

# 乳酸菌发酵前后山药汁营养成分 及风味物质的变化

冯志强<sup>1</sup>, 张宇<sup>2</sup>, 田维志<sup>2</sup>, 刘莹莹<sup>2</sup>, 廖爱美<sup>2</sup>, 潘龙<sup>2\*</sup>, 黄继红<sup>2,3,4\*</sup>

(1. 三全食品股份有限公司, 河南郑州 450001)(2. 河南工业大学生物工程学院, 小麦生物加工与营养功能河南省重点实验室, 河南郑州 450001)(3. 河南大学农学院, 作物逆境适应与改良国家重点实验室, 河南开封 475004)(4. 许昌学院食品与药学院, 河南许昌 461000)

**摘要:** 研究了乳酸菌发酵对山药汁营养成分及感官特性的影响。结果显示, 经 *L. plantarum* 101 和 *L. paracasei* HGD 组合发酵后的山药汁在总体感官上更容易被接受。与未发酵山药汁相比, 乳酸菌发酵可将 pH 值由 6.12 降至 3.88, 总糖含量降低 69.35%, 总酚、可溶性膳食纤维、总酸和游离氨基酸的含量分别提高 98.00%、53.15%、493.51% 和 64.30%。同时气相色谱-质谱分析结果表明, 乳酸菌发酵可使山药汁中风味物质的种类及含量显著变化, 其中酸类提高 195.02%, 酯类提高 172.73%, 酯类物质种类及含量的增加赋予了发酵山药汁丰富的香味; 酮类和醇类分别提高 88.27% 和 7.46%, 醛类下降了 85.82%, 使得最终山药汁发酵液的可接受度提高。综上所述, 山药汁经乳酸菌发酵后不仅能够提高其营养成分, 还可以改善风味, 该研究结果表明乳酸菌发酵山药汁可作为一种待开发的新型功能性饮品。

**关键词:** 山药汁; 微生物发酵; 气相色谱-质谱; 风味物质

文章编号: 1673-9078(2024)08-294-301

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.8.0932

## Changes in Nutritional Functional Components and Flavor Substances of Yam Juice Before and After Lactic Acid Bacteria Fermentation

FENG Zhiqiang<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>2</sup>, TIAN Weizhi<sup>2</sup>, LIU Yingying<sup>2</sup>, LIAO Aimei<sup>2</sup>, PAN Long<sup>2\*</sup>, HUANG Jihong<sup>2,3,4\*</sup>

(1. Zhengzhou Sanquan Foods Co. Ltd., Zhengzhou 450001, China) (2. Henan Provincial Key Laboratory of Biological Processing and Nutritional Function of Wheat, College of Biological Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China) (3. State Key Laboratory of Crop Stress Adaptation and Improvement, College of Agriculture, Henan University, Kaifeng 475004, China) (4. School of Food and Pharmacy, Xuchang University, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** By evaluating the effects of lactic acid bacteria fermentation on the nutritional components and sensory

引文格式:

冯志强, 张宇, 田维志, 等. 乳酸菌发酵前后山药汁营养成分及风味物质的变化 [J]. 现代食品科技, 2024, 40(8): 294-301.

FENG Zhiqiang, ZHANG Yu, TIAN Weizhi, et al. Changes in nutritional functional components and flavor substances of yam juice before and after lactic acid bacteria fermentation [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(8): 294-301.

收稿日期: 2023-08-02

基金项目: 河南省科技研发计划联合基金项目 (222103810060); 河南省青年科学基金项目 (232300421266); 河南省博士后科研项目资助 (202103120); 河南工业大学高层次人才基金项目 (2020BS064); 中央引导地方科技发展资金 (Z20221341069)

作者简介: 冯志强 (1978-), 男, 硕士, 研究方向: 功能食品研究开发, E-mail: fzhq78@163.com

通讯作者: 潘龙 (1988-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 功能食品研究开发, E-mail: panlong@haut.edu.cn; 共同通讯作者: 黄继红 (1965-), 女, 博士, 教授级高工, 研究方向: 小麦生物加工与营养功能, E-mail: huangjihong1216@126.com

properties of yam juice, a combination of *L. plantarum* 101 and *L. paracasei* HGD fermented yam juice was found to be the most acceptable to the overall senses. Compared with unfermented yam juice, the pH value of the fermented decreased from 6.12 to 3.88, whereas the total sugar content decreased by 69.35%. The content of total phenols, soluble dietary fiber, total acids, and free amino acids increased by 98.00%, 53.15%, 493.51%, and 64.30%, respectively. At the same time, the results of gas chromatography-mass spectrometry analysis showed that lactic acid bacteria fermentation could significantly change the types and contents of flavor substances in yam juice, among which acids increased by 195.02% and esters increased by 172.73%. The increase in ester species and content gave rise to a rich flavor in the fermented yam juice, in which ketones and alcohols increased by 88.27% and 7.46%, respectively, while aldehydes decreased by 85.82%. As a result, this improved the acceptability of the final yam juice fermentation broth. In summary, the fermentation of yam juice by lactic acid bacteria not only improve its nutritional composition but also its flavor. These findings indicate that fermented yam juice shows promise as a new type of functional beverage.

**Key words:** yam juice; microbial fermentation; gas chromatography-mass spectrometry; flavor substance

随着对药食同源制品功能的深入研究,对乳酸菌作用于人体健康机制的进一步阐明,益生乳酸菌及其保健食品的研发已成为当前食品科学领域的一个热门话题<sup>[1]</sup>。另一方面山药作为具有悠久历史的药食两用性植物,其本身在人类自身的营养保健上就有巨大的价值,具有预防心脑血管疾病<sup>[2]</sup>,提高机体免疫力调节肠道功能<sup>[3]</sup>、健脾补肺<sup>[4]</sup>、降低血糖血脂<sup>[5]</sup>、抗衰老抗肿瘤<sup>[6]</sup>等作用。此外,科学家通过研究发现在经过酶解后,山药中的一些淀粉可以被转化成可发酵的糖,容易被微生物利用<sup>[7]</sup>。

乳酸菌是一类可产乳酸的无芽孢革兰氏阳性细菌的总称,之前的报道表明其可以调节肠道菌群、增强人体免疫力并且具有较好效果<sup>[8]</sup>。目前,国内外研究学者已经将多种商业化乳酸菌用于发酵单一或复合果蔬汁,对其营养功能特性及感官特性进行提高<sup>[9]</sup>。利用乳酸菌发酵果蔬,可以结合乳酸菌的益生功能和果蔬的营养功能,赋予果蔬新风味<sup>[10]</sup>。然而,乳酸菌应用于山药汁发酵的相关报道较少,已有的文献大多聚焦于抗氧化活性的研究<sup>[7]</sup>,未提及营养功能成分与风味物质的变化。

因此,本研究以山药汁为原料,采用实验室保藏的植物乳杆菌 (*Lactobacillus plantarum* 101),嗜酸乳杆菌 (*Lactobacillus acidophilus* 376),副干酪乳杆菌 (*Lactobacillus paracasei* HGD) 3种乳酸菌进行发酵,以感官品评筛选出最适菌株组合,进一步对山药汁发酵前后的营养功能成分(可溶性蛋白质、可溶性膳食纤维、总酸、总糖、总酚、游离氨基酸)及风味物质的种类和含量进行综合比较,为今后以山药汁为发酵原料,利用乳酸菌制备新型功能性饮品提供数据支持和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

*Lactobacillus plantarum* 101、*Lactobacillus acidophilus* 376、*Lactobacillus paracasei* HGD 保藏于河南工业大学生物工程学院发酵实训中心;柠檬酸、5-磺基水杨酸、福林酚、氯化钠、 $\rho=95\%$ 乙醇、没食子酸、碳酸钠(国产分析纯级),天津市科密欧化学试剂有限公司; $\alpha$ -高温淀粉酶 20 000 U/g、糖化酶 100 000 U/g,上海源叶生物科技有限公司;MRS培养基,杭州百思生物技术有限公司;BCA试剂盒,上海宏叶生物科技有限公司;怀山药购自于永辉超市。

### 1.2 仪器与设备

SP301S 苏泊尔破壁机,浙江苏泊尔股份有限公司;SW-CJ-1F 超净工作台,苏州净化设备有限公司;H1650-W 高速冷冻离心机,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;LT1002E 电子天平,上海精密科学仪器有限公司;T6 新世纪紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司;pH计,METTLER TOLEDO 梅特勒托利多;GZX-350 光照培养箱,北京中兴伟业仪器有限公司;KQ2200DE 超声波清洗器,昆山市超声仪器有限公司;SBA-50B SBA 生物传感分析仪,山东科学院生物研究所;ZQWY-200GS 振荡培养箱,上海知楚仪器有限公司;Sykam S433D 氨基酸分析仪,上海力晶科学仪器有限公司;U-3000 高效液相色谱,上海魁元科学仪器有限公司;GCMS-QP2020NXnci SYSTEM 气相色谱质谱,株式会社岛津制作所。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 菌种活化

分别将 *Lactobacillus plantarum* 101、*Lactobacillus acidophilus* 376 以及 *Lactobacillus paracasei* HGD 冻干粉混匀在 MRS 肉汤培养基中，37 °C，摇床 150 r/min 活化 24 h 备用。

#### 1.3.2 发酵液的制备

##### 1.3.2.1 原料预处理

新鲜山药洗净、切块后，进行打浆，将山药块与去离子水按 1:5 (m/m) 混合后打浆，添加高温- $\alpha$  淀粉酶（酶活 20 000 U/mL）进行液化处理，95 °C 处理 2 h，过程中不断搅拌处理，加柠檬酸调 pH 值至 4.6，然后添加糖化酶（酶活 100 000 U/mL）处理，40 °C，糖化 3 h，每个三角摇瓶（250 mL）中分装 100 mL，放入高压蒸汽锅中 115 °C 灭菌 20 min 后，冷却至室温，以备发酵用。

##### 1.3.2.2 种子液制备

在无菌条件下将 *L. plantarum* 101 (A)、*L. acidophilus* 376 (B)、*L. paracasei* HGD (C) 甘油管接种至 MRS 培养基中，150 r/min，37 °C 培养 24 h 制备种子液。

#### 1.3.3 发酵菌株的筛选

对上述三株菌株以 A、B、C、AB、AC、BC、ABC 进行组合，当接种为 1 种菌株时，接种量为 6%，当接种为 2 种菌株时，接种量分别为 3%，当接种为 3 种菌株时，接种量分别为 2%，（即保证接种总体积一致），对照中接种等量无菌水，接种完成后将发酵培养基置于 150 r/min，37 °C 条件下培养 48 h。对发酵结束后的发酵液进行感官品评确定最适菌株组合。

#### 1.3.4 感官品评

以感官评价为指标，采用评分测验法<sup>[11]</sup>，随机选取 10 人组成评价小组，分别从产品的色泽（25 分）、香气（25 分）、状态（25 分）和口感（25 分）4 个方面展开感官评定，评分标准见下表 1。

感官综合评分为 4 个指标之和，需 10 位评价员进行单独评价，统计评价结果，进行分析。

#### 1.3.5 基本成分的测定

总糖的测定参照 GB/T5009.7-2003；根据 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准食品中蛋白质的测定》对可溶性蛋白进行测定；参照 GB 5009.88-2014

《食品安全国家标准食品中膳食纤维的测定》测定可溶性膳食纤维；总酚的测定参照 GB/T 5009.11-2017《食品工业用总酚测定》进行。

表 1 产品感官评分标准

Table 1 Product sensory scoring criteria

指标	评分标准	评分区间/分
色泽	白色	21~25
	浅黄或微黄	14~20
	暗黄色	7~13
	暗黄色极重	0~6
香气	有山药的香气，气味协调	21~25
	稍有山药的香气，气味协调	14~20
	山药味不足，气味协调性不好	7~13
	只有发酵香味	0~6
口感	酸甜适中，滋味纯正，口感细腻润滑	21~25
	略有粗糙，适口性一般，略甜或略酸	14~20
	酸甜比协调，味感不柔和，可接受性差	7~13
	过酸或过甜，不易接受	0~6
组织状态	组织细腻、均匀，无沉淀	21~25
	组织细腻，无分层，有些许沉淀	14~20
	组织细腻，有分层现象，有些许沉淀	7~13
	分层现象严重，沉淀严重	0~6

#### 1.3.6 游离氨基酸的测定

根据曹晶晶等<sup>[12]</sup>的研究报道进行样品前处理，采用全自动氨基酸分析仪 Sykam S433D 测定发酵前后游离氨基酸含量。

#### 1.3.7 总酸以及酸组分的测定

酸组分通过高效液相色谱（HPLC, U-3000）进行分析测定<sup>[13]</sup>。操作条件：Acclaim OA，5  $\mu$ m，4.6 mm $\times$ 150 mm，流动相为 100% 硫酸钠（40 mmol/L，甲磺酸调节 pH 值 2.68），设置柱温为 25 °C，流量为 0.8 mL/min，在波长 210 nm 检测，进样量 10  $\mu$ L。

#### 1.3.8 风味物质的测定

采用气相色谱/质谱法（GC/MS）的方法对山药汁发酵前后的物质进行检测分析<sup>[14]</sup>。将发酵液样品于离心机 12 000 r/min 离心 6 min，取上清 1.5 mL 经 0.22  $\mu$ m 过滤处理，采用 AOC-20 Plus 系列自动进样器自动进样的方法吸附发酵山药汁的物质，然后采用气相色谱/质谱法（GC/MS）进行分析并求出其相对含量。

## 1.4 数据统计与分析

使用 Excel 2021、Origin 2022 处理与分析数据，使用 GraphPad Prism 6.0 进行显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同菌株组合发酵山药汁感官品评结果

以感官评价为指标，采用评分测验法，在实验室随机抽取 10 位同学分别从产品的色泽、香气、状态和口感 4 个方面进行感官评定，如图 1 所示。结果取平均值（去除最高分和最低分），从图中可以看出，各组评分仅在口感上差异较明显，分别比较各组口感评分，分析原因可能是 B 菌株的加入，导致产酸增多，所以口感差异明显。最终结果显示 AC 组在色泽、香气和组织状态上评分均高于其他组，在口感层次更为丰富，最终评分达到 85.1 分，即经 *L. plantarum* 101 和 *L. paracasei* HGD 混合发酵后的山药汁在总体感官上更容易被接受。

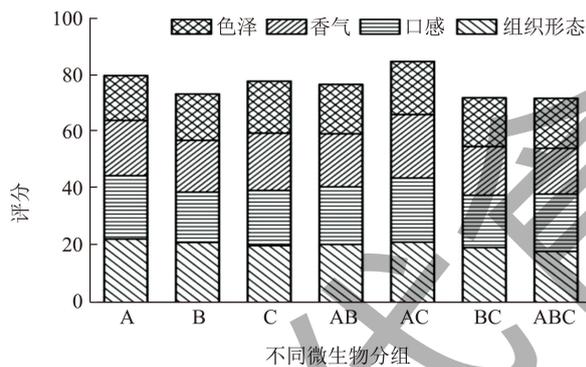


图 1 不同菌株组合发酵山药汁感官品评评分

Fig.1 Sensory evaluation score of fermented yam juice with different strain combinations

### 2.2 山药汁发酵前后基本营养成分变化分析

比较发酵前后山药汁基本成分含量可知（表 2），发酵后的总糖含量与未发酵的山药汁相比降低了 69.35%，这可能是因为山药汁中的总糖被降解为还

原糖<sup>[15]</sup>，从而被微生物利用。发酵液中可溶性蛋白含量从 7.49 g/L 降低至 2.44 g/L，山药汁中蛋白以水溶性蛋白为主，乳酸菌发酵过程中产生的蛋白酶可以水解可溶性蛋白，产生多肽和氨基酸等小分子物质，从而丰富产品的风味<sup>[16]</sup>。总酚含量由 16.64 mg/L 提高至 32.75 mg/L，提高 98.00%，在 Hur 等<sup>[17]</sup>的研究中发现，植物乳杆菌可以通过将蓝莓中的酚去糖基化，从植物细胞壁释放共轭酚，从而提高发酵组中总酚的含量。可溶性膳食纤维含量由 180.07 mg/L 提高至 275.77 mg/L，提高 53.15%，这与曾锐等<sup>[18]</sup>研究趋势相同，经过乳酸菌发酵后，发酵液中膳食纤维总量提高 37.82%，表明乳酸菌发酵能够改变山药汁的营养组成并使其中的可溶性膳食纤维含量得到显著提高。

### 2.3 山药汁发酵前后游离氨基酸测定的结果分析

山药汁加入 *L. plantarum* 101 和 *L. paracasei* HGD 菌株（1:1）进行混合发酵。通过氨基酸分析仪在山药汁发酵液中共鉴定出 17 种游离氨基酸，如表 3 所示，其中空白组游离氨基酸总含量和实验组游离氨基酸总含量分别为 37.65 mg/100 mL 和 61.86 mg/100 mL，即山药汁经发酵后其游离氨基酸含量增长了 64.30%，这一结果可能与可溶性蛋白的水解是有关联的<sup>[12]</sup>。

根据呈味方式的不同，游离氨基酸可以被划分为：鲜味氨基酸（Glu、Asp、Lys）、甜味氨基酸（Thr、Ser、Gly、Ala、Val）和苦味氨基酸（Arg、Tyr、His、Ile、Leu、Phe、Met）。

经计算可知，实验组中甜味氨基酸、苦味氨基酸以及鲜味氨基酸的含量相比于空白组分别提高 108.66%、39.90% 和 33.79%，意味着山药汁经混合乳酸菌发酵后游离氨基酸的变化使得其口感更为饱满，Xu 等<sup>[19]</sup>在研究西兰花汁经过戊糖球球菌发酵后的氨基酸成分变化中发现，经过微生物的发酵处理后可显著提高果蔬汁的风味层次感。

表 2 山药汁发酵前后基本营养成分变化分析

Table 2 Analysis of changes in basic nutrients before and after fermentation of yam juice

样品	总糖/(g/L)	可溶性蛋白/(g/L)	总酚/(mg/L)	可溶性膳食纤维/(mg/L)
空白组	25.32 ± 1.33 <sup>a</sup>	7.49 ± 1.63 <sup>a</sup>	16.54 ± 1.37 <sup>a</sup>	180.07 ± 3.12 <sup>a</sup>
实验组	7.76 ± 0.43 <sup>b</sup>	2.44 ± 0.76 <sup>b</sup>	32.75 ± 1.32 <sup>b</sup>	275.77 ± 2.51 <sup>b</sup>

注：同列不同小写字母表示差异显著（ $P < 0.05$ ）；实验组中接种 *L. plantarum* 101 和 *L. paracasei* HGD，空白组中接种等量无菌水。下同。

表3 山药汁发酵液中游离氨基酸的含量  
Table 3 Content of free amino acids in yam juice fermentation broth (mg/100 mL)

序号	氨基酸	空白组	实验组
1	Lys	0.67 ± 0.02 <sup>a</sup>	1.35 ± 0.05 <sup>b</sup>
2	Thr	4.11 ± 0.21 <sup>a</sup>	2.58 ± 0.12 <sup>b</sup>
3	Leu	0.95 ± 0.03 <sup>a</sup>	1.92 ± 0.08 <sup>b</sup>
4	Ile	1.57 ± 0.15 <sup>a</sup>	0.89 ± 0.05 <sup>b</sup>
5	Val	1.94 ± 0.09 <sup>a</sup>	2.72 ± 0.11 <sup>b</sup>
6	Met	0.79 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.78 ± 0.01 <sup>a</sup>
7	Phe	3.5 ± 0.24 <sup>a</sup>	4.47 ± 0.31 <sup>a</sup>
8	Arg	0.23 ± 0.01 <sup>a</sup>	1.32 ± 0.01 <sup>b</sup>
9	His	0.86 ± 0.02 <sup>a</sup>	1.48 ± 0.04 <sup>b</sup>
10	Gly	0.37 ± 0.01 <sup>a</sup>	5.44 ± 0.27 <sup>b</sup>
11	Tyr	1.95 ± 0.11 <sup>a</sup>	2.92 ± 0.09 <sup>b</sup>
12	Cys	1.32 ± 0.07 <sup>a</sup>	3.13 ± 0.07 <sup>b</sup>
13	Ala	0.78 ± 0.05 <sup>a</sup>	3.84 ± 0.11 <sup>b</sup>
14	Ser	2.38 ± 0.17 <sup>a</sup>	5.41 ± 0.23 <sup>b</sup>
15	Glu	3.87 ± 0.34 <sup>a</sup>	5.63 ± 0.18 <sup>b</sup>
16	Asp	12.36 ± 1.76 <sup>a</sup>	15.63 ± 1.19 <sup>a</sup>
17	Pro	—	2.35 ± 0.09 <sup>a</sup>
21	游离氨基酸	37.65	61.86
22	鲜味氨基酸	16.90	22.61
23	甜味氨基酸	9.58	19.99
24	苦味氨基酸	9.85	13.78

注：同行字母不同表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。表4同。

表4 山药汁发酵前后总酸以及酸组分变化分析

Table 4 Analysis of total acid and acid composition changes before and after fermentation of yam juice

样品	pH 值	总酸/(g/L)	乳酸/(g/L)	乙酸/(g/L)	柠檬酸/(g/L)
未发酵	6.12 ± 0.05 <sup>a</sup>	0.77 ± 0.01 <sup>a</sup>	—	0.42 ± 0.05 <sup>a</sup>	0.23 ± 0.02 <sup>a</sup>
发酵	3.88 ± 0.06 <sup>b</sup>	4.57 ± 0.43 <sup>b</sup>	2.44 ± 0.76 <sup>a</sup>	1.13 ± 0.07 <sup>b</sup>	0.67 ± 0.04 <sup>b</sup>

表5 山药汁发酵后前风味物质相对含量 (%)

Table 5 Relative content of flavor substances before fermentation of yam juice (%)

序号	保留时间/min	名称	英文	CAS	含量/%	
					空白组	实验组
醇类	1	甲醇	Methyl Alcohol	67-56-1	0.35 ± 0.06	0.25 ± 0.02
	2	二丙酮醇	Diacetone alcohol	123-42-2	0.12 ± 0.03	—
	3	2,3-丁二醇	2,3-Butanediol	24347-58-8	—	0.12 ± 0.01
	4	3-呋喃甲醇	3-furan methanol	4412-91-3	—	0.36 ± 0.04
	5	糠醇	Furfuryl alcohol	98-00-0	0.29 ± 0.02	—

## 2.4 山药汁发酵前后总酸以及酸组分的测定

山药汁发酵前后总酸以及酸组分的测定结果如表4所示,经 *L. plantarum* 101 和 *L. paracasei* HGD(1:1) 混合发酵后,山药汁的 pH 值 ( $P < 0.05$ ) 显著下降,总酸含量从 0.77 g/L 增加到 4.57 g/L。这主要归因于乳酸菌在发酵过程中产生的淀粉和脂肪酶的代谢活性。这些酶能够将糖和脂肪转化为有机酸和脂肪酸,最终导致 pH 值显著降低,发酵系统的总酸含量显著增加<sup>[20]</sup>。乳酸、乙酸、柠檬酸是山药汁发酵后的主要酸组分,其含量均显著增加 ( $P < 0.05$ ),乳酸只在实验组中检测到,含量达到 2.44 g/L。乳酸是乳酸菌生长代谢的标志性物质,可赋予发酵食品独特的发酵风味<sup>[21]</sup>,在曹晶晶等<sup>[12]</sup>的研究中同样发现红薯浆液经过乳酸菌发酵后 pH 值降低,在对酸组分的测定结果中显示,乳酸是引起 pH 值降低的主要酸成分,其含量显著提高;乙酸可以呈现辛辣和醋味,是发酵食品中的一种主要特色风味化合物,而它可能是由于微生物通过磷酸葡萄糖途径的醋酸盐激酶途径和柠檬酸代谢产生的<sup>[22]</sup>;柠檬酸是食品加工中常用的添加剂,具有增进食欲、提高口感的作用,其含量的增加可以有效的改善发酵产物的风味<sup>[23]</sup>。

## 2.5 风味物质测定的结果分析

对峰面积占比超过 0.1% 的物质进行分析鉴定得到 44 种成分(表5),其中醇类 13 种、醛类 4 种、酸类 3 种、酮类 10 种、酯类 5 种、其他(包含胺类、吡啶类、吡咯类、醚类、呋喃类、咪唑类) 9 种。未发酵的山药汁中共鉴定出 35 种不同的风味物质,发酵后的山药汁发酵液中共鉴定出 29 种不同的风味物质。

续表 5

序号	保留时间/min	名称	英文	CAS	含量/%		
					空白组	实验组	
6	34.520	三甘醇	Triethylene glycol	112-27-6	0.17 ± 0.01	—	
7	30.270	2- 甲基 -1- 丙醇	2-Methyl-1-propanol	78-83-1	1.77 ± 0.05	2.34 ± 0.07	
8	32.970	2- 甲基 -1- 丁醇	2-Methyl-1-butanol	137-32-6	26.5 ± 1.14	28.81 ± 0.87	
9	33.620	1- 己醇	1-hexanol	111-27-3	13.26 ± 0.52	15.48 ± 0.63	
10	39.775	八乙二醇	Octaethylene glycol	5117-19-1	3.62 ± 0.16	9.79 ± 0.42	
11	39.450	六甘醇	Hexaethylene glycol	2615-15-8	9.93 ± 0.83	—	
12	37.180	十甘醇	Decaethylene glycol	5579-66-8	22.14 ± 1.36	—	
13	41.725	十一甘醇	Undecylglycerol	6809-70-7	—	26.83 ± 0.74	
醛类	1	1.445	异丁醛	Isobutyraldehyde	78-84-2	1.64 ± 0.09	0.13 ± 0.02
	2	12.080	羟乙醛	Glycolaldehyde	141-46-8	1.15 ± 0.07	0.1 ± 0.01
	3	35.385	3- 糠醛	3-Furfural	498-60-2	2.07 ± 0.11	0.12 ± 0.02
	4	32.365	5- 羟甲基糠醛	5-Hydroxymethylfurfural	67-47-0	1.63 ± 0.06	0.57 ± 0.04
酸类	1	15.975	冰醋酸	Acetic acid	64-19-7	1.15 ± 0.08	1.72 ± 0.03
	2	19.920	甲酸	Methanoic acid	64-18-6	1.06 ± 0.02	1.98 ± 0.02
	3	34.295	乳酸	Lactic acid	50-21-5	—	2.82 ± 0.05
酮类	1	2.190	丙酮	Acetone	67-64-1	0.16 ± 0.01	—
	2	11.270	3- 羟基 -2- 丁酮	3-hydroxy-2-butanone	513-86-0	—	0.12 ± 0.02
	3	11.675	羟基丙酮	Hydroxyacetone	116-9-6	0.2 ± 0.04	0.38 ± 0.01
	4	20.095	3- 甲基 -2- 环戊烯 -1- 酮	3-Methyl-2-neneneba cyclopentene-1-one	2758-18-1	0.15 ± 0.01	—
	5	23.375	环辛烷 -1,2- 二酮	Cyclooctane 1,2-dione	3008-40-0	—	0.11 ± 0.02
	6	28.370	1,2- 环戊二酮	1,2-Cyclopentanedione	930-30-3	0.13 ± 0.01	0.64 ± 0.04
	7	29.025	甲基环戊烯醇酮	Methyl Cyclopentenolone	80-71-7	0.17 ± 0.02	—
	8	30.000	1,3- 二羟基丙酮	1,3-dihydroxyacetone	96-26-4	0.56 ± 0.01	1.74 ± 0.03
	9	31.600	2- 羟基 - 丁酸酮	2-Hydroxy-gamma-butyrolactone	19444-84-9	0.11 ± 0.02	0.13 ± 0.03
	10	33.395	2,3- 二氢 -3,5 二羟基 -6- 甲基 -4(H)- 吡喃 -4- 酮	4H-Pyran-4-one, 2,3-dihydro-3,5-Dihydroxy-6-methyl	28564-83-2	0.48 ± 0.01	0.57 ± 0.02
酯类	1	14.460	丙烯酸缩水甘油酯	Glycidyl acrylate	106-90-1	—	0.11 ± 0.02
	2	30.340	2- 羟基 -3- 甲基戊酸甲酯	2-hydroxy-3-methyl Methyl pentanoate	41654-19-7	0.18 ± 0.01	0.25 ± 0.02
	3	35.625	3- 羟基丁酸乙酯	Ethyl 3-hydroxybutyrate	5405-41-4	—	0.13 ± 0.01
	4	32.895	3- 羟基己酸乙酯	3-hydroxy Ethyl hexanoate	2305-25-1	0.15 ± 0.02	0.24 ± 0.03
	5	34.890	邻苯二甲酸二乙酯	Diethyl Phthalate	84-66-2	—	0.17 ± 0.02
其他	1	1.020	N-(2- 甲氧基乙基)- O- 甲基胺	2-Methoxy-N-methylethylamine	38256-93-8	0.15 ± 0.01	0.25 ± 0.02
	2	34.195	吡啶	Pyridine	110-86-1	0.23 ± 0.01	0.15 ± 0.01
	3	15.900	2,3- 苯并呋喃	2,3-neneneba benzofuran	271-89-6	0.19 ± 0.02	—
	4	34.270	2- 乙酰基呋喃	2-neneneba acetyl furan	1192-62-7	0.18 ± 0.01	—
	5	32.670	咪唑	Imidazole	288-32-4	0.26 ± 0.01	—
	6	32.825	4- 甲基咪唑	Empirical Formula	822-36-6	0.13 ± 0.02	—
	7	34.010	15- 冠醚 -5	Pentaoxacyclopentadecane	33100-27-5	0.25 ± 0.03	—
	8	35.340	吲哚	Indole	120-72-9	0.19 ± 0.02	—
	9	34.165	3- 甲基吲哚	3-Methylindole	83-34-1	0.37 ± 0.04	—

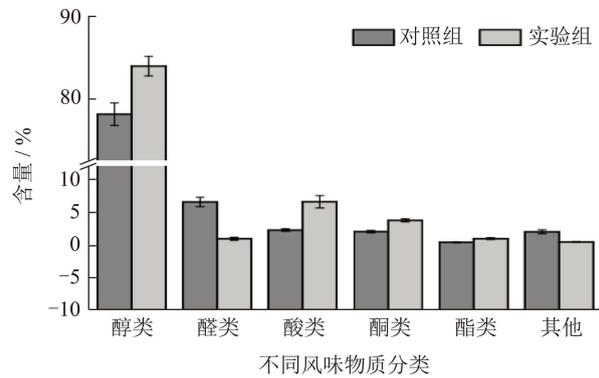


图2 山药汁发酵前后不同风味物质统计分析

Fig.2 Statistical analysis of different flavor substances before and after fermentation of yam juice

对不同风味物质进行统计分析可知(图2),所有风味物质中醇的占比最大,空白组醇类物质占总含量78.15%,醛类物质占总含量6.49%,酸类物质占总含量2.21%,酮类物质占总含量1.96%,酯类物质占总含量0.33%,其他类占总含量1.95%;实验组中醇类物质占总含量83.98%,醛类物质占总含量0.88%,酸类物质占总含量6.52%,酮类物质占总含量3.69%,其他类占总含量0.40%。变化最为明显的是酸类物质,提高195.02%,这与发酵后pH值降低是一致的;其次是酯类提高172.73%,酯类物质种类及含量的增加赋予了发酵山药汁丰富的香味<sup>[24]</sup>;酮类提高了88.27%,醇类提高了7.46%,赋予了食品令人愉悦的气味;醛类含量减少85.82%,原因是醛类化合物可被微生物分解成醇或氧化成酸<sup>[25]</sup>;且较高浓度的醛类物质可能会使发酵产品产生异味,从而降低整体可接受度,在Cagno等<sup>[26]</sup>的研究中发现,石榴汁经乳酸菌发酵后可有效的降低其醛类物质的含量;而醚类、呋喃类、咪唑类以及吡啶类等具有刺激性味的物质在发酵以后未检测到,这使得山药汁发酵后风味可接受度更高<sup>[27]</sup>。

### 3 结论

本论文研究了微生物发酵对山药汁营养成分及感官特性的影响。结果表明,经*L. plantarum* 101和*L. paracasei* HGD组合发酵后的山药汁在总体感官上更容易被接受。与未发酵山药汁相比,经乳酸菌发酵后,浆液中的pH值、总糖度明显下降,总酚、可溶性膳食纤维、总酸、游离氨基酸的含量均明显增加。同时,采用乳酸菌对山药汁进行发酵处理,可以明显地改变山药汁中风味物质的类型和含量,从而提高发酵山药汁的可接受度。乳酸菌的

发酵将为提高山药汁的营养价值、改善其风味提供新的思路与理论支撑。

### 参考文献

- [1] 孙慧峰,朱钧溢,国立东,等.乳酸菌生物转化药食同源植物活性成分研究进展[J].食品工业科技,2022,43(7):474-481.
- [2] 宋照军,张军合,张浩,等.发酵型山药酸奶的生产工艺[J].食品与机械,2002,3:27-28.
- [3] LI X H, XIN H Z. Immunomodulatory potentials of the water-soluble yam (*Dioscorea opposita* Thunb) polysaccharides for the normal and cyclophosphamide-suppressed mice [J]. Food and Agricultural Immunology, 2016, 27(5): 667-677.
- [4] 白冰,李明静,王勇,等.怀山药化学成分研究[J].中国中药杂志,2008,11:1272-1274.
- [5] TAKESHI N, NOBUTAKA S, NORIHISA K, et al. Functional properties of autolysate and enzymatic hydrolysates from yam tsukuncimo (*Dioscorea opposita* Thunb.) tuber mucilage tororo: antioxidative activity and antihypertensive activity [J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(12): 3838-3845.
- [6] CHEN H, WANG C, CHANG C, et al. Effects of Taiwanese yam (*Dioscorea japonica* Thunb var. *pseudojaponica* Yamamoto) on upper gut function and lipid metabolism in Balb/c mice [J]. Nutrition, 2003, 19(7-8): 646-651.
- [7] 郑苗,何佳,吕丹丹,等.复合乳酸菌发酵怀山药工艺及其抗氧化活性[J].中国酿造,2018,37(2):106-110.
- [8] 施赛磊,甄福喜.微生态制剂联合肠内营养对食管癌患者术后肠功能及营养状况的影响[J].中国微生态学杂志,2021,33(3):335-338,343.
- [9] XU X X, BAO Y J, WU B B, et al. Chemical analysis and flavor properties of blended orange, carrot, apple and Chinese jujube juice fermented by selenium-enriched probiotics [J]. Food Chemistry, 2019, 289(15):250-258.
- [10] AI C, MA N, ZHANG Q, et al. Immunomodulatory effects of different lactic acid bacteria on allergic response and its relationship with *in vitro* properties [J]. PLoS ONE, 2017, 11(10): e0164697.
- [11] 陈佩,党辉,贺国旗,等.一株干酪乳杆菌生物学特性及其发酵豆乳的研究[J].食品研究与开发,2017,38(17):17-21.
- [12] 曹晶晶,木泰华,马梦梅.不同乳酸菌发酵对甘薯淀粉加工浆液营养成分及感官特性的影响[J].食品科学,2022,43(18):134-142.
- [13] LI H, HUANG J, WANG Y, et al. Study on the nutritional characteristics and antioxidant activity of dealcoholized sequentially fermented apple juice with *Saccharomyces cerevisiae* and *Lactobacillus plantarum* fermentation [J]. Food Chem, 2021, 363: 130351.
- [14] 沈燕飞.乳酸菌发酵苹果原浆过程中的基本组分与抗氧化

- 化活性变化[D].杭州:浙江工业大学,2019.
- [15] SHARMAR HP, PATEL H, SUGANDHA. Enzymatic added extraction and clarification of fruit juices-A review [J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2017, 57(6): 1215-1227.
- [16] YVON M, RIJNEN L. Cheese flavour formation by amino acid catabolism [J]. International Dairy Journal, 2001, 11(4): 185-201.
- [17] HUR J S, LEE Y S, KIM Y, et al. Effect of fermentation on the antioxidant activity in plant-based foods [J]. Food Chemistry, 2014, 160: 346-356.
- [18] 曾锐,汪卓,陈菁,等.乳酸菌发酵对海红米糠的结构和功能特性的影响[J].食品与发酵工业,2023,49(11):119-124.
- [19] XU X X, BI S, LAO F, et al. Induced changes in bioactive compounds of broccoli juices after fermented by animal- and plant-derived *Pediococcus pentosaceus* [J]. Food Chemistry, 2021, 357(3): 129767.
- [20] 陈树俊,石玥,胡洁,等.响应面法优化萌发藜麦芽乳发酵工艺[J].食品科学,2017,38(16):64-70.
- [21] 刘欣,陈梅春,刘芸,等.乳酸菌发酵过程发酵液脂肪酸组生态位的异质性[J].食品科学,2021,42(14):110-120.
- [22] 常荣,袁敏,段珍珠,等.枇杷醋醋酸发酵工艺优化及醋酸味品质特征研究[J].食品与发酵工业,2017,43(10):102-110.
- [23] 刘莹.发酵胡萝卜原浆工艺优化及其对肠道菌群的影响[D].保定:河北农业大学,2018.
- [24] HAN M Z, WANG X W, ZHANG M N, et al. Effect of mixed *Lactobacillus* on the physicochemical properties of cloudy apple juice with the addition of polyphenols-concentrated solution [J]. Food Bioscience, 2021, 41: 101049.
- [25] 余欢,管敬喜,杨莹,等.7株野生葡萄酒酵母对‘桂葡3号’干白葡萄酒香气成分的影响[J].食品科学,2019,40(4):251-258.
- [26] CAGNO D R, FILANNINO P, GOBBETTI M. Lactic acid fermentation drives the optimal volatile flavor-aroma profile of pomegranate juice [J]. International Journal of Food Microbiology, 2017, 248: 56-62.
- [27] LIANG J R, DENG H, HU C Y, et al. Vitality, fermentation, aroma profile, and digestive tolerance of the newly selected *Lactiplantibacillus plantarum* and *Lactocaseibacillus paracasei* in fermented apple juice [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1045347.