

不同乳酸菌发酵对雪花梨汁营养成分、抗氧化活性 及挥发性风味物质的影响

吴江娜¹, 魏冠棉¹, 毛娜¹, 田桂芳¹, 高洁¹, 李福宽^{2*}, 桑亚新^{1*}

(¹ 河北农业大学食品科技学院 河北保定 071000

² 张家口市崇礼区市场监督管理局 河北张家口 076350)

摘要 为提升雪花梨汁的抗氧化活性和风味,分别以干酪乳杆菌 Y5-2b、植物乳杆菌 C17 和嗜酸乳杆菌 CH-2 制备发酵梨汁,对其理化指标和抗氧化活性进行分析,并采用高效液相色谱法和气相离子迁移谱技术(GC-IMS)对其营养物质和香气成分进行研究。结果表明:3 株乳酸菌均能在梨汁中进行良好代谢,且 Y5-2b 和 C17 的增殖代谢表现更优,在 20 h 时活菌数达到稳定,增长至 9.0 lg(CFU/mL);发酵梨汁的抗氧化活性显著升高($P<0.05$);糖含量降低,其中葡萄糖消耗最多,利用率为 5.29%~8.85%;部分有机酸含量呈现下降,在 Y5-2b 和 C17 组未检出苹果酸,CH-2 组苹果酸含量与未发酵的含量无显著差异(118 mg/100 mL),且发酵后柠檬酸含量分别下降了 33.65%,42.97%,38.71%;不同乳酸菌发酵对梨汁的酚类物质含量具有不同的影响,以熊果苷、儿茶素、芦丁含量变化为主;从梨汁样品中共鉴定出 44 种香气成分,其中 3-羟基-2-丁酮、正丁醛、丁酸等具有果香的挥发性风味物质含量在发酵后均有不同程度的增多。结论:乳酸菌发酵赋予梨汁丰富的营养物质、风味和较高的抗氧化活性,为乳酸菌发酵梨汁提供了一定的理论依据。

关键词 乳酸菌;发酵梨汁;营养成分;抗氧化;香气成分

文章编号 1009-7848(2024)09-0310-12 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.09.029

乳酸菌具有维持宿主肠道菌群平衡和酸碱平衡的作用^[1],其发酵过程中产生的短链脂肪酸、有机酸等代谢产物能够促进人体肠道对营养成分的吸收^[2]。乳酸菌代谢产物因具有多种抗菌成分,能缓解乳糖不耐受,降低血清胆固醇,提升免疫等功能,故成为食品工业和国际研究的热点^[3]。水果富含碳水化合物、矿物质等营养成分,是乳酸菌重要的营养来源。乳酸菌发酵可以利用水果中的生物化学成分,代谢积累乳酸、各种氨基酸、酯类物质等风味化合物,赋予发酵果汁独特的滋味和香气特性^[4],强化水果发酵制品的营养价值^[5]。

雪花梨皮薄、肉厚、汁多、味甜,有“天下第一梨”的称号,是生活中较常见的水果之一。研究发现,其糖含量 8%~15%,矿物质、果胶物质及维生素等含量丰富。此外,雪花梨中含有糖、有机酸等

多种营养物质以及黄酮、多酚等生物活性物质^[6]。近年来,利用乳酸菌发酵果汁越来越受到广大研究人员和消费者的关注和青睐。焦媛媛等^[7]利用植物乳杆菌、干酪乳杆菌分别发酵水晶梨汁。马剑等^[8]采用 2 株植物乳杆菌复合发酵梨汁。以上研究表明乳酸菌在梨汁中具有优良的发酵性能,且发酵后具有较强的抗氧化能力并能够产生丰富的挥发性风味物质。然而,目前关于雪花梨汁的深加工研究多集中在梨醋^[9]、梨酒^[10]、复合果汁^[11]等方面。为了更深入研究乳酸菌发酵雪花梨汁,有必要对其发酵前、后的营养成分、抗氧化活性及挥发性风味物质变化进行分析。

本研究以雪花梨为原料,采用干酪乳杆菌 Y5-2b、植物乳杆菌 C17、嗜酸乳杆菌 CH-2 这 3 种乳酸菌发酵制备功能性梨汁饮料,比较乳酸菌发酵前、后理化指标、营养成分、抗氧化活性及挥发性风味物质变化,为乳酸菌发酵雪花梨汁的菌种选择及提高梨果的深加工途径提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

雪花梨果,购自保定天惠果品批发市场;采购

收稿日期: 2023-09-28

基金项目: 河北省现代农业产业技术体系项目(HBCT2021210205);河北省重点研发计划项目(19227114D, 21327313D)

第一作者: 吴江娜,女,硕士生

通信作者: 桑亚新 E-mail: sangyaxin@sina.com

李福宽 E-mail: 2025863805@qq.com

时梨果实的可溶性固形物含量(soluble solids content, SSC)为10%~11%,果实呈椭圆状,大小均匀、肉质细腻、汁水多、无病虫害。

菌种:干酪乳杆菌 Y5-2b(*Lactobacillus casei* Y5-2b; CICC 23184)、植物乳杆菌 C17(*Lactobacillus plantarum* C17; CICC 22194)、嗜酸乳杆菌 CH-2(*Lactobacillus acidophilus* CH-2; CICC 22162, 购自中国工业微生物菌种保藏管理中心; DPPH 标准品, 购自北京索莱宝科技有限公司; ABTS 自由基, 购自碧云天生物技术有限公司; 苯酚、浓硫酸(均为分析纯)等, 购自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

FE28 pH 计, 梅特勒-托利多仪器有限公司; RSD200 数显糖度计, 田园信科光学仪器有限公司; CR9 色差仪, 深圳三恩时科技有限公司; N5000 紫外-可见分光光度计, 上海佑科仪器仪表有限公司; YP1002N 电子天平, 上海天美天平仪器有限公司; Multiskan Spectrum 酶标仪, Thermo Scientific 公司; 1260 高效液相色谱, 美国安捷伦公司; GC-IMS 气相离子迁移谱联用仪, 德国 G.A.S. 公司; TGL-16G 台式离心机, 湖南长沙易达仪器有限公司; V5 PLUS 榨汁机, 九阳股份有限公司; SQ510C 立式压力蒸汽灭菌锅, 重庆雅马拓科技有限公司; DH3600 生化(恒温)培养箱, 天津市泰斯特仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 发酵剂的制备 将-20℃条件下, 冷冻保藏的 Y5-2b、C17 和 CH-2 甘油管解冻至室温, 分别接种至 MRS 培养基, 37℃培养 24 h, 连续活化 2 次。将发酵液 6 000 r/min 离心 5 min, 弃去上清液, 沉淀物用等体积 0.85% 生理盐水洗涤 2 次, 调节菌悬液至 1×10^8 CFU/mL 作为乳酸菌发酵剂, 备用。

1.3.2 雪花梨汁制备 将雪花梨洗净, 果肉切成边长 2 cm 左右的立方体, 加入到榨汁机内搅碎出汁, 纱布过滤。随后, 使用蔗糖将梨汁的初始糖度调整到 15°Brix 发酵前将梨汁加热至 90℃条件下巴氏杀菌 15 min, 用流动冷水迅速冷却至室温, 备用。

1.3.3 梨汁乳酸菌发酵 按照乳酸菌活菌数约为 $7.0 \lg(\text{CFU/mL})$ 的接种量, 分别接种 1.3.1 节制备

的 Y5-2b、C17 和 CH-2 发酵剂于上述 1.3.2 节制备的雪花梨汁中, 37℃静置培养 48 h。在相同培养条件下, 以杀菌冷却后的未发酵梨汁作为对照。部分梨汁样品在 10 000 r/min 离心 10 min, 取上清液, 于-20℃下储存, 备用。

1.3.4 理化指标测定 活菌数, 平板倾注法测定; pH 值, pH 计测定; SSC 含量, 糖度计测定; 总酸, 参考 GB/T 12456-2021《食品中总酸的测定》; 总糖, 苯酚-硫酸法测定^[12]; 色差值, 用 L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔE 表示^[13], 平行测定 3 次, ΔE 值计算公式如下:

$$\Delta E = \sqrt{(L_n - L_0)^2 + (a_n - a_0)^2 + (b_n - b_0)^2} \quad (1)$$

式中: L_n 、 a_n 、 b_n 为发酵梨汁的色差值; L_0 、 a_0 、 b_0 为梨汁初始色差值。

1.3.5 总酚和总黄酮含量的测定 总酚含量采用 Folin-Ciocalteu 法测定^[14]。取 3.0 mL 梨汁上清液样品于比色管中, 加入 3.0 mL 蒸馏水、3.0 mL 7.5% 碳酸钠溶液和 1.0 mL Folin-酚显色剂, 摇匀, 室温下避光显色反应 1 h, 在 760 nm 处测定吸光度。以没食子酸制定标准曲线计算总酚含量。

总黄酮含量采用三氯化铝比色法测定^[15]。取 2.0 mL 梨汁上清液样品与 0.5 mL NaNO_2 溶液(50 g/L)于比色管中混合均匀, 室温静置 5 min。然后向比色管中加入 0.5 mL AlCl_3 溶液(100 g/L)混合均匀, 室温静置 5 min。加入 4.0 mL 1 mol/L NaOH 溶液和 3.0 mL 60% 乙醇, 混合均匀, 37℃水浴 45 min, 在 470 nm 处测定吸光度。以芦丁为标准曲线计算总黄酮含量。

1.3.6 体外抗氧化活性的测定

1.3.6.1 DPPH 自由基清除能力 DPPH 自由基清除能力的测定参考 Kawa-Rygielska 的方法^[16]。将 3.0 mL 现配的 0.4 mmol/L DPPH 溶液与 1 mL 梨汁上清液样品混合均匀, 室温条件下避光反应 30 min, 在 517 nm 处测定其吸光度, 按公式(2)计算梨汁发酵前后的 DPPH 自由基清除率。

$$\text{DPPH 自由基清除率}(\%) = (1 - \frac{A_s - A_0}{A_b}) \times 100 \quad (2)$$

式中: A_s 为样品溶液的吸光度值; A_0 为乙醇溶液代替 DPPH 溶液的吸光度值; A_b 为去离子水代替梨汁样品的吸光度值。

1.3.6.2 ABTS 自由基清除能力 ABTS 自由基清

除能力的测定采用总抗氧化能力检测试剂盒(ABTS法)测定。ABTS自由基阳离子(ABTS^+)是由等体积ABTS溶液和氧化剂溶液配制的ABTS工作母液形成的,室温避光存放16 h。把ABTS工作母液用PBS稀释成ABTS工作液,使ABTS工作液的吸光度减去相应的PBS空白对照后, A_{734} 为 0.7 ± 0.05 ,将200 μL ABTS工作液和10 μL 梨汁上清液样品溶液混合。避光孵育6 min后,用酶标仪在414 nm波长下测定吸光度。按公式(3)计算梨汁发酵前后的ABTS自由基清除率。

$$\text{ABTS 自由基清除率}(\%) = (1 - \frac{A_n - A_0}{A_T}) \times 100 \quad (3)$$

式中: A_n 为样品溶液的吸光度值; A_0 为去离子水代替 ABTS^+ 溶液的吸光度值; A_T 为去离子水代替梨汁样品的吸光度值。

1.3.7 糖、有机酸和酚类物质含量测定 采用HPLC法分别分析糖、有机酸、酚类物质的含量,分别参考Albertia等^[17]、Wei等^[18]、Villarreal-Soto等^[19]的方法。通过峰保留时间对糖、有机酸和酚类物质进行定性分析,并采用外标法对峰面积进行定量测定。

1.3.8 挥发性风味物质分析 采用顶空-气相色谱-离子迁移谱分析梨汁的挥发性成分^[20]。取5 mL样品于20 mL顶空瓶中,500 r/min、40 $^{\circ}\text{C}$ 孵化20 min。进样量为1 mL,进样口温度为85 $^{\circ}\text{C}$,色谱柱为MXT-5色谱柱(15 m \times 0.53 mm i.d,膜厚1 μm),载气为氮气(纯度99.999%),流速程序:2 mL/min维持2 min,8 min内增加至10 mL/min,之后10 min内增加至100 mL/min,最后在10 min内保持100 mL/min。以C4-C9酮为参照,测定各挥发性化合物的保留指数(RI)。通过将挥发性风味物质的RI和漂移时间(DT)与GC-IMS文库和国家标准与技术研究所(NIST)版本14.0MS光谱数据库进行比较,定性出挥发性风味物质。

1.3.9 数据处理 采用IBM SPSS Statistics 25.0进行数据分析;Origin 2020软件进行绘图;使用TBtools软件绘制热图,并进行聚类分析。

2 结果与分析

2.1 雪花梨汁发酵过程中乳酸菌的生长及pH值变化

发酵食品是通过有益微生物的代谢作用来改

善和提升食品原料的风味和营养价值,雪花梨汁48 h发酵过程中的微生物变化如图1a所示。随着发酵时间的延长,雪花梨汁中的微生物数量呈增长趋势。发酵前接种乳酸菌的活菌数为6.9 lg(CFU/mL),发酵结束时活菌数均高于8.5 lg(CFU/mL),这主要是因为发酵的初始阶段,营养物质丰富且环境适宜,使得乳酸菌数量增加^[21],这与发酵佛手柑汁的结果相一致^[22]。干酪乳杆菌Y5-2b和植物乳杆菌C17的活菌数分别在24 h和20 h达到发酵稳定,处于9.0 lg(CFU/mL)左右;嗜酸乳杆菌CH-2在发酵前16 h生长缓慢,在发酵28 h后达到稳定阶段,活菌数增长至8.5~8.7 lg(CFU/mL)。由此可知,乳酸菌可作为发酵剂在雪花梨汁中进行良好生长。

pH值是评价发酵程度的重要指标,其改变是对微生物在发酵过程中新陈代谢活动的综合反应^[23]。乳酸菌发酵梨汁48 h过程中的pH值变化如图1b所示:随着发酵时间的延长,梨汁的pH值呈下降的趋势。其中,Y5-2b和C17发酵的雪花梨汁pH值由最初的4.8在48 h发酵过程中降低到3.8以下,CH-2发酵雪花梨汁pH值在48 h缓慢降低至4.0,即表明前两者在梨汁中的发酵性能优于后者。此外,pH<4.0可以抑制许多致病菌和污染微生物的生长^[24]可以为其微生物安全性提供一定的保障。另外,发酵雪梨汁pH值降低速率与图1a的活菌数变化趋势相一致,主要是由于酸是乳酸菌的主要代谢产物,其含量的累积使得pH值发生变化。结合图1a和图1b的结果可知,Y5-2b和C17在发酵20 h时代谢趋于稳定,所以选择20 h梨汁发酵时间进行后续分析。

2.2 雪花梨汁发酵前、后理化指标测定

雪花梨汁发酵20 h前、后的理化指标测定如表1所示:发酵后,梨汁的pH值、总糖及SSC含量均显著降低,而总酸含量升高。其中,pH值和总酸的变化可能是由于发酵过程中产生的有机酸浓度增加,特别是乳酸的产生,从而导致低pH值和高酸度^[25]。另外,由于乳酸菌生长繁殖消耗碳源后代谢为乳酸,使得总糖及SSC含量下降。此外,不同的乳酸菌发酵梨汁后总糖和总酸含量差异显著,可能是由于多糖在酶的作用下被水解释放出各种可发酵单糖,其组成不同从而影响乳酸菌

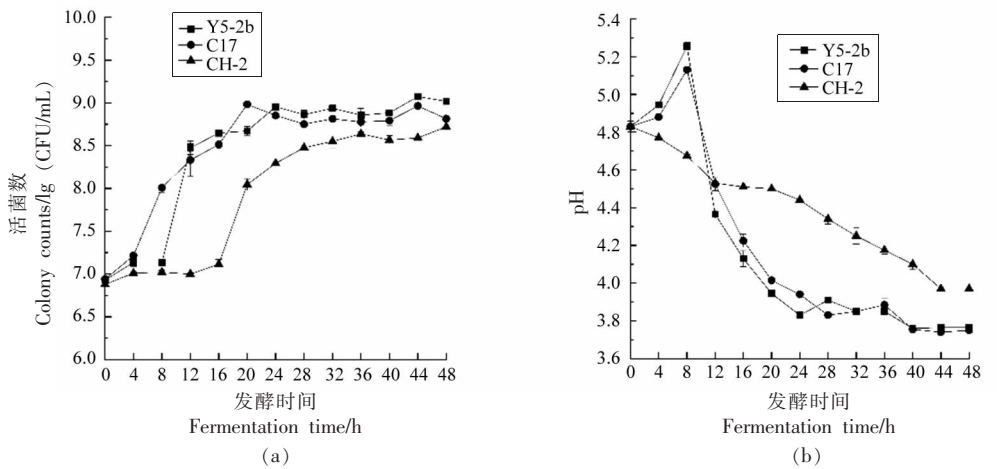


图 1 乳酸菌发酵梨汁过程中的活菌数(a)及 pH 值(b)变化

Fig.1 Changes of viable bacteria counts (a) and pH value (b) during fermentation of pear juice by lactic acid bacteria

的产酸^[26]。结果表明,乳酸菌能够充分利用梨汁中的碳源,以维持自身的生长增殖。而 Y5-2b 在梨汁条件下更具发酵优势,C17 和 CH-2 次之。

发酵 20 h 前后梨汁的色差变化如表 2 所示: 3 种乳酸菌发酵后的雪梨梨汁色泽差异较大。Y5-2b 和 C17 发酵的梨汁亮度 L^* 值和黄色色调 b^* 值增大,即表明两者对雪梨梨汁的亮度和黄色都有增强的作用;而 CH-2 的生长增殖使得梨汁的浑浊度增加从而导致 L^* 值与对照组相比呈现下降趋势^[27]。此外,发酵后均使得红色色调 a^* 值降低,

表明 3 种菌发酵均对雪梨梨汁的红色有降低作用。 ΔE^* 为总色差值,其值越大说明发酵梨汁的色泽变化越大。 $\Delta E^*>2$ 时,可呈现肉眼可辨的色泽变化。其中 Y5-2b 发酵的梨汁 ΔE^* 值为 17.36,说明其发酵能有效保护梨汁的色泽,且具有肉眼可辨的改善作用;而且颜色属性与乳酸呈正相关,从而表明乳酸发酵对颜色具有保存作用^[28]。此外,发酵产生具有强抗氧化活性的代谢物或者褐变产物的降解^[29],从而改善梨汁的褐变。结果表明,乳酸菌发酵对梨汁的褐变具有明显的改善作用,其中以

Table 1 Physical and chemical properties of pear juice before and after fermentation				
	pH	总酸/(g/L)	总糖/(g/L)	SSC/(°Brix)
Control	5.10 ± 0.03 ^a	1.49 ± 0.02 ^d	162.6 ± 0.57 ^a	15.03 ± 0.06 ^a
Y5-2b	3.98 ± 0.02 ^d	3.64 ± 0.03 ^a	127.6 ± 4.81 ^c	14.00 ± 0.10 ^c
C17	4.26 ± 0.01 ^c	2.46 ± 0.03 ^b	135.8 ± 3.96 ^c	14.10 ± 0.10 ^{bc}
CH-2	4.37 ± 0.02 ^b	2.02 ± 0.01 ^c	148.5 ± 1.27 ^b	14.23 ± 0.12 ^b

注:同列不同小写字母表示为显著差异($P<0.05$)。

Table 2 Analysis of color difference of pear juice fermented by different lactic acid bacteria							
	L^*	a^*	b^*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*
Control	48.62 ± 0.13 ^c	7.8 ± 0.07 ^a	8.75 ± 0.11 ^c	—	—	—	—
Y5-2b	54.04 ± 0.16 ^a	7.19 ± 0.12 ^{bc}	10.96 ± 0.16 ^a	5.42 ± 0.16 ^a	0.62 ± 0.12 ^{ab}	2.21 ± 0.16 ^a	17.36 ± 0.54 ^a
C17	49.99 ± 0.08 ^b	7.30 ± 0.17 ^b	9.09 ± 0.06 ^b	1.37 ± 0.08 ^b	-0.51 ± 0.17 ^a	0.34 ± 0.06 ^b	1.14 ± 0.05 ^b
CH-2	48.51 ± 0.03 ^c	7.00 ± 0.06 ^c	8.73 ± 0.01 ^c	0.11 ± 0.03 ^c	-0.8 ± 0.06 ^b	0.02 ± 0.01 ^c	0.33 ± 0.04 ^c

注:同列不同小写字母表示为显著差异($P<0.05$)。

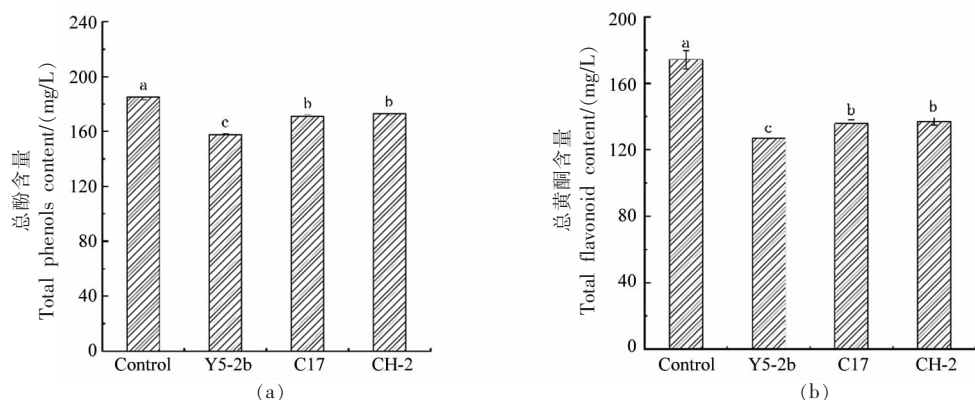
Y5-2b 发酵后呈现最为肉眼可辨的颜色变化。

2.3 雪花梨汁发酵前、后总酚和总黄酮含量变化

酚类物质对人类健康具有重要的作用,也有助于食品的颜色、风味和涩味,且长期食用富含酚类化合物的食品能够预防糖尿病、心血管疾病、骨质疏松等疾病^[30]。不同乳酸菌发酵梨汁 20 h 前后的总酚含量变化如图 2a 所示,未发酵梨汁的总酚含量在 190 mg/L 左右,而发酵后其含量呈现不同程度的下降,这与发酵果汁^[31]、植物乳杆菌发酵陈皮柑饮料^[32]和嗜酸乳杆菌发酵梨汁^[33]的变化趋势相一致。原因可能是酚类物质的蛋白水解酶将其水解成更简单、可溶的酚类物质,而这些酚类物质更容易被吸收;此外还可能是由于乳酸菌代谢

酚类物质,促进自身的生长繁殖^[34]从而引起总酚含量降低。

发酵 20 h 前、后雪花梨汁的总黄酮含量变化如图 2b 所示,与发酵后梨汁的总酚含量变化相似,总黄酮含量也出现不同程度的下降。由于乳酸菌发酵过程中产生了大量的糖苷酶,可以水解异黄酮的糖苷键,从而使糖苷型异黄酮分离成游离型的异黄酮而导致其含量下降,这与罗汉果甘草复合发酵饮料的变化趋势相一致^[35]。而且微生物结构变化可导致代谢途径丰度的差异,从而引起总酚、总黄酮等化合物发生变化^[36]。结合图 2a 和 2b 的结果可知,发酵后梨汁的总酚和总黄酮含量均呈现下降的现象。



注:a, b, c 表示为总酚及总黄酮含量的显著差异 ($P < 0.05$)。

图 2 乳酸菌发酵梨汁前后的总酚(a)及总黄酮(b)含量变化

Fig.2 Changes of total phenol (a) and total flavonoid (b) contents before and after fermentation of pear juice by lactic acid bacteria

2.4 雪花梨汁发酵前、后酚类物质变化

酚类物质具有抗炎、抗氧化、化学预防和神经预防作用^[37]。对梨汁发酵 20 h 前后的部分酚类物质进行研究,表 3 所示为雪花梨汁发酵前后酚类物质的含量变化。其中,熊果苷、原儿茶酸、儿茶素、咖啡酸和芦丁是主要的酚类物质。CH-2 发酵降低了熊果苷含量,但 Y5-2b 和 C17 发酵对熊果苷含量没有显著影响;儿茶素含量在 C17 和 CH-2 发酵后差异显著,分别降低和增加了 25.32% 和 94.29%;此外,三菌发酵后芦丁含量均有不同程度的增加。由结果可知,在梨汁及发酵梨汁中均未发现大量的绿原酸含量,这与瑞士乳杆菌发酵梨汁结果相同^[37]。另外,原儿茶酸、咖啡酸等酚类成分

在雪花梨汁发酵前后也没有显著变化。其原因可能是酚类化合物的转化具有菌株依赖性,发酵过程中酚类物质的变化受菌株、基质、pH 值、温度及发酵时间的影响。结果表明,不同的乳酸菌发酵对梨汁中酚类物质的含量变化存在不同的影响。

2.5 雪花梨汁发酵前、后糖组分变化

梨汁中含有多种糖类物质(单糖、低聚糖和聚糖),它们都是乳酸菌生长过程中的主要营养成分。不同乳酸菌发酵 20 h 前后梨汁中糖含量的变化如表 4 所示:发酵初期,梨汁中的糖分别为果糖(50.61 mg/mL)、葡萄糖(63.30 mg/mL)和蔗糖(36.03 mg/mL);与对照组相比,不同乳酸菌发酵后梨汁中其三者含量均显著降低。其中,发酵过程

中葡萄糖消耗最多, 利用率分别为 8.85%, 5.34% 和 5.29%; 其次为果糖和蔗糖。其原因是蔗糖在发酵过程中被逐渐降解为葡萄糖和果糖, 与此同时, 葡萄糖和果糖可作为乳酸菌的碳源被消耗利用, 且葡萄糖和果糖的消耗速度高于蔗糖的分解速度。因此, 梨汁在发酵后的葡萄糖、果糖和蔗糖含量均有所减少^[38]。此外, 不同乳酸菌对糖的消耗能力存在差异, 即 Y5-2b 对糖的消耗量最多, 乳酸菌能够利用简单的碳水化合物作为碳源和能源以维持生长, 发酵过程中活菌数的增加证明了这一观点; 且乳酸菌对糖的代谢能力因菌株而异, 会受到基质的类型及发酵时间的影响^[22]。

表 3 乳酸菌发酵梨汁的酚类物质含量变化 (mg/L)
Table 3 Phenolic content changes of pear juice fermented by lactic acid bacteria (mg/L)

	Control	Y5-2b	C17	CH-2
熊果苷	3.00 ± 0.12 ^a	2.99 ± 0.01 ^a	2.94 ± 0.02 ^a	2.71 ± 1.18 ^b
没食子酸	<0.12	<0.12	<0.12	<0.12
原儿茶酸	1.55 ± 0.10 ^a	1.60 ± 0.01 ^a	1.26 ± 0.01 ^a	1.57 ± 0.63 ^a
儿茶素	0.79 ± 0.07 ^b	0.79 ± 0.11 ^b	0.59 ± 0.01 ^c	1.45 ± 0.47 ^a
绿原酸	<0.12	<0.12	<0.12	<0.12
咖啡酸	0.26 ± 0.01 ^a	0.26 ± 0.00 ^a	0.21 ± 0.06 ^a	0.24 ± 0.10 ^a
表儿茶素	<0.12	<0.12	<0.12	<0.12
芦丁 m	0.17 ± 0.00 ^c	0.24 ± 0.02 ^{ab}	0.16 ± 0 ^{bc}	0.25 ± 0.09 ^a
槲皮素	<0.12	<0.12	<0.12	<0.12

注: 同行不同小写字母表示为显著差异 ($P<0.05$)。

表 4 乳酸菌发酵梨汁前后的糖含量变化 (mg/mL)
Table 4 Changes of sugar content before and after fermentation of pear juice by lactic acid bacteria (mg/mL)

	果糖	葡萄糖	蔗糖	乳糖	麦芽糖
Control	50.61 ± 0.22 ^a	63.30 ± 0.02 ^a	36.03 ± 0.06 ^a	<0.2	<0.2
Y5-2b	47.00 ± 0.08 ^b	57.70 ± 0.20 ^c	33.29 ± 0.09 ^b	<0.2	<0.2
C17	48.25 ± 0.94 ^b	59.92 ± 1.21 ^b	34.08 ± 0.92 ^b	<0.2	<0.2
CH-2	48.03 ± 0.53 ^b	59.95 ± 0.13 ^b	33.78 ± 0.37 ^b	<0.2	<0.2

注: 同列不同小写字母表示为显著差异 ($P<0.05$)。

2.6 雪花梨汁发酵前、后有机酸含量变化

不同乳酸菌发酵 20 h 前后梨汁的有机酸含量变化如表 5 所示: 发酵梨汁中主要的有机酸是乳酸、酒石酸、草酸、莽草酸、柠檬酸和苹果酸; 其中, Control 中未检测到乳酸, 但发酵后显著增加, 所以可以确定发酵后的乳酸含量高低是判断乳酸菌活性的依据。这与未发酵的饮料中没有测出乳酸, 而发酵后的橙汁牛奶饮料中乳酸浓度范围到达 104~137 g/L 的变化趋势相一致^[39]。另外, 发酵前后梨汁的苹果酸和柠檬酸变化明显。苹果酸在发酵开始时浓度为 118.42 mg/100 mL, 但在 Y5-2b 和 C17 发酵后的梨汁中未检出苹果酸, 而 CH-2 发酵的梨汁较 Control 组相比, 苹果酸含量没有明

显的减少, 即表明前两者能够代谢苹果酸, 而 CH-2 不能代谢苹果酸这一性质有关, 这与发酵火龙果汁后苹果酸被充分利用的结果相一致^[40]。研究表明, 发酵过程中苹果酸作为三羧酸循环的中间体, 参与多个不同的生化反应^[41]。如进行了苹果酸乳酸发酵, 乳酸菌将苹果酸转化为乳酸, 取代酸味和涩味, 赋予产品更加柔和的口感, 从而对发酵产品的感官性质产生积极的影响, 同时提高了发酵产品的微生物稳定性^[28]。此外, 雪花梨汁的初始柠檬酸浓度为 30.46 mg/100 mL, 发酵后柠檬酸含量分别下降了 33.65%, 42.97%, 38.71%, 与发酵过程中枸杞汁的柠檬酸含量减少现象一致^[24], 而柠檬酸可以被乳酸菌利用通过转运、裂解和丙酮酸代

谢生成乙偶姻、双乙酰和丁二醇等^[42]。由表 5 的结果可知，不同的乳酸菌发酵对梨汁的有机酸含量变化存在显著的差异,主要体现在苹果酸、乳酸、柠檬酸含量变化。

表 5 乳酸菌发酵梨汁前、后的有机酸含量变化(mg/100 mL)
Table 5 Changes of organic acid content before and after fermentation of pear juice
by lactic acid bacteria (mg/100 mL)

	草酸	酒石酸	苹果酸	莽草酸	乳酸	柠檬酸	富马酸
Control	31.08 ± 0.12 ^a	41.6 ± 1.21 ^a	118.42 ± 14.48 ^a	17.84 ± 0.13 ^a	—	30.46 ± 2.41 ^a	0.46 ± 0.04 ^b
Y5-2b	30.06 ± 0.78 ^{ab}	41.06 ± 4.14 ^a	—	17.27 ± 0.04 ^b	643.05 ± 0.80 ^a	20.21 ± 2.71 ^b	—
C17	29.93 ± 0.39 ^{ab}	38.99 ± 2.50 ^a	—	16.89 ± 0.16 ^c	445.24 ± 7.23 ^b	17.37 ± 3.62 ^b	—
CH-2	29.57 ± 0.42 ^b	36.68 ± 2.72 ^a	116.11 ± 2.57 ^a	16.86 ± 0.11 ^c	157.68 ± 37.02 ^c	18.67 ± 0.65 ^b	3.58 ± 0.21 ^a

注:同列不同小写字母表示为显著差异(P<0.05)。

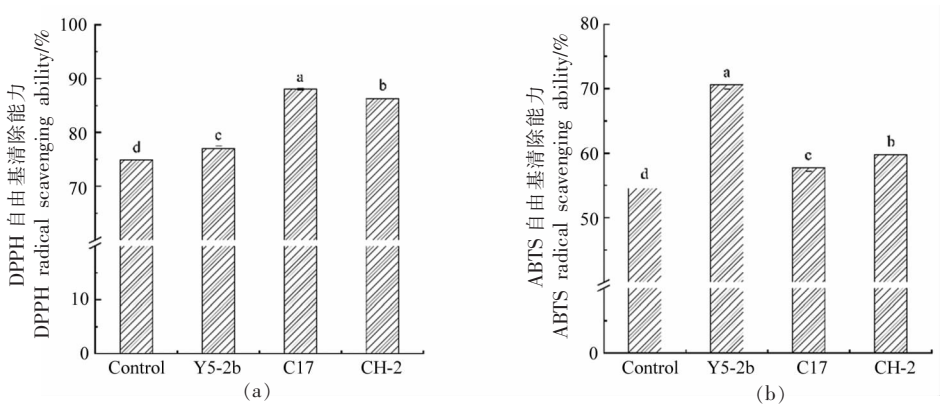
2.7 雪花梨汁发酵前、后抗氧化能力的变化

氧化应激与人类的抗衰老相关的疾病、代谢综合征的起始和进展等相关疾病起重要的作用^[43]。果蔬中的酚类化合物、黄酮类化合物等物质发挥抗氧化活性、防止氧化损伤,即在维持氧化平衡上发挥了至关重要的作用,且微生物的发酵作用可以改变果蔬的抗氧化能力。图 3 为发酵 20 h 前后雪花梨汁的抗氧化活性的变化:发酵能显著提高梨汁的 DPPH 和 ABTS 自由基的清除活性。

其中,C17 发酵后的梨汁 DPPH 的清除活性最高,其次是 CH-2 和 Y5-2b,分别为 88.07%,86.27%和 76.97%。虽然,梨被认为属于低抗氧化性水果,但在本研究中,各组别梨汁的 DPPH 自由基清除活性都较高(75%~88%),表明梨汁具有良好的自由基抑制潜力^[33]。抗氧化能力增加可能与

果汁发酵过程中的活性物质变化和乳酸菌代谢产物相关,如发酵产生的有机酸及酚类物质的释放和转化可能是发酵梨汁 DPPH 自由基清除能力提高的原因^[21]。

由图 3b 可知,不同乳酸菌发酵后梨汁的 ABTS 自由基清除能力较未发酵梨汁相比均显著提高,其中,Y5-2b 发酵后的 ABTS 自由基清除能力最高。与本研究结果变化趋势一致,复合蔬菜酵素发酵后 ABTS 阳离子自由基清除能力增强^[44]以及 10 株乳酸菌发酵均能显著提高台湾红藜 ABTS 的自由基清除活性^[45]。这一现象与发酵过程中总酚类物质、黄酮类物质和有机酸等物质的含量变化有关^[46];此外,自由基清除活性与酚类化合物的结构构象也有关^[47]。



注: a, b, c, d 表示为 DPPH 自由基清除能力及 ABTS 自由基清除能力的显著差异 (P<0.05)。

图 3 乳酸菌发酵梨汁的 DPPH 自由基清除能力(a)和 ABTS 自由基清除能力(b)

Fig.3 DPPH free radical scavenging activity (a) and ABTS free radical scavenging activity (b) of pear juice fermented by lactic acid bacteria

2.8 雪梨梨汁发酵前、后挥发性风味物质变化

乳酸菌发酵过程中代谢糖、蛋白质及其它营养物质,生成挥发性风味物质和非挥发性滋味物质,从而能够改变果蔬汁的风味组成^[48]。香味是决定加工食品能否成功的关键,乳酸菌发酵后的果汁,其理想风味物质的种类和含量增加,且不理想的风味物质含量减少^[49]。图 4 显示发酵雪梨梨汁挥发性风味物质的层次聚类分析。梨汁中挥发性风味物质共检测出 44 种,包括 2 种酯类,7 种醇类,9 种酮类,8 种醛类,7 种酸类,11 种其它类。与 Control 相比,3 种不同种乳酸菌发酵梨汁的挥发性风味物质存在差异。研究发现共有 20 种与果汁有关的化合物。分别是芳樟醇、苯乙醇、3-羟基-2-丁酮、二异丁基酮、2-庚酮、4-甲基-2-戊酮、2-己烯醛、2-甲基丁醛、正丁醛、正己醛、正辛醛、丁酸、异丁酸、己酸、3-甲基戊酸、乙酸乙酯、异戊酸甲酯、苯乙烯、2-正戊基呋喃、2-甲基吡嗪。结果表明,3-羟基-2-丁酮(奶油味)、二异丁基酮(果香)、2-己烯醛(果香)、2-甲基丁醛(甜味、果香)、正丁醛(果香)、正己醛(青草、果香)、正辛醛(茉莉)、丁酸(果香)、在发酵后含量均显著增加;异丁酸(刺激性气味)、丙酸(汗臭味)含量均显著降低。不同组别梨汁的挥发性风味物质含量不同,样品明显聚集在不同的类群中。Control 组的挥发性风味物质被聚类为一组,具有较高比例的是 2-己酮、4,5-二甲基-1,3-二氧杂环戊烯-2-酮、异戊酸甲酯(药草和果香)、异戊酸(有令人不愉快的酸败气味)、2-庚酮(花香、果香)、丙酸(刺激性气味)、3-戊酮。CH-2 组的特征是部分挥发性风味物质在发酵后增加,包括醇类和醛类,具有甜、脂肪、草本、花和果味^[50]。Y5-2b 组的挥发性风味物质与 Control 相比,酸类和醛类增加,主要有 2-己烯醛、2-甲基丁醛、反式-2-戊烯醛、3-甲基戊酸、丁酸,这些物质都因产生糖、水果和草本植物的气味而赋予梨汁积极的风味。C17 组的挥发性风味物质主要是 2-正戊基呋喃、2-乙酰基-1-吡咯啉、糠醛、二异丁基酮、己酸。结果表明,不同乳酸菌发酵后的梨汁挥发性风味物质存在显著差异,乳酸菌发酵可以改善挥发性化合物的形成。

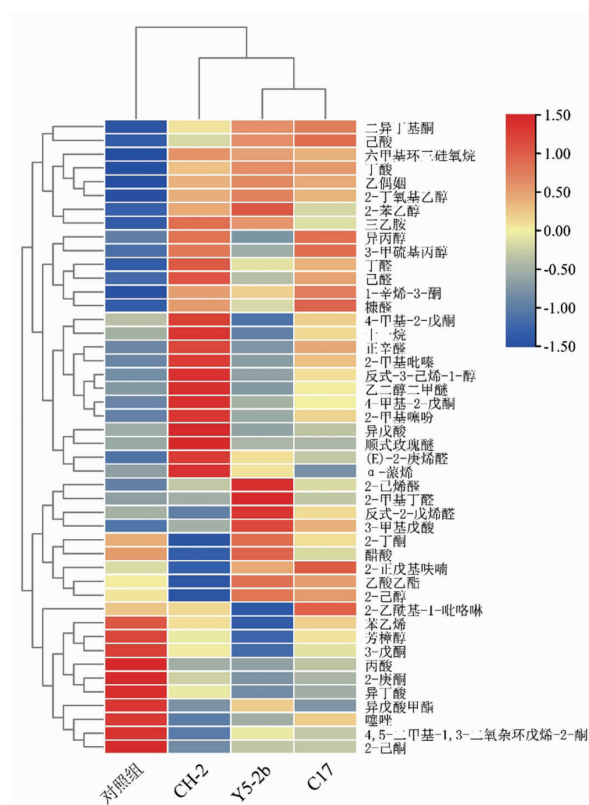


图 4 乳酸菌发酵梨汁的挥发性风味物质聚类热图分析

Fig.4 Cluster heat map analysis of volatile flavor compounds in pear juice fermented by lactic acid bacteria

3 结论

本研究选用 3 种乳酸菌进行雪梨梨汁的发酵,在 48 h 的发酵过程中,Y5-2b 和 C17 的生长性能优于 CH-2,在发酵 20 h 时生长趋于平缓;通过 pH、SSC、总糖及总酸含量变化证明 Y5-2b 在雪梨梨汁中更具发酵优势;其发酵梨汁的色差、糖和有机酸变化最具显著性差异。发酵后梨汁的总酚、总黄酮含量降低但抗氧化活性均升高;其中,DPPH 和 ABTS 自由基清除能力最高的分别为 C17 组和 Y5-2b 组。乳酸菌对梨汁的酚类物质含量具有显著影响,以熊果苷、儿茶素、芦丁含量变化为主。此外,共鉴定出 44 种香气成分,其中醛类、酮类和酸类等具有果香的特征风味物质含量在发酵后均有不同程度的增多,如 3-羟基-2-丁酮、正丁醛、丁酸等,赋予雪梨梨汁更浓郁的果香和花香。此研究为乳酸菌发酵梨汁的生产及进一步研究提供了理论依据。

参 考 文 献

- [1] KIM S, LEE J Y, JEONG Y, et al. Antioxidant activity and probiotic properties of Lactic acid bacteria[J]. *Fermentation*, 2022, 8(1): 29–29.
- [2] 张鑫, 刘光鹏, 宋焱, 等. 益生菌在发酵果蔬汁中的研究进展[J]. *中国果菜*, 2020, 40(9): 40–45.
ZHANG X, LIU G P, SONG Y, et al. Research progress on probiotics in fermented fruit and vegetable juice[J]. *China Fruit & Vegetable*, 2020, 40(9): 40–45.
- [3] SAGDIC O, OZTURK I, YAPAR N, et al. Diversity and probiotic potentials of lactic acid bacteria isolated from gilaburu, a traditional Turkish fermented European cranberrybush (*Viburnum opulus* L.) fruit drink[J]. *Food Research International*, 2014, 64: 537–545.
- [4] 解寒, 刘瑞山, 张晓娟, 等. 乳杆菌有机酸耐受性及发酵果蔬汁性能分析[J]. *食品科学*, 2022, 43(6): 149–157.
XIE H, LIU R S, ZHANG X J, et al. Tolerance of *Lactobacillus* to organic acids and their fermentation performances in fruit and vegetable juices[J]. *Food Science*, 2022, 43(6): 149–157.
- [5] 梁丽婷. 乳酸菌发酵猕猴桃及其面包的营养与风味特性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
LIANG L T. Study on the nutrition and flavor characteristics of Lactic acid bacteria fermented kiwifruit and its breads[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [6] 张秋霞, 何丹, 刘杨, 等. 雪花梨浓缩果汁的加工现状及展望[J]. *现代食品*, 2021(21): 22–25.
ZHANG Q X, HE D, LIU Y, et al. Current status and prospects of processing of snow juice in pear[J]. *Modern Food*, 2021(21): 22–25.
- [7] 焦媛媛, 杜丽平, 孙文, 等. 优良梨汁发酵乳酸菌的筛选与发酵性能分析[J]. *食品科学*, 2019, 40(2): 141–145.
JIAO Y Y, DU L P, SUN W, et al. Screening and fermentation characteristics of Lactic acid bacteria for fermentation of pear juice[J]. *Food Science*, 2019, 40(2): 141–145.
- [8] 马剑, 陈智玲, 张宏志, 等. 乳酸菌发酵梨汁过程中的品质变化及其抗氧化活性研究[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2021, 41(6): 123–128.
MA J, CHEN Z L, ZHANG H Z, et al. Study on quality change and antioxidant activity of pear juice fermented by Lactic acid bacteria[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2021, 41(6): 123–128.
- [9] 周平, 邓杰, 黄治国, 等. 雪花梨醋酿造工艺的研究[J]. *中国调味品*, 2017, 42(5): 72–79.
ZHOU P, DENG J, HUANG Z G, et al. Research on brewing technology of snow pear vinegar[J]. *China Condiment*, 2017, 42(5): 72–79.
- [10] 李丽梅, 冯云霄, 何近刚, 等. 不同酵母菌株对发酵雪花梨酒酚类物质和抗氧化能力的影响[J]. *食品科技*, 2019, 44(4): 7–11.
LI L M, FENG Y X, HE J G, et al. Effects of different strains of yeasts on phenols and antioxidant activity of Xuehua pear wines[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(4): 7–11.
- [11] 张松. 梨枸杞复合果汁加工工艺研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
ZHANG S. Study on processing technology of compound juice of pear and wolfberry[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2019.
- [12] WATTANAKUL N, MORAKUL S, LORJAROENPHON Y, et al. Integrative metabolomics–flavoromics to monitor dynamic changes of ‘Nam Dok Mai’ mango (*Mangifera indica* Linn) wine during fermentation and storage[J]. *Food Bioscience*, 2020, 35: 100549–100549.
- [13] DE OLIVEIRA P M, LEITE B R D, MARTINS E M F, et al. Mango and carrot mixed juice: a new matrix for the vehicle of probiotic *lactobacilli* [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2020, 58(1): 1–12.
- [14] CASTRO L M G, ALEXANDRE E M C, PINTADO M, et al. Bioactive compounds, pigments, antioxidant activity and antimicrobial activity of yellow prickly pear peels[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2019, 54(4): 1225–1231.
- [15] AUNG T, EUN J B. Production and characterization of a novel beverage from laver (*Porphyra dentata*) through fermentation with kombucha consortium[J]. *Food Chemistry*, 2021, 350: 129274–129274.
- [16] KAWA-RYGIELSKA J, ADAMENKO K, KUCHARSKA A Z, et al. Fruit and herbal meads–Chemical composition and antioxidant properties[J]. *Food Chemistry*, 2019, 283(1): 19–27.

- [17] ALBERTI A, DOS SANTOS T P M, ZIELINSKI A A F, et al. Impact on chemical profile in apple juice and cider made from unripe, ripe and senescent dessert varieties [J]. LWT—Food Science and Technology, 2016, 65(1): 436–443.
- [18] WEI J P, ZHANG Y X, YUAN Y H, et al. Characteristic fruit wine production via reciprocal selection of juice and non-*Saccharomyces* species [J]. Food Microbiology, 2019, 79: 66–74.
- [19] VILLARREAL-SOTO S A, BOUJILA J, PACE M, et al. Metabolome-microbiome signatures in the fermented beverage, Kombucha[J]. International Journal of Food Microbiology, 2020, 333: 108778.
- [20] 张卜升, 高杏, 闫昕, 等. 基于 GC-IMS 技术分析石榴果酒酿制过程中挥发性风味成分的变化[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(7): 252–257.
- ZHANG B S, GAO X, YAN X, et al. The changes of volatile flavor components during the brewing process of pomegranate wine based on GC-IMS[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(7): 252–257.
- [21] 王越, 赵文谨, 谢云飞, 等. 强化发酵对诺丽果成分的影响及抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(15): 143–149, 157.
- WANG Y, ZHAO W J, XIE Y F, et al. Effects of intensified fermentation on the components of Noni fruit and its antioxidant activity [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(15): 143–149, 157.
- [22] HASHEMI S M B, JAFARPOUR D. Fermentation of bergamot juice with *Lactobacillus plantarum* strains in pure and mixed fermentations: Chemical composition, antioxidant activity and sensorial properties[J]. LWT—Food Science and Technology, 2020, 131(1): 109803.
- [23] 高小鹏, 何猛超, 许可, 等. 工业微生物发酵过程中 pH 调控研究进展[J]. 中国生物工程杂志, 2020, 40(6): 93–99.
- GAO X P, HE M C, XU K, et al. Research progress on pH regulation in the process of industrial microbial fermentation [J]. China Biotechnology, 2020, 40(6): 93–99.
- [24] PEREIRA A L F, FEITOSA W S C, ABREU V K G, et al. Impact of fermentation conditions on the quality and sensory properties of a probiotic cupuassu (*Theobroma grandiflorum*) beverage[J]. Food Research International, 2017, 100(P1): 603–611.
- [25] KAPRASOB R, KERDCHOECHUEN O, LAOHAKUNJIT N, et al. Fermentation-based biotransformation of bioactive phenolics and volatile compounds from cashew apple juice by select lactic acid bacteria[J]. Process Biochemistry, 2017, 59: 141–149.
- [26] QUINES-LAGMAY V C, JEONG B G, KERR W L, et al. Antioxidative properties of eastern prickly pear (*Opuntia humifusa*) fermented with lactic acid bacteria and cell wall-hydrolyzing enzymes[J]. LWT—Food Science and Technology, 2020, 122 (C): 109029–109029.
- [27] 卢嘉懿, 李汴生, 阮征. 乳酸菌发酵对梨汁的护色作用[J]. 现代食品科技, 2019, 35(3): 148–153, 45.
- LU J Y, LI B S, RUAN Z. Color protection of pear juice via lactic acid bacteria fermentation[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(3): 148–153, 45.
- [28] GERARDI C, TRISTEZZA M, GIORDANO L, et al. Exploitation of *Prunus mahaleb* fruit by fermentation with selected strains of *Lactobacillus plantarum* and *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Food Microbiology, 2019, 84(C): 103262.
- [29] LI X Y, GAO J, SANG Y X, et al. Effect of fermentation by *Lactobacillus acidophilus* CH-2 on the enzymatic browning of pear juice[J]. LWT—Food Science and Technology, 2021, 147(2): 111489.
- [30] RODRIGUEZ L G R, GASGA V M Z, PESCUA M, et al. Fruits and fruit by-products as sources of bioactive compounds. Benefits and trends of lactic acid fermentation in the development of novel fruit-based functional beverages[J]. Food Research International, 2020, 140: 109854.
- [31] RANDAZZO W, CORONA O, GUARCELLO R, et al. Development of new non-dairy beverages from Mediterranean fruit juices fermented with water kefir microorganisms[J]. Food Microbiology, 2016, 54(1): 40–51.
- [32] 陈亚楠, 汪云阳, 王德行, 等. 植物乳杆菌发酵陈皮柑饮料的工艺优化与分析[J]. 饮料工业, 2019, 22(5): 28–34.
- CHEN Y N, WANG Y Y, WANG D X, et al. Optimization and analysis of Chenpi citrus beverage fermented by *Lactobacillus plantarum*[J]. The Bever-

- age Industry, 2019, 22(5): 28–34.
- [33] ANKOLEKAR C, PINTO M, GREENE D, et al. *In vitro* bioassay based screening of antihyperglycemia and antihypertensive activities of *Lactobacillus acidophilus* fermented pear juice[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2012, 13: 221–230.
- [34] WANG X W, HAN M Z, ZHANG M N, et al. *In vitro* evaluation of the hypoglycemic properties of lactic acid bacteria and its fermentation adaptability in apple juice[J]. LWT–Food Science and Technology, 2021, 136(P2): 110363.
- [35] 张小凤. 罗汉果甘草复合发酵饮料的研制[D]. 扬州: 扬州大学, 2020.
- ZHANG X F. Development of compound fermented beverage of *Siraitia grosvenorii* and licorice [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020.
- [36] ZHANG L, LIU S X, CHEN Y, et al. Metatranscriptomic approach reveals the functional and enzyme dynamics of core microbes during noni fruit fermentation[J]. Food Research International, 2020, 141: 109999.
- [37] SARKAR D, ANKOLEKAR C, PINTO M, et al. Dietary functional benefits of Bartlett and Starkrimson pears for potential management of hyperglycemia, hypertension and ulcer bacteria *Helicobacter pylori* while supporting beneficial probiotic bacterial response[J]. Food Research International, 2015, 69 (1): 80–90.
- [38] YANG X X, ZHOU J C, FAN L Q, et al. Antioxidant properties of a vegetable–fruit beverage fermented with two *Lactobacillus plantarum* strains[J]. Food Science and Biotechnology, 2018, 27 (6): 1719–1726.
- [39] DE LA FUENTE B, LUZ C, PUCHOL C, et al. Evaluation of fermentation assisted by *Lactobacillus brevis* POM, and *Lactobacillus plantarum* (TR–7, TR–71, TR–14) on antioxidant compounds and organic acids of an orange juice–milk based beverage [J]. Food Chemistry, 2020, 343(6): 128414.
- [40] MUHIALDIN B J, KADUM H, ZAREI M, et al. Effects of metabolite changes during lacto–fermentation on the biological activity and consumer acceptability for dragon fruit juice[J]. LWT–Food Science and Technology, 2020, 121(C): 108992–108992.
- [41] 李维妮, 张宇翔, 魏建平, 等. 益生菌发酵苹果汁工艺优化及有机酸的变化[J]. 食品科学, 2017, 38 (22): 80–87.
- LI W N, ZHANG Y X, WEI J P, et al. Optimization of fermentation of apple juice by probiotics and organic acids evolution during fermentation[J]. Food Science, 2017, 38(22): 80–87.
- [42] 王金玲, 晏雨辰, 李巧月, 等. 生物降解柠檬酸及其影响因素的研究进展[J]. 现代食品科技, 2022, 38(2): 347–357, 312.
- WANG J L, YAN Y C, LI Q Y, et al. Research progress of biodegradable citric acid and its influencing factors[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(2): 347–357, 312.
- [43] VERON H E, CANO P G, FABERSANI E, et al. Cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) juice fermented with autochthonous *Lactobacillus plantarum* S–811[J]. Food & Function, 2019, 10(2): 1085–1097.
- [44] 余思洁, 李洪军, 李少博, 等. 复合蔬菜酵素发酵、后熟过程中理化特性及抗氧化活性的变化研究[J/OL]. 食品与发酵工业, 2022, 48(13): 115–122.
- YU S J, LI H J, LI S B, et al. The physico–chemical properties and antioxidant activity of compound vegetable Jiaosu during fermentation and post–ripening[J/OL]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(13): 115–122.
- [45] KUO H C, KWONG H K, CHEN H Y, et al. Enhanced antioxidant activity of *Chenopodium formosanum* Koidz. by lactic acid bacteria: Optimization of fermentation conditions[J]. PloS One, 2021, 16(5): e0249250.
- [46] 岑敏连, 陈阵, 黄俊, 等. 酿酒酵母发酵混合果汁的功能性研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(22): 109–113, 119.
- CEN M L, CHEN Z, HUANG J, et al. Research on the function of mixed fermented juice by *Saccharomyces cerevisiae* KD[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(22): 109–113, 119.
- [47] JANG H D, CHANG K S, CHANG T C, et al. Antioxidant potentials of buntan pumelo (*Citrus grandis* Osbeck) and its ethanolic and acetified fermentation products[J]. Food Chemistry, 2010, 118 (3): 554–558.
- [48] 李汴生, 卢嘉懿, 阮征. 植物乳杆菌发酵不同果蔬汁风味品质研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 293–299.
- LI B S, LU J Y, RUAN Z. Favor quality of differ-

- ent fruit and vegetable juices fermented by *Lactobacillus plantarum* [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(19): 293–299.
- [49] 尹蓉, 陶玲, 霍辰思, 等. 益生菌发酵果汁的研究概况[J]. 食品工业, 2021, 42(5): 303–306.
- YIN R, TAO L, HUO C S, et al. An overview of probiotic fermented fruit juice[J]. The Food Industry, 2021, 42(5): 303–306.
- [50] GAO H, WEN J J, HU J L, et al. *Momordica charantia* juice with *Lactobacillus plantarum* fermentation: Chemical composition, antioxidant properties and aroma profile [J]. Food Bioscience, 2019, 29(5): 62–72.

Effects of Different Lactic Acid Bacteria Fermentation on Nutrient Composition, Antioxidant Activity and Volatile Flavor Substances of Snow Pear Juice

Wu Jiangna¹, Wei Guanmian¹, Mao Na¹, Tian Guifang¹, Gao Jie¹, Li Fukuan^{2*}, Sang Yaxin^{1*}

(¹College of Food Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei

²Zhangjiakou Chongli District Market Supervision Bureau, Zhangjiakou 076350, Hebei)

Abstract In order to improve the antioxidant activity and flavor of snow pear juice, pear juice was fermented with *Lactobacillus casei* Y5–2b, *Lactobacillus plantarum* C17 and *Lactobacillus acidophilus* CH–2, respectively. Physicochemical properties and antioxidant activities were characterized. And high-performance liquid chromatography and gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC–IMS) was applied to analyze the nutrients and aroma components. Results showed that the three strains had good growth and metabolism in pear juice. Moreover, the proliferation metabolism of Y5–2b and C17 showed better performance, with a stable number of viable bacteria reaching 9.0 lg CFU/mL at 20 hours. The antioxidant activity of fermented pear juice increased significantly ($P < 0.05$). The sugar content decreased, with glucose being the most consumed and the utilization rate ranging from 5.29% to 8.85%. Partial organic acid content showed a decrease, with no malic acid detected in groups Y5–2b and C17. There was no significant difference in malic acid content between the CH–2 group and the unfermented group (118 mg/100 mL), and the citric acid content decreased by 33.65%, 42.97%, and 38.71% respectively after fermentation. Different lactic acid bacteria fermentation had different effects on the content of phenols in pear juice, mainly arbutin, catechin and rutin. A total of 44 aroma components were identified from juice samples, of which 3-hydroxy-2-butanone, n-butyraldehyde, butyric acid and other characteristic flavor substances with fruit aroma increased in varying degrees after fermentation. In conclusion, lactic acid bacteria endowed the pear juice with abundant substances, flavor and high antioxidant activity, which provides a certain theoretical basis for lactic acid bacteria fermentation of pear juice.

Keywords lactic acid bacteria; fermented pear juice; nutritional composition; antioxidant; aroma component