

2.1 发酵特性的分析

根据发酵体系中 pH 的变化可以推断乳酸菌在绿豆浆中的生长状态及发酵进程。发酵过程中绿豆浆的 pH 和可滴定酸度如图 1 所示。随着发酵时间的延长,绿豆浆的 pH 逐渐降低,由发酵起始的 6.72 下降到发酵 8 h 后的 5.21。当发酵 8 h 时,发酵绿豆浆的可滴定酸度为 14.83 °T。在发酵过程中,绿豆浆的酸度逐渐升高,导致 pH 逐渐降低。pH 的降低和酸度的升高是由于发酵绿豆浆中产生了大量的有机酸,这也可以反映菌株的发酵性能。结果表明,Bla80 可以利用绿豆浆作为底物进行生长。

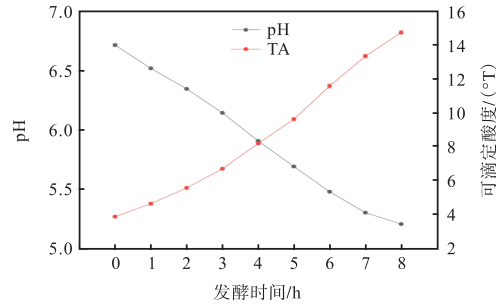


图 1 发酵过程中绿豆浆的 pH 和可滴定酸度

Fig. 1 pH and titratable acidity of mung bean milk during fermentation

2.2 质构特性的分析

用质构仪测量了绿豆浆发酵前后的硬度、稠度、黏聚性和黏聚指数,结果见表 3。发酵绿豆浆的稠度显著高于绿豆浆 ($P<0.05$),说明发酵可以增加绿豆浆的稠度。这是由于乳酸菌在发酵过程中会产生胞外多糖 (EPS),从而增加绿豆浆的黏度、保水性和其他相互作用,进而增加产品的稠度。

表 3 绿豆浆发酵前后的质构特性

Tab. 3 Texture characteristics of mung bean milk before and after fermentation

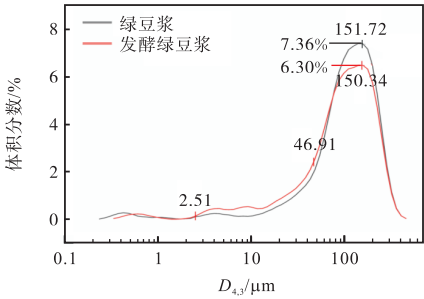
组别	硬度/g	稠度/(g·s)	黏聚性/g	黏聚指数/(g·s)
发酵绿豆浆	20.18 ± 1.01 ^a	195.00 ± 4.90 ^a	-15.45 ± 0.30 ^a	-17.62 ± 1.04 ^a
绿豆浆	18.95 ± 0.74 ^a	168.65 ± 14.73 ^b	-14.92 ± 0.47 ^a	-16.52 ± 0.43 ^a

注:不同小写字母表示组间差异显著 ($P<0.05$)。

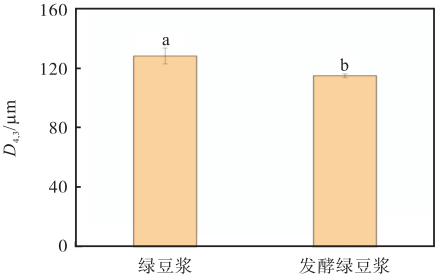
2.3 粒度分布的变化

发酵制品的稳定性和感官品质受到颗粒大小和分布的影响。绿豆浆发酵过程中粒径分布和体积平

均粒径的变化如图 2 所示。与未发酵绿豆浆相比,发酵绿豆浆在 150 μm 处的粒度分布峰强度明显减弱,而 2.5 ~ 40 μm 粒径区间的颗粒数量呈增加的趋势。绿豆浆发酵前后的 $D_{4,3}$ 分别为 $(129.07 \pm 5.42) \mu\text{m}$ 和 $(115.70 \pm 1.25) \mu\text{m}$,发酵可以显著改善 ($P<0.05$) 绿豆浆中 $D_{4,3}$ 的分布情况。结果表明,发酵可以降低绿豆浆中蛋白质颗粒的大小,由于微生物的水解作用,大分子的蛋白质降解为多肽及小肽,小肽继续降解成为游离氨基酸,乳酸菌通过发酵能够将绿豆浆中的大蛋白质颗粒分解成较小的颗粒^[24]。通常情况下,粒径变得越小,则说明饮料结构体系越稳定,口感越细腻^[25]。



(a) 粒径分布



(b) 体积平均粒径

图 2 绿豆浆发酵过程中粒径分布和体积平均粒径的变化

Fig. 2 Changes in particle size distribution and volume mean particle size during fermentation of mung bean milk

2.4 流变学性能的分析

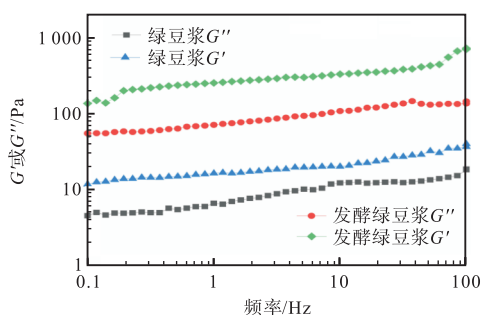
绿豆浆发酵前后的流变特性分析如图 3 所示。储能模量 (G') 代表样品的弹性特性,损耗模量 (G'') 代表样品的黏性特性。如图 3(a) 可知,绿豆浆发酵前后, G' 和 G'' 随频率的增大而增大,且 G' 始终高于 G'' ,表明弹性特性占优势,样品在后熟后呈现固体状。结果表明,乳酸菌发酵可以改变绿豆浆的黏弹性流变性能。产生这一结果的原因是发酵过程中乳酸菌产生乳酸等酸性物质,导致 pH 不断下降,从而降低了绿豆蛋白分子的表面活性,进而形成胶状颗粒,

增加了发酵绿豆浆的黏度^[26]。乳酸菌发酵产生的胞外多糖, 还可以改变绿豆浆的质地和结构, 胞外多糖与绿豆浆中蛋白质的关联引起绿豆浆的内摩擦和黏度的增加^[20]。

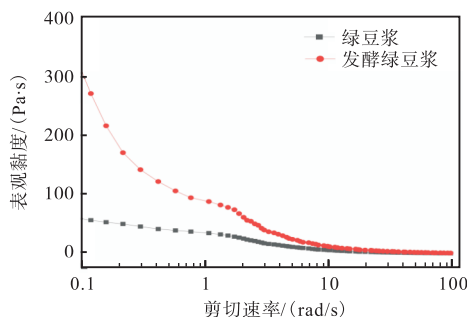
发酵蛋白饮料的加工、质量控制和储存受到其流变学特性的影响。表观黏度随着剪切速率的变化如图 3(b) 所示。结果表明, 发酵提高了绿豆浆的表观黏度, 随着剪切速率的增加, 绿豆浆和发酵绿豆浆的表观黏度呈现降低的趋势, 但发酵绿豆浆的表观黏度始终高于绿豆浆。发酵绿豆浆表观黏度的增加是乳酸菌在发酵过程中引起乳酸的积累, 导致绿豆浆 pH 的降低, 蛋白质之间发生结合。此外, Behare 等^[27]研究表明, 乳酸菌发酵产生的胞外多糖可以改善发酵蛋白

饮料的质地和感官品质。

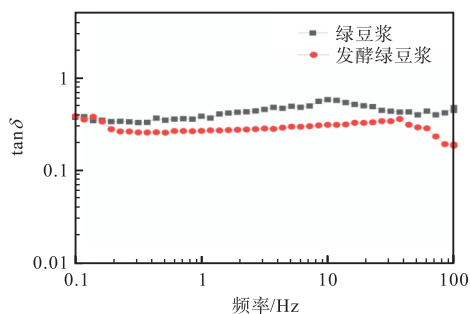
乳酸发酵诱导豆浆蛋白凝胶形成的机制是酸凝作用^[28]。损耗角正切($\tan \delta$)越小, 表明整个样品的固体性质越强。由图 3(c) 可知, 发酵绿豆浆的 $\tan \delta$ 低于绿豆浆, 为凝胶提供了更强的网络结构。图 3(d) 为绿豆浆发酵前后的蠕变恢复曲线, 表示样品受到恒定外力时, 形变量随时间的变化。乳酸菌发酵会产生乳酸, 乳酸会诱导绿豆浆凝胶的形成, 使发酵绿豆浆具有更好的润滑性能和质地^[29]。发酵绿豆浆的黏度高于未发酵绿豆浆, 黏度增大, 说明凝胶的内部结构变得牢固。结果表明, 绿豆浆经 Bla80 发酵后的动态黏弹性性能优于绿豆浆。



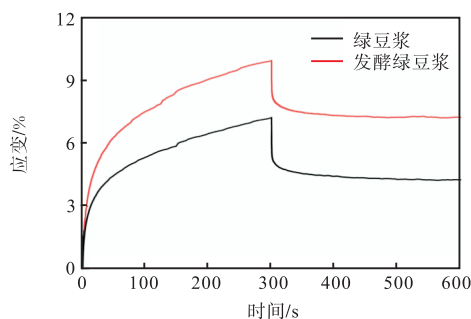
(a) 频率扫描



(b) 表观黏度与剪切速率的关系



(c) $\tan \delta$



(d) 蠕变恢复曲线

图 3 绿豆浆发酵前后的流变特性分析

Fig. 3 Rheological property analysis of mung bean milk before and after fermentation

2.5 电子鼻分析

绿豆浆发酵前后的电子鼻响应结果如图 4 所示。绿豆浆发酵后, 传感器 W1C(芳香成分)和 W2S(醇类、醛类和酮类)的响应值明显升高, 其次是 W5S(氮氧化合物)、W3C(芳香成分、氨类)和 W5C(短链烷烃和芳香成分)。结果表明, 发酵增加了绿豆浆中挥发性风味物质的丰富度, 具体而言, 醇类、酮类、酯类和某些芳香族化合物的种类或含量增加。这些结果表明, 发酵可以有效提高绿豆浆中挥发性风味物质的丰富度。电子鼻分析响应的是具体大类的风

味物质, 若要更好地探究某种挥发性风味物质在产品中的风味, 需使用气相色谱-质谱(GC-MS)技术进一步分析。

2.6 挥发性风味物质的成分分析

豆类中所含有的令人不快的豆腥味是限制其在食品工业中应用的重要因素。一般来说, 发酵食品的风味和口感特征会受到发酵过程中产生的新物质的影响^[30]。在发酵豆浆中, 其独特的风味与乳酸菌发酵过程所产生的醇类、酸类、酯类、酮类和醛类物质有关, 是多种挥发性风味化合物共同作用的结果^[31-32]。

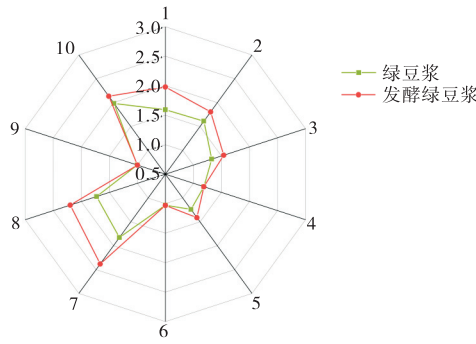


图4 绿豆浆发酵前后香气雷达图

Fig. 4 Aroma radar map of mung bean milk before and after fermentation

采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用(HS-SPME-GC-MS)测定发酵前后香气成分的变化。在未发酵绿豆浆和发酵绿豆浆中共检测到46种挥发性风味化合物,其中醛类13种、醇类11种、酮类8种、酸类5种、酯类7种、其他类3种(表4)。从风味物质的丰富度来看,醛类和醇类的种类最多,其次是酮类和酯类。在未发酵绿豆浆中检测到31种风味物质,在发酵绿豆浆中检测到38种风味物质,发酵绿豆浆特有的风味物质有16种。这表明Bla80菌株在发酵过程中引发了物质的转化,使绿豆浆发酵后产生了多种新的风味物质,也减少了一些不良风味物质。绿豆浆发酵前后不同类型挥发性风味化合物的含量变化如图5所示,其丰富度与电子鼻分析结果类似。

己醛、壬醛、辛醛、2-己醛、癸醛、(E)-2-己烯醛和苯甲醛等被确定为产生气味的主要化合物,由于其气味阈值较低而对整体的气味产生较大贡献,它们的浓度在发酵后下降,这可能是脂肪酸被氧化分解的结果^[33]。在发酵过程中醛类物质常经氧化或还原作用生成酸或醇^[34-35]。与未发酵绿豆浆相比,发酵绿豆浆中己醛和2-己醛含量分别降低83.52%和98.53%,在豆腥风味物质中降低幅度最大。这是由于乳酸菌通过发酵将己醛转化为己酸^[36],减少豆腥味及青草味,改善绿豆浆的风味。(E)-2-庚烯醛的相对含量呈增加趋势,增加了发酵绿豆浆的果香味。Yi等^[5]使用植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*)发酵,导致豆浆中己醛含量显著降低,这与本研究的结果一致。在绿豆浆中检测到8种醇类物质,而发酵后检测到10种醇类物质(表4),发酵过程会有醇类发酵转化,醇类物质是氨基酸分解代谢的最终产物^[37]。在未发酵绿豆浆中,1-壬醇、1-己醇和1-辛醇表现最突出,并且是豆类不良风味的主要原因。事实上,1-己醇是豆科风味化合物的一种特征化合物,被描述为青草味^[38],

发酵后1-壬醇和1-己醇的含量降低。

表4 绿豆浆发酵前后不同挥发性风味物质分析

Tab. 4 Analysis of different volatile flavor substances in mung bean milk before and after fermentation

类别	化合物名称 ^a	保留时间/ min	风味物质含量(μg/kg) ^b	
			绿豆浆	发酵绿豆浆
醛类	戊醛	2.58	4.04	10.07
	己醛	4.27	326.03	53.74
	庚醛	6.49	ND	1.58
	2-己醛	7.48	81.19	1.19
	辛醛	9.16	1.00	ND
	(E)-2-己烯醛	7.81	11.96	ND
	(E)-2-庚烯醛	10.23	1.77	50.85
	2-戊烯醛	10.87	2.89	ND
	壬醛	12.01	6.38	ND
	月桂醛	13.55	0.62	ND
	癸醛	14.77	3.32	0.60
	苯甲醛	15.42	2.06	ND
	(E)-2-壬烯醛	15.67	2.39	0.15
醇类	异戊醇	7.99	ND	1.84
	1-戊醇	8.98	4.32	4.33
	1-己醇	11.47	50.33	1.61
	叶醇	12.32	6.36	ND
	2-乙基己醇	14.82	ND	2.37
	1-辛醇	16.50	3.42	2.03
	苯甲醇	23.51	0.27	0.25
	反式-2-辛烯-1-醇	17.84	0.12	13.16
	1-壬醇	18.86	1.17	0.85
	1-癸醇	21.18	0.17	0.25
酮类	月桂醇	25.47	ND	0.14
	3-庚酮	5.78	0.20	0.21
	1-辛烯-3-酮	9.62	ND	11.86
	甲基庚烯酮	10.69	1.41	2.45
	异佛尔酮	16.89	2.63	0.97
	3-辛烯-2-酮	12.49	0.47	4.04
	3,5-辛二烯-2-酮	15.42	0.47	4.04
	2-十一酮	17.27	ND	0.28
酸类	苯乙酮	18.39	ND	1.21
	乙酸	14.27	ND	15.04
	己酸	23.14	0.23	0.50
	正壬酸	29.40	ND	0.16
	正癸酸	31.30	ND	0.08
酯类	十六酸	40.45	0.19	0.26
	乙酸乙酯	1.75	ND	0.41
	乙酸辛烯酯	11.66	ND	0.17
	2-乙基丁酸烯丙酯	13.72	ND	0.13
	辛酸乙酯	12.97	3.11	ND
	乙酸丁香酚酯	29.17	ND	0.18
	癸酸乙酯	18.14	ND	2.29
其他	乙酸四氢糠酯	23.48	ND	0.39
	2-乙基呋喃	2.27	1.22	1.47
	2-戊基呋喃	7.35	4.77	1.06
	2-异丙基-3-甲氧基吡嗪	13.23	0.33	ND

注:ND表示未检测到;^a表示检测到的芳香化合物;^b表示用内标2-甲基-3-庚酮计算。

在未发酵绿豆浆中, 仅检测出 1 种酯类物质, 而在发酵后, 它们的种类增加到 6 种(表 4)。部分有机酸可以通过酯化转化为酯, 这些酯类化合物可以赋予发酵食品果香或花香特征, 增强其温和宜人的风味^[31]。发酵后产生乙酸乙酯(甜味、果香)、乙酸辛烯酯(果香)、2-乙基丁酸烯丙酯(果香)、乙酸丁香酚酯(果香)、癸酸乙酯(果香、酒香)和乙酸四氢糠酯(果香), 酯类物质的感官阈值较低, 发酵产生的多种酯类物质改善了绿豆浆的风味, 可以掩盖不受欢迎的豆腥味^[3]。绿豆中呋喃类物质的含量较高, 特别是 2-戊基呋喃, 被认为是绿豆中典型的豆腥味代表物^[39]。发酵后, 绿豆浆中 1-己醇和 2-戊基呋喃的含量分别下降了 96.80%和 77.78%。同时, 2-异丙基-3-甲氧基吡嗪也是绿豆的固有成分, 仅存在于未发酵绿豆浆中。研究^[3]表明, 吡嗪的形成是由氨基酸和碳水化合物的氧化引起的, 发酵后, 呋喃类风味物质的含量降低, 这对改善绿豆浆的风味有积极的作用。

与未发酵绿豆浆相比, 发酵绿豆浆中属于酮类的风味物质有所增加。在发酵绿豆浆中检测出 1-辛烯-3-酮(蘑菇香气)、3, 5-辛二烯-2-酮(草本气味)、2-十一酮(柑橘香气、类似桃子香味)、苯乙酮(类似山楂香味)。3-辛烯-2-酮和甲基庚烯酮在发酵绿豆浆中的浓度要高于未发酵绿豆浆。此外, Bla80 发酵增加了绿豆浆中酸的含量, 发酵过程中产生的有机酸, 包括乙酸、己酸和十六酸, 可以赋予发酵绿豆浆更加清新的酸味^[20]。

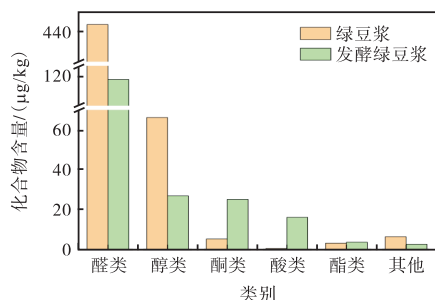


图 5 发酵前后绿豆浆中不同类型挥发性风味化合物含量的变化

Fig. 5 Changes in the content of different types of volatile flavor compounds in mung bean milk before and after fermentation

2.7 感官特性

绿豆浆发酵过程中的感官特性如图 6 所示。绿豆浆发酵前后, 样品的颜色均呈现浅绿色, 颜色方面差别不大。发酵绿豆浆的味道和组织状态分值逐渐增加, 表现为豆香浓郁、质地细腻。发酵绿豆浆的香

气和整体可接受性得分升高, 此时发酵绿豆浆的香气更加浓郁细腻。发酵可以显著降低大豆分离蛋白的苦味并产生令人愉悦的味道^[40]。然而, 过度发酵可能会导致蛋白质过度水解, 产生更多的小分子肽和氨基酸类物质, 促进苦肽的产生^[41]。综上所述, Bla80 发酵可以增加绿豆浆的香气、味道、组织状态和整体可接受性。

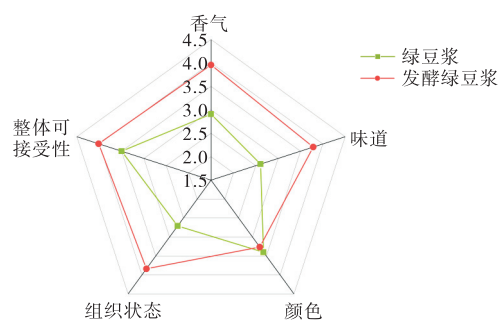


图 6 绿豆浆发酵过程中的感官特性

Fig. 6 Sensory properties of mung bean milk during fermentation

3 结 语

本文探究了 Bla80 发酵绿豆浆的能力, 通过发酵技术改善绿豆浆的不良风味, 以丰富植物性蛋白饮料的种类。发酵可以有效降低绿豆浆的粒径, 增加豆浆的稠度, 有利于改善发酵豆浆的口感。挥发性风味物质分析表明, Bla80 发酵降低了绿豆浆中醛类和呋喃类物质的含量, 增加了醇类、酮类、酸类和酯类物质的丰富度, 能够降低令人不愉快的豆腥味, 使发酵绿豆浆富含花香、果香且具有甜味。发酵后, 绿豆浆中的典型豆腥味物质己醛、2-己醛、1-己醇、2-戊基呋喃的含量分别下降了 83.52%、98.53%、96.80% 和 77.78%, 这使绿豆浆的风味品质得以改善。综上所述, Bla80 发酵是一种改善绿豆浆不良豆腥味的办法, 为研究绿豆发酵蛋白饮料提供理论基础。

参考文献:

- [1] GANESAN K, XU B. A critical review on phytochemical profile and health promoting effects of mung bean (*Vigna radiata*) [J]. Food science and human wellness, 2018, 7(1): 11-33.
- [2] VENKIDASAMY B, SELVARAJ D, NILE A S, et al. Indian pulses: a review on nutritional, functional and biochemical properties with future perspectives[J]. Trends in food science & technology, 2019, 88: 228-242.

- [3] SHI X, LI J, WANG S, et al. Flavor characteristic analysis of soymilk prepared by different soybean cultivars and establishment of evaluation method of soybean cultivars suitable for soymilk processing[J]. Food chemistry, 2015, 185: 422–429.
- [4] TANGYU M, MULLER J, BOLTON C J, et al. Fermentation of plant-based milk alternatives for improved flavour and nutritional value[J]. Applied microbiology and biotechnology, 2019, 103: 9263–9275.
- [5] YI C, LI Y, ZHU H, et al. Effect of *Lactobacillus plantarum* fermentation on the volatile flavors of mung beans [J]. LWT-Food science and technology, 2021, 146: 111434.
- [6] 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.
- [7] RAO H, LIN L, ZHAO M. Probiotic fermentation affects the chemical characteristics of coix seed-chrysanthemum beverage: regulatory role in sensory and nutritional qualities[J]. Food bioscience, 2024, 58: 103629.
- [8] SHI Y, SINGH A, KITTS D D, et al. Lactic acid fermentation: a novel approach to eliminate unpleasant aroma in pea protein isolates[J]. LWT-Food science and technology, 2021, 150: 111927.
- [9] MANUS J, MILLETTE M, USCANGA B R A, et al. In vitro protein digestibility and physico-chemical properties of lactic acid bacteria fermented beverages enriched with plant proteins[J]. Journal of food science, 2021, 86(9): 4172–4182.
- [10] LIANG Z, YI M, SUN J, et al. Physicochemical properties and volatile profile of mung bean flour fermented by *Lactocaseibacillus casei* and *Lactococcus lactis*[J]. LWT-Food science and technology, 2022, 163: 113565.
- [11] LI C, CHEN X, JIN Z, et al. Physicochemical property changes and aroma differences of fermented yellow pea flours: role of *Lactobacilli* and fermentation time[J]. Food & function, 2021, 12(15): 6950–6963.
- [12] 杨淑娟, 苗壮壮, 史嘉琪, 等. 乳双歧杆菌 Probio-M8 对发酵乳风味的影响及应用评价[J]. 中国食品学报, 2022, 22(7): 256–266.
- [13] 杨玲, 贾洪利, 严超, 等. 双歧杆菌发酵乳对人体的肠道调节作用研究[J]. 食品科技, 2021, 46(6): 7–13.
- [14] WU C, LI T, QI J, et al. Effects of lactic acid fermentation-based biotransformation on phenolic profiles, antioxidant capacity and flavor volatiles of apple juice [J]. LWT-Food science and technology, 2020, 122: 109064.
- [15] DONG Y, LIAO W, TANG J, et al. *Bifidobacterium* BLa80 mitigates colitis by altering gut microbiota and alleviating inflammation[J]. AMB Express, 2022, 12(1): 67.
- [16] ZHANG P, TANG F, CAI W, et al. Evaluating the effect of lactic acid bacteria fermentation on quality, aroma, and metabolites of chickpea milk[J]. Frontiers in nutrition, 2022, 9: 1069714.
- [17] 吴俊霞, 程建明, 薛峰. 枸杞大豆蛋白植物基酸奶理化性质研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(10): 193–198.
- [18] RUI X, ZHANG Q, HUANG J, et al. Does lactic fermentation influence soy yogurt protein digestibility: a comparative study between soymilk and soy yogurt at different pH[J]. Journal of the science of food and agriculture, 2019, 99(2): 861–867.
- [19] 张左勇, 叶寒, 陈家怡, 等. 大豆酸奶发酵过程中不同蛋白组分理化性质与风味变化研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(1): 1–15.
- [20] PENG X, LIAO Y, REN K, et al. Fermentation performance, nutrient composition, and flavor volatiles in soy milk after mixed culture fermentation[J]. Process biochemistry, 2022, 121: 286–297.
- [21] 葛晓佳, 唐楠煜, 杨瑞, 等. 沙棘添加对乳酸菌发酵牛乳风味和消费者接受度的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(3): 97–105.
- [22] GAO Z, SHEN P, LAN Y, et al. Effect of alkaline extraction pH on structure properties, solubility, and beany flavor of yellow pea protein isolate[J]. Food research international, 2020, 131: 109045.
- [23] LIANG Z, SUN J, YANG S, et al. Fermentation of mung bean milk by *Lactococcus lactis*: focus on the physicochemical properties, antioxidant capacities and sensory evaluation[J]. Food bioscience, 2022, 48: 101798.
- [24] 王晓雯, 王灵娟, 王哲, 等. 发酵对蛋白质组成、结构与功能特性及风味影响的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(9): 314–320.
- [25] XU X G, ZHOU X S, ZENG J X. Determination of the influence of homogenizing conditions on the stability of buffalo milk by particle size analysis[J]. China dairy industry, 2009, 37(1): 42–44.
- [26] JAYARATHNA S, PRIYASHANTHA H, JOHANSSON M, et al. Probiotic enriched fermented soy-gel as a vegan

- substitute for dairy yoghurt[J]. Journal of food processing and preservation, 2020, 45 (1) : 15092.
- [27] BEHARE P V, SINGH R, TOMAR S K, et al. Effect of exopolysaccharide-producing strains of *Streptococcus thermophilus* on technological attributes of fat-free lassi[J]. Journal of dairy science, 2010, 93 (7) : 2874–2879.
- [28] LIU L, HUANG Y, ZHANG X, et al. Texture analysis and physicochemical characteristics of fermented soy-milk gel by different lactic acid bacteria[J]. Food hydrocolloids, 2023, 136: 108252.
- [29] PANG Z, XU R, ZHU Y, et al. Comparison of rheological, tribological, and microstructural properties of soy-milk gels acidified with glucono-delta-lactone or culture[J]. Food research international, 2019, 121 : 798–805.
- [30] LU Z X, HE J F, ZHANG Y C, et al. Composition, physicochemical properties of pea protein and its application in functional foods[J]. Critical reviews in food science and nutrition, 2019, 60 (15) : 2593–2605.
- [31] FISCHER E, CAYOT N, CACHON R. Potential of microorganisms to decrease the “Beany” off-flavor: a review[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2022, 70 (15) : 4493–4508.
- [32] 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.
- [33] ZHANG C, HUA Y, LI X, et al. Key volatile off-flavor compounds in peas (*Pisum sativum* L.) and their relations with the endogenous precursors and enzymes using soybean (*Glycine max*) as a reference[J]. Food chemistry, 2020, 333: 127469.
- [34] 刘婷, 赵良忠, 周小虎, 等. 酸豆奶发酵过程中大豆异黄酮及风味物质变化规律[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48 (6) : 181–187.
- [35] 邢常辉, 李文钊, 孙妮, 等. 酵母抽提物对大豆酸奶奶味的影响[J]. 食品研究与开发, 2022, 43 (18) : 63–69.
- [36] CHEN Y, LI P, LIAO L, et al. Characteristic fingerprints and volatile flavor compound variations in Liuyang *Douchi* during fermentation via HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. Food chemistry, 2021, 361: 130055.
- [37] PENG X, YUE Q, CHI Q, et al. Microbial diversity and flavor regularity of soy milk fermented using kombucha [J]. Foods, 2023, 12 (4) : 884.
- [38] 张彩猛. 豌豆源挥发性异味成分的生成机理与低异味豌豆分离蛋白加工工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
- [39] LIU Y, CADWALLADER D C, DRAKE M. Identification of predominant aroma components of dried pea protein concentrates and isolates[J]. Food chemistry, 2023, 406: 134998.
- [40] MEINLSCHMIDT P, SCHWEIGGERT-WEISZ U, EISNER P. Soy protein hydrolysates fermentation: effect of debittering and degradation of major soy allergens[J]. LWT-Food science and technology, 2016, 71: 202–212.
- [41] LIU B, LI N, CHEN F, et al. Review on the release mechanism and debittering technology of bitter peptides from protein hydrolysates[J]. Comprehensive reviews in food science and food safety, 2022, 21 (6) : 5153–5170.

责任编辑: 郎婧

(上接第 28 页)

- Hericium erinaceus* attenuates colitis in C57BL/6 mice via regulation of oxidative stress, inflammation-related signaling pathways and modulating the composition of the gut microbiota[J]. The journal of nutritional biochemistry, 2018, 57: 67–76.
- [37] ZHAO K, GE Q, ZHANG X, et al. Genomic analysis of intestinal flora and liver genes in mice with circadian rhythm disorders fed with flavonoids from *Sedum aizoon* L. [J]. Food bioscience, 2022, 50: 102067.
- [38] UMEDA S, SUJINO T, MIYAMOTO K, et al. D-amino acids ameliorate experimental colitis and cholangitis by inhibiting growth of proteobacteria: potential therapeutic role in inflammatory bowel disease[J]. Cellular and molecular gastroenterology and hepatology, 2023, 16 (6) : 1011–1031.
- [39] CHEN C, YUE Y, HE Z, et al. *Lactobacillus gasseri* relieves diarrhea caused by enterotoxin-producing *Escherichia coli* through inflammation modulation and gut microbiota regulation[J]. Food bioscience, 2023, 56: 103186.

责任编辑: 郎婧