

杜晓仪, 杨继国, 徐玉娟, 等. 不同益生菌对三华李发酵果汁品质及其体外消化特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(2): 143–151. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030214

DU Xiaoyi, YANG Jiguo, XU Yujuan, et al. Effects of Different Probiotics on the Quality and *in Vitro* Digestion Characteristics of Fermented Sanhua Plum Juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(2): 143–151. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030214

· 生物工程 ·

不同益生菌对三华李发酵果汁品质及其体外消化特性的影响

杜晓仪^{1,2}, 杨继国², 徐玉娟¹, 吴继军¹, 余元善¹, 邹波¹, 彭健¹, 李璐^{1,*}

(1. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所/农业农村部功能食品重点实验室/广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610;

2. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510641)

摘要: 以肠膜明串珠菌 (*Leuconostoc mesenteroides*, LM)、发酵乳杆菌 (*Lactobacillus fermentum*, LF)、鼠李糖乳杆菌 (*Lactobacillus rhamnosus*, LR)、植物乳杆菌 (*Lactiplantibacillus plantarum*, LP) 为发酵菌株, 研究不同益生菌对三华李发酵果汁理化性质、活性成分、抗氧化能力和体外消化特性的影响规律。结果表明, 四种益生菌均能在三华李果汁中正常生长, 发酵结束后三华李果汁中的益生菌活菌数均在 $10^7 \sim 10^8$ CFU/mL 之间。发酵过程中 LF、LR 和 LP 均可消耗三华李果汁中的苹果酸, 并生成乳酸和乙酸, 降低了三华李果汁的酸度。四种益生菌发酵三华李果汁中, 经 LM 发酵的三华李果汁能够较好的保留果汁颜色, 且其具有更高的总酚、总花色苷及抗氧化水平, 其次为经 LP 发酵的三华李果汁。体外消化后, 四种益生菌发酵三华李果汁的活菌数、活性成分和抗氧化水平均呈不同程度的下降。然而, 经 LP 和 LR 发酵的三华李果汁消化结束后的益生菌活菌数、活性成分含量以及抗氧化活性的保留率均较高。综合分析可知, 经 LP 和 LR 发酵的三华李果汁不仅能够较好保留三华李果汁活性成分和抗氧化水平, 而且具有较好的消化耐受性。因此, LP 和 LR 可作为高品质三华李发酵果汁的潜在发酵剂, 为益生菌发酵三华李果汁的开发提供理论依据。

关键词: 益生菌, 三华李发酵果汁, 理化性质, 活性成分, 体外消化

中图分类号: TS255.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)02-0143-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030214



本文网刊:

Effects of Different Probiotics on the Quality and *in Vitro* Digestion Characteristics of Fermented Sanhua Plum Juice

DU Xiaoyi^{1,2}, YANG Jiguo², XU Yujuan¹, WU Jijun¹, YU Yuanshan¹, ZOU Bo¹, PENG Jian¹, LI Lu^{1,*}

(1. Sericultural & Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China;

2. School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The effects of *Leuconostoc mesenteroides* (LM), *Lactobacillus fermentum* (LF), *Lactobacillus rhamnosus* (LR) and *Lactiplantibacillus plantarum* (LP) on the physicochemical properties, active ingredients, antioxidant capacity and *in vitro* digestion characteristics of fermented Sanhua plum juice were investigated. Results showed that all the four probiotics were able to grow normally in the Sanhua plum juice, and the viable probiotic count of fermented Sanhua plum juice was

收稿日期: 2023-03-21

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目 (2022B0202050002); “十四五”广东省农业科技创新十大主攻方向“揭榜挂帅”项目 (2022SDZG04); 茂名市科技计划项目 (2021S0077); 广东省现代农业产业技术体系优稀水果创新团队项目 (2023KJ116); 广东省农业科学院学科团队建设项目 (202109TD); 科技创新战略专项资金 (高水平农科院建设)-青年导师项目 (R2020QD-032, R2020QD-033)。

作者简介: 杜晓仪 (1998-), 女, 硕士, 研究方向: 食品发酵, E-mail: 3050922427@qq.com。

*** 通信作者:** 李璐 (1990-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 食品微生物, E-mail: lilu045@163.com。

$10^7 \sim 10^8$ CFU/mL after fermentation. During the fermentation, LF, LR and LP consumed the malic acid in Sanhua plum juice and produced lactic acid and acetic acid, which reduced the acidity of the Sanhua plum juice. Among the four probiotic fermented Sanhua plum juices, the juice fermented by LM could better retain its color and had higher levels of total phenols, total anthocyanins and antioxidant ability, followed by the juice fermented by LP. After *in vitro* digestion, the viable probiotic count, active ingredients contents and antioxidant capacity of fermented Sanhua plum juices were all decreased in different degrees. However, the juices fermented by LP and LR showed higher retention of viable probiotic, active ingredients and antioxidant activity at the end of digestion. Above results indicated that the Sanhua plum juices fermented by LP and LR not only had better retention of active ingredients and antioxidant levels, but also had better digestive tolerance. Therefore, LP and LR could be used as potential fermenting agents for high-quality fermented Sanhua plum juice, providing a theoretical basis for the development of Sanhua plum juice fermented by probiotic.

Key words: probiotics; fermented Sanhua plum juice; physicochemical property; active ingredient; *in vitro* digestion

益生菌是能够定殖在人体内,并对宿主有益的活性微生物。益生菌与人体健康息息相关。当人体内的益生菌达到一定数量时,能够起到维持肠道微生物平衡、调节免疫及辅助降血脂等生理功效^[1]。通过饮食来补充益生菌是目前最常见的方式之一。近年来,益生菌发酵成为一种新兴的食品加工方式,已在食品领域广泛应用。随着消费者对具有促进健康和预防疾病作用食品的需求量显著增加,益生菌发酵饮品已占据功能性饮料市场的绝大部分。目前,益生菌发酵通常多应用于乳制品加工中。然而,由于乳糖不耐症、乳蛋白过敏、半乳糖血症和高胆固醇血症的影响,越来越多的人不能或避免使用乳制品。因此,开发新型益生菌发酵基质引起了研究人员的关注。果汁具有丰富的营养物质,是益生菌生长的优良基质。相较于发酵乳制品,益生菌发酵果汁具有低胆固醇和低过敏原的特点。此外,其具备独特的水果风味,深受消费者喜爱。

三华李(*Prunus salicina* Lindl. cv. Sanhua)是一种岭南特色水果,香气浓郁,因其富含花青素等抗氧化物质而备受科研工作者的关注。研究表明,三华李总多酚含量显著高于荔枝、杨梅、柑橘等水果,并能够在消化后仍保留有较高的抗氧化活性^[2]。然而,三华李货架期短,鲜食时口感极酸,将三华李加工成益生菌发酵果汁无疑可拓宽三华李的销售渠道。目前,用于发酵果汁的益生菌多为乳酸菌,如植物乳杆菌(*Lactiplantibacillus plantarum*)(LP)、鼠李糖乳杆菌(*Lactobacillus rhamnosus*)(LR)和发酵乳杆菌(*Lactobacillus fermentum*)(LF)^[3-5]等是果汁发酵中常用的益生菌。果汁经益生菌发酵可生成多种生物活性物质,从而改善和提升发酵果汁产品的品质^[6]。此外,有研究表明,肠膜明串珠菌(*Leuconostoc mesenteroides*)(LM)发酵荔枝汁的感官评分要高于植物乳杆菌发酵^[7],且在贮藏过程中对果汁中的病原菌有极好的抑制效果^[8]。然而,至今尚未见有关益生菌发酵三华李果汁的报道。

因此,本研究选用 LM、LF、LR 和 LP 四种常见益生菌对三华李果汁进行发酵。探究不同益生菌对发酵三华李果汁(fermented Sanhua plum juice,

FSPJ)理化性质、活性物质和抗氧化活性的影响规律及其体外消化过程中益生菌活菌数、总酚、总黄酮、总花色苷含量和抗氧化活性的变化规律,旨在丰富三华李的加工技术和产品种类。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

三华李 产地广东省信宜市,采摘后的三华李放置后熟,榨汁备用;肠膜明串珠菌 Y109、发酵乳杆菌 E324、植物乳杆菌 GMC1.6655、鼠李糖乳杆菌 MNP1.0996 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所;MRS 肉汤培养基、技术琼脂粉、MRS 培养基 广东环凯微生物科技有限公司;复合果胶酶(30000 U/mL) 睿丹生物科技有限公司;高温- α -淀粉酶(1500 U/mL)、胃蛋白酶(25000 U/mL)、胰蛋白酶(800 U/mL)、猪胆盐、芦丁、草酸、酒石酸、苹果酸、乳酸、乙酸 均为色谱纯,上海源叶生物科技有限公司;模拟消化液(模拟唾液、模拟胃液、模拟肠液) 实验室自行配制。

PBJ-GO1E 型破壁料理机 江门市贝尔斯顿电器有限公司;AP-55 数显糖度计 衢州艾普计量仪器有限公司;D3024R 台式高速冷冻离心机 美国赛洛捷克 SCILOGEX 公司;SW-CJ-2FD 型洁净工作台 苏净集团苏州安泰空气技术有限公司;MJX-250-Z 型生化培养箱 上海博讯事业有限公司医疗设备厂;PB-10 型 pH 计 德国 Sartorius 公司;YXQ-LS-50SII 型立式压力蒸汽灭菌器 上海博迅实业有限公司医疗设备厂;HH-2 型数显恒温水浴锅 常州金坛精达仪器制造有限公司;P9PC 型双光束紫外可见分光光度计 上海美谱达仪器有限公司;ZQZY-88BV 型振荡培养箱 上海知楚仪器有限公司;LC-20AT 高效液相色谱仪 日本岛津公司;Ultra Scan VIS 型全自动色差仪 美国 Hunter Lab 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 三华李发酵果汁制备工艺流程 参照高畅等^[9]的方法制备三华李发酵果汁,稍作修改:新鲜三华李→洗净→去核→打浆→酶解→过滤→离心→pH 调整→糖度调整→灭菌→接种发酵→三华李益生菌发酵果汁。

1.2.2 操作要点 应挑选外形良好、成熟度适中的三华李果实制备澄清三华李果汁;三华李打浆后添加 0.05% 复合果胶酶 45 ℃ 酶解 1.5 h;经酶解的三华李果浆用 200 目纱布过滤后,过滤得到的三华李浊汁 5000 r/min 离心 10 min 得三华李清汁;通过饱和 Na_2CO_3 溶液和外源添加葡萄糖将果汁 pH 和糖度分别调整为 pH5.0 和 $13.50^\circ\text{Brix} \pm 0.50^\circ\text{Brix}$;经 pH 和糖度调整的三华李果汁 90 ℃ 灭菌 10 min;将四种不同益生菌 LM、LF、LR、LP 接种于灭菌 MRS 肉汤培养基中,37 ℃,200 r/min 摇床培养 6 h 后按 3%(以三华李果汁质量计)的比例分别接种于三华李果汁中 37 ℃,200 r/min 摇床发酵 48 h,分别得到肠膜明乳杆菌发酵三华李果汁(FSPJLM)、发酵乳杆菌发酵三华李果汁(FSPJLF)、鼠李糖乳杆菌发酵三华李果汁(FSPJLR)、植物乳杆菌发酵三华李果汁(FSPJLP);以未接种发酵的三华李果汁(37 ℃,200 r/min,48 h)作为本次实验的空白组(control group, CG)。

1.2.3 活菌数的测定 益生菌活菌数参考国标 GB 4789.35-2016 进行测定。通过平板计数法确定三华李果汁发酵 48 h 后和体外消化过程中(经口消化,经胃消化和经肠消化后)的益生菌活菌数量。

1.2.4 理化指标的测定

1.2.4.1 pH、可滴定酸及可溶性固形物的测定 使用 pH 计对三华李果汁样品的 pH 进行测定;可滴定酸的测定采用 GB 12456-2021 中酸碱滴定法的 pH 计电位滴定法;三华李果汁样品的可溶性固形物的测定使用 AP-55 数显糖度计进行测定。

1.2.4.2 色度值的测定 使用 Ultra Scan VIS 型全自动色差仪对三华李益生菌发酵果汁样品的色度值进行测定。将果汁置于无色透明的比色皿中测定果汁样品的 L^* 值、 a^* 值和 b^* 值。以色度角 $Hue(h = \tan^{-1}(b^*/a^*))$ 和总色差 $\Delta E(\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2})$ 表示果汁的色度变化^[10]。

1.2.4.3 有机酸组分的测定 参照 Wu 等^[11] 的测定方法。高效液相色谱条件: C_{18} 色谱柱(4.6 mm×250 mm, 5 μm)。流动相为 0.1 mol/L $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 溶液,并用磷酸调节至 pH2.5,柱温 30 ℃,检测器为二极管阵列检测器(PDA),检测波长为 210 nm,进样量 10 μL 。采用外标法定量。

标准曲线: 分别用纯净水溶解配制不同质量浓度的草酸、酒石酸、苹果酸、乳酸和乙酸,经 0.22 μm 的微孔滤膜过滤后进行 HPLC 分析,得到峰面积(x)和有机酸质量浓度(y)的标准曲线。

样品处理: 三华李果汁样品以 1:2 的比例加入 0.3% 偏磷酸超声提取(400 W, 15 min),过 0.22 μm 滤膜上机测定。

1.2.5 总酚、总黄酮及总花色苷含量的测定 采用 Folin-Ciocalteu 比色法测定三华李果汁样品中的总

酚含量^[12] 稍作修改。将果汁样品稀释 50 倍,取果汁样品稀释液 1 mL,加入 2 mL 10% 福林酚试剂,充分混匀后加入 2 mL 10% Na_2CO_3 溶液,常温避光反应 1 h 后,在 760 nm 处测定其吸光度。结果以没食子酸当量(mg GAE/L)表示。

采用 $\text{NaNO}_2\text{-Al}(\text{NO}_3)_3$ 分光光度法测定样品中黄酮的含量^[13] 稍作修改。将果汁样品稀释 20 倍,取三华李发酵果汁样品稀释液 3 mL,加入 0.5 mL 5% NaNO_2 ,0.5 mL 10% $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$,静置 6 min,加入 2 mL 1 mol/L NaOH,振荡混匀后 45 ℃ 水浴 10 min 冷却,505 nm 测定其吸光值。结果以芦丁当量(mg RE/L)表示。

总花色苷含量的测定及缓冲溶液的配制参考 William 等^[14] 的方法并稍作修改。取三华李果汁样品 1 mL,分别加入 9 mL pH1.0 缓冲溶液和 9 mL pH4.5 缓冲溶液,45 ℃ 平衡 50 min,分别于 510 nm 和 700 nm 下测定样品在两种缓冲液下的吸光度值。总花色苷含量的测定结果以矢车菊素-3-O-葡萄糖苷当量(mg/L)表示,计算公式为:

$$\text{总花色苷含量(mg/L)} = (A \times \text{MW} \times \text{DF} \times 10^3) / (\epsilon \times L)$$

式中, $A = (A_{510} - A_{700})_{\text{pH}1.0} - (A_{510} - A_{700})_{\text{pH}4.5}$; MW 为矢车菊素-3-O-葡萄糖苷分子量; DF 为稀释倍数; ϵ 为摩尔消光系数; L 为光程。

总酚、总黄酮、总花色苷的含量测定以相同处理未接菌发酵的三华李果汁作为对照组。体外消化过程中的总酚、总黄酮及总花色苷最终含量为对照组和样品组减去模拟唾液、模拟胃液和模拟肠液(用蒸馏水代替三华李发酵果汁制备)之后的测定值。

1.2.6 抗氧化活性的测定

1.2.6.1 DPPH 自由基清除活性的测定 根据 Wang 等^[3] 报道方法测定 DPPH 自由基清除率并稍作修改。将三华李发酵果汁样品稀释 25 倍,取 1 mL 样品稀释液添加到 5 mL DPPH 乙醇溶液(0.13 mmol/L)中,避光反应 20 min 后在 517 nm 处测吸光度。以蒸馏水代替样品稀释液为空白组,测定结果表示为 DPPH 自由清除百分比,其结果计算如下: $\text{DPPH 清除率}(\%) = (A_{\text{空白}} - A_{\text{样品}}) \times 100 / A_{\text{空白}}$ 。

1.2.6.2 铁离子还原能力的测定 铁离子还原能力采用鞠葛金悦等^[15] 报道的方法测定,三华李发酵果汁样品稀释 30 倍。测定结果用 Trolox 当量(g TE/L)表示。抗氧化能力的测定以相同处理未接菌发酵的三华李果汁作为对照组。体外消化过程中的最终抗氧化能力的测定为对照组和样品组减去模拟唾液、模拟胃液和模拟肠液(用蒸馏水代替三华李发酵果汁制备)之后的测定值。

1.2.7 体外模拟消化 体外模拟消化过程及模拟消化液配制方法采用 Minekus 等^[16] 的方法。经口消化阶段,分别将 5 mL CG、FSPJLM、FSPJLF、FSPJLR 和 FSPJLP 加入到 5 mL 模拟唾液中,37 ℃,100 r/min

摇床孵育 2 min; 经胃阶段, 分别将 5 mL CG、FSPJLM、FSPJLF、FSPJLR 和 FSPJLP 的经口消化液加入到 5 mL 模拟胃液中, 使用 0.6 mol/L HCl 溶液分别将其 pH 调整为 3.0 后, 在 37 ℃, 100 r/min 摇床孵育 2 h; 经肠阶段, 将 5 mL CG、FSPJLM、FSPJLF、FSPJLR 和 FSPJLP 的经胃消化液加入到 5 mL 模拟肠液中, 使用 1 mol/L NaOH 溶液将分别将其 pH 调整为 7.0 后, 在 37 ℃, 100 r/min 摇床孵育 2 h。分别在消化开始前和各个消化阶段结束后进行益生菌活菌计数和取样, 并将取得的样品立即置于液氮中快速冷冻后于 -80 ℃ 进行保存。

1.3 数据处理

实验设置三个平行, 数据均以平均值±标准差表示, 通过 SPSS statistics 27.0 软件中的邓肯检验进行显著性分析, $P<0.05$ 表示差异显著, 采用 OriginPro 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同益生菌对三华李发酵果汁中益生菌活菌数和可溶性固形物的影响

利用果汁发酵中常用的益生菌 LM、LF、LR 和 LP 对三华李果汁进行 48 h 发酵, 四种益生菌发酵三华李果汁中的益生菌活菌数均处于 $10^7 \sim 10^8$ CFU/mL 之间 (图 1A)。其中, FSPJLR、FSPJLF 和 FSPJLM 果汁中的益生菌活菌数呈递减趋势, 而益生菌活菌数越多的三华李发酵果汁中的可溶性固形物含量越小

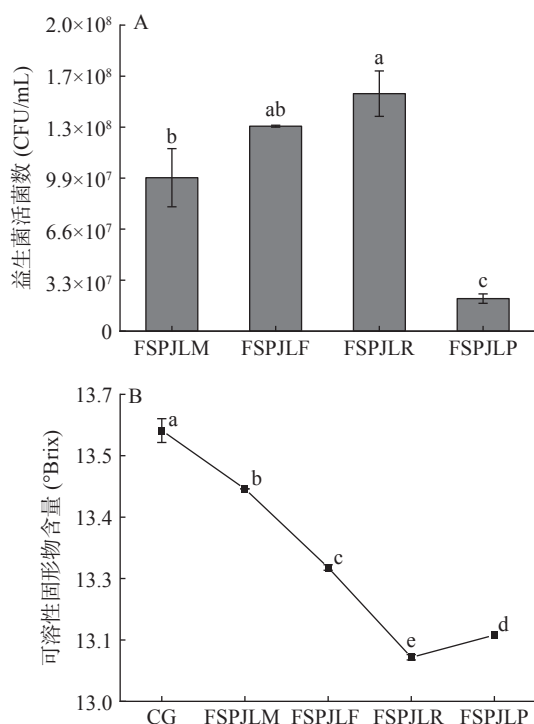


图1 不同益生菌发酵三华李果汁中益生菌活菌数(A)和可溶性固形物含量(B)

Fig.1 Viable probiotic counts (A) and soluble solid content (B) in Sanhua plum juice fermented by different probiotics

注: 不同小写字母表示各组样品间差异显著 ($P<0.05$); 图 3~图 5 同。

(图 1B), 在乳酸菌发酵山楂汁中也出现类似的结果^[12]。这可能是因为三华李果汁中生长较好的益生菌, 能够更加充分地利用三华李果汁中的可溶性糖类^[17]。然而, FSPJLP 中益生菌活菌数和可溶性固形物的变化趋势却与其他三种益生菌发酵果汁的不同, 这可能是发酵过程中菌体数量、菌龄和果汁营养成分等因素对 LP 的生长造成了较大的影响^[18], 即三华李果汁中丰富的营养物质和发酵的环境条件可能使 LP 快速增长, 从而更早地进入稳定期及衰亡期, 因此虽然消耗了大量的营养物质导致可溶性固形物含量下降, 但经 48 h 发酵后的 FSPJLP 益生菌活菌数却远低于 FSPJLM、FSPJLF 和 FSPJLR。

2.2 不同益生菌对发酵三华李果汁 pH 和可滴定酸的影响

由图 2 可知, 与未发酵的三华李果汁相比, 经益生菌发酵的三华李果汁的 pH 和可滴定酸均发生了显著性变化 ($P<0.05$)。经 Pearson 检验, 益生菌发酵三华李果汁的 pH 与其可滴定酸含量呈显著负相关 ($r=-0.948$, $P<0.05$)。与空白组相比, 三华李果汁发酵 48 h 后, FSPJLM 中可滴定酸含量显著升高导致其 pH 下降 ($P<0.05$), 而经 LF、LR、LP 发酵的三华李果汁的可滴定酸含量显著降低 ($P<0.05$), 因此, FSPJLF、FSPJLR 和 FSPJLP 的 pH 均显著高于未发酵三华李果汁 ($P<0.05$)。而在 Sun 等^[19]的研究中, 杏汁经 LP 发酵后其 pH 降低, 这可能是由于果汁基质的糖酸组成及益生菌特性不同所致。

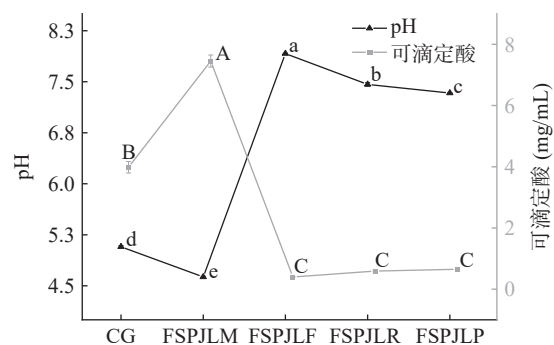


图2 不同益生菌发酵三华李果汁的 pH 和可滴定酸含量
Fig.2 pH and titratable acid content of Sanhua plum juice fermented by different probiotics

注: 不同小写字母表示各组样品间 pH 差异显著 ($P<0.05$), 不同大写字母表示各组样品间可滴定酸含量差异显著 ($P<0.05$)。

2.3 不同益生菌对发酵三华李果汁颜色的影响

不同益生菌发酵三华李果汁的色差值如表 1 所示, L^* 表示明暗度, a^* 表示红绿度, b^* 表示黄蓝度, Hue 为样品的色度角, ΔE 表示总色差。其中, Hue 接近于 0° 时, 颜色偏向于红色; Hue 接近于 90° , 颜色接近于黄色; Hue 接近于 180° , 颜色接近于绿色; Hue 接近于 270° 时, 颜色接近于蓝色^[20]。由表 1 可知, 不同三华李发酵果汁的 Hue 值由大到小为: FSPJLF>FSPJLP>FSPJLR>FSPJLM>CG, 且接近于 0° , 这表明经益生菌发酵三华李果汁和未发酵三华李

表 1 不同益生菌发酵对三华李果汁颜色的影响

Table 1 Influence of different probiotic fermentations on the colour of Sanhua plum juice

样品名	<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *	Hue (°)	Δ <i>E</i>
CG	10.08±0.65 ^a	14.95±0.87 ^b	12.80±0.75 ^a	0.87±0.02 ^d	
FSPJLM	7.53±0.16 ^b	16.93±0.34 ^a	10.66±0.31 ^b	1.37±0.04 ^c	4.48±0.43 ^b
FSPJLF	2.11±0.21 ^d	4.76±0.25 ^c	1.80±0.30 ^c	2.52±0.37 ^a	16.23±0.32 ^a
FSPJLR	2.13±0.04 ^d	4.32±0.12 ^c	2.08±0.20 ^c	1.91±0.20 ^b	16.31±0.14 ^a
FSPJLP	2.73±0.23 ^c	4.38±0.15 ^c	2.00±0.15 ^c	2.04±0.18 ^b	16.01±0.25 ^a

注: 同列肩标小写字母不同表示各组样品间差异显著($P<0.05$), 表2同。

果汁均呈红色, 且三华李果汁的红色度由高到低为: CG>FSPJLM>FSPJLR>FSPJLP>FSPJLF, 这与 a^* 的测定结果趋于一致。此外, 四种益生菌发酵果汁中, 经 LM 发酵的三华李果汁的 L^* 、 a^* 和 b^* 值与未发酵三华李果汁最为接近, 其 ΔE 也最小, 这可能是因为 FSPJLM 的 pH 低, 较低的 pH 有利于呈色物质(花色苷)的稳定^[21]。然而, 发酵过程中会产生一些褐色物质, 这些褐色物质降低了三华李果汁的明亮度及黄蓝色, 掩盖了果汁本身的红色度^[17], 从而导致发酵三华李果汁的颜色与未发酵三华李果汁出现差异($\Delta E>3$)。

2.4 不同益生菌对发酵三华李果汁有机酸组分的影响

由图 3 可知, 空白组主要以苹果酸(4.80 mg/mL)为主, 其次是草酸(1.34 mg/mL)和酒石酸(0.34 mg/mL)。发酵 48 h 后, FSPJLM、FSPJLF、FSPJLR 和 FSPJLP 中的苹果酸含量显著降低($P<0.05$), 并产生了乳酸。FSPJLF、FSPJLR 和 FSPJLP 中的乳酸含量远远高于 FSPJLM。此外, LF、LR 和 LP 发酵三华李果汁的过程中会产生一定含量的乙酸; 与空白组相比, LM 对三华李果汁的草酸和酒石酸含量无显著

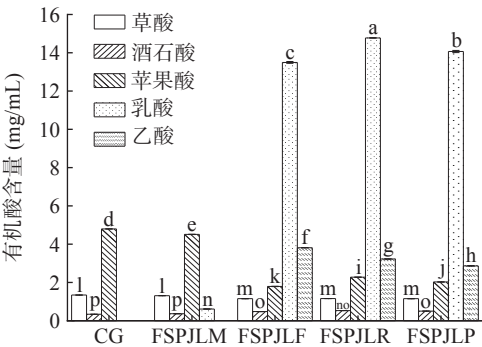


图 3 不同益生菌发酵三华李果汁的有机酸含量

Fig.3 Organic acid contents of Sanhua plum juice fermented by different probiotics

表 2 不同益生菌发酵三华李果汁的活性物质含量及抗氧化活性

FSPJ	总酚含量(mg GAE/L)	总黄酮含量(mg RE/L)	总花色苷含量(mg/L)	DPPH清除率(%)	铁离子还原能力(g TE/L)
CG	849.49±0.28 ^b	2.61±0.01 ^a	30.32±0.12 ^b	64.93±0.65 ^b	1.12±0.01 ^b
FSPJLM	867.43±10.49 ^a	2.49±0.02 ^c	34.98±1.66 ^a	69.33±0.11 ^a	1.14±0.01 ^a
FSPJLF	811.02±1.26 ^c	2.26±0.00 ^e	31.62±0.78 ^b	40.47±2.06 ^c	0.99±0.00 ^c
FSPJLR	841.27±0.65 ^b	2.46±0.00 ^d	33.98±0.67 ^a	54.23±0.25 ^d	1.02±0.01 ^d
FSPJLP	844.39±3.34 ^b	2.58±0.01 ^b	31.96±0.36 ^b	57.30±0.09 ^c	1.08±0.01 ^c

影响($P>0.05$), 而经 LF、LR 和 LP 发酵三华李果汁的草酸和酒石酸含量均出现显著性变化($P<0.05$)。以上结果表明 LF、LR 和 LP 会消耗三华李果汁中的碳源物质从而大量生成乳酸和乙酸, 这与之前的报道是一致的^[22]。此外, LM、LF、LR 和 LP 均有转化三华李果汁中苹果酸生成乳酸或乙酸的能力, 从而丰富三华李果汁的风味^[23]。

2.5 不同益生菌对发酵三华李果汁活性物质和抗氧化能力的影响

由表 2 可知, 与空白组相比, 经 LM 发酵得到的三华李果汁总酚含量升高, 而经 LF 发酵的三华李果汁总酚含量显著下降($P<0.05$), LR 和 LP 发酵未使三华李果汁的总酚含量发生显著变化($P>0.05$)。有研究表明, 益生菌发酵可产生新的酚类衍生物或增加游离形式的酚类物质从而使其总酚含量增加。然而, 酚类物质易降解, 且不同菌株代谢酚类衍生物的能力具有差异性, 发酵果汁中的酚类物质含量存在下降的可能性^[24-25]。因此, 在发酵过程中, 果汁基质、发酵菌株类型以及发酵条件共同影响着酚类化合物的总含量。此外, 不同益生菌发酵的三华李果汁总黄酮均呈现不同程度的下降, 其中 FSPJLF 总黄酮含量下降最多, 发酵 48 h 后其总黄酮含量仅为空白组的 86.59%。FSPJLM、FSPJLR 和 FSPJLP 中总黄酮含量分别下降了 4.60%、5.75% 和 1.15%。在益生菌发酵橙汁中也观察到类似的现象, 植物乳杆菌、鼠李糖乳杆菌、干酪乳杆菌和发酵乳杆菌均对橙汁中的黄酮类物质具有显著的降解作用^[26]。果汁中黄酮类物质总含量的降低主要是因为乳酸菌将果汁中复杂的黄酮类物质代谢为简单的化合物^[27]。

与空白组相比, 发酵 48 h 后, FSPJLM 和 FSPJLR 的总花色苷含量有所上升, 而 FSPJLF 和 FSPJLP 的总花色苷含量无显著变化($P>0.05$)。三华李发酵果汁中总花色苷含量的上升可归因于乳酸菌的代谢和生物转化^[28]。其次, 较低 pH 下花色苷结构的稳定性较高, 这可能也是 FSPJLM、FSPJLF 和 FSPJLR 中花色苷保留率较好的重要因素之一^[20]。而 FSPJLP 在发酵后 pH 有所上升但花色苷含量无显著性变化以及 LM 发酵的三华李果汁总花色苷含量的大幅上升的可归结于微生物的转化和低 pH 环境稳定花色苷结构稳定的共同作用。

随后, 对不同发酵三华李果汁的抗氧化活性也

进行了分析, DPPH 清除率和铁离子还原能力测定结果显示, 未发酵三华李果汁和发酵三华李果汁之间的抗氧化活性均存在显著性差异($P<0.05$), 且发酵三华李果汁的抗氧化活性与其活性物质含量密切相关。三华李果汁抗氧化活性由高到低为: FSPJLM>CG>FSPJLP>FSPJLR>FSPJLF。将发酵三华李果汁的抗氧化活性与其总酚、总黄酮和总花色苷含量进行相关性分析(表 3), 不同发酵三华李果汁的总酚含量与其 DPPH 自由基清除率和铁离子还原能力呈显著正相关($P<0.05$), 因此可以推断, 不同益生菌发酵三华李果汁的抗氧化性主要受果汁中酚类物质的影响。有研究表明, 乳酸菌混合发酵不同品种红枣汁的 DPPH 清除率自由基与铁离子还原能力同样受其酚类物质含量的影响, 并与其中咖啡酸、芦丁等分类物质含量呈显著性正相关^[29]。综合以上结果发现, 四种益生菌中, LM 能够有效提升三华李果汁总酚含量、总花色苷含量和抗氧化水平, 且其能够较好地保留果汁中的黄酮类物质, 是三华李果汁的潜在发酵剂。

表 3 不同益生菌发酵三华李果汁的活性物质含量及抗氧化活性间的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of active ingredients contents and antioxidant capacity of Sanhua plum juice fermented by different probiotics

指标	总酚	总黄酮	总花色苷	DPPH 自由基清除率	铁离子还原能力
总酚	1	0.738	0.465	0.976**	0.898*
总黄酮		1	-0.144	0.796	0.76
总花色苷			1	0.281	0.115
DPPH 自由基清除率				1	0.955*
铁离子还原能力					1

注: 肩标**表示不同抗氧化性物质含量间相关性极显著($P<0.01$), 肩标*表示不同抗氧化性物质含量间相关性显著($P<0.05$)。

2.6 不同益生菌对发酵三华李果汁生物利用度的影响

2.6.1 体外消化过程三华李发酵果汁中益生菌活菌数的变化 未经消化的三华李发酵果汁益生初始活菌数在 10^8 CFU/mL 左右(表 4)。体外消化结束后, FSPJLM 中未检测到活菌, FSPJLF、FSPJLR 和 FSPJLP 中活菌数均处于 10^6 的水平, 表明 LF、LR 和 LP 在以三华李果汁为发酵基质时均能够顺利通

表 4 不同益生菌发酵三华李果汁体外消化过程中益生菌活菌数变化

Table 4 Changes of probiotics viable counts of in Sanhua plum juice fermented by different probiotics during *in vitro* digestion

体外消化时期	活菌数(lg CFU/mL)				
	CG	FSPJLM	FSPJLF	FSPJLR	FSPJLP
未消化	—	8.47 ± 0.02^a	7.80 ± 0.01^a	8.28 ± 0.02^a	7.83 ± 0.06^a
经口消化	—	8.38 ± 0.04^a	7.55 ± 0.07^b	8.17 ± 0.00^b	7.74 ± 0.02^a
经胃消化	—	3.83 ± 0.19^b	7.59 ± 0.03^b	8.00 ± 0.03^c	7.66 ± 0.04^a
经肠消化	—	—	6.63 ± 0.01^c	6.74 ± 0.03^d	6.44 ± 0.15^b

注: 同列肩标小写字母不同表示相同指标在不同消化阶段差异显著($P<0.05$)。

过人体的上消化道到达结肠为人体所利用。其中, FSPJLF 和 FSPJLP 经口和经胃消化后其活菌数未出现较大幅度的变化, 在经肠液消化后仍具有较高的益生菌活菌数, 说明三华李发酵果汁中的 LF 和 LP 对唾液和胃液有较好的耐受能力, 且经肠消化后仍保留较高的活性。

2.6.2 体外消化过程中三华李果汁总酚、总黄酮及总花色苷含量的变化

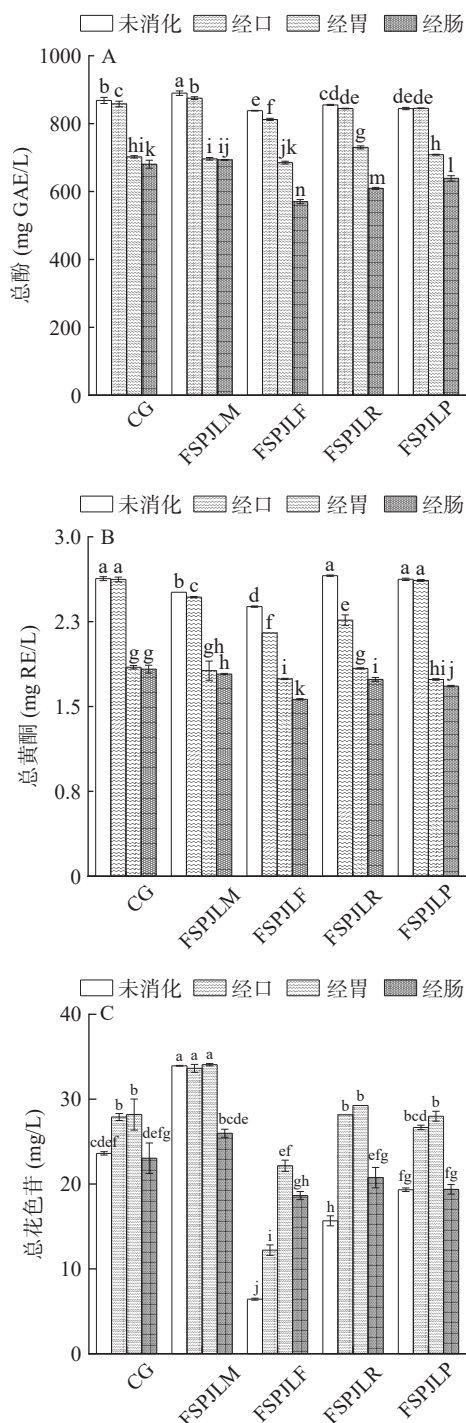


图 4 不同益生菌发酵三华李果汁体外消化过程中总酚(A)、总黄酮(B)及总花色苷含量(C)的变化

Fig.4 Changes of total phenols (A), total flavonoids (B) and total anthocyanin content (C) in Sanhua plum juice fermented by different probiotics during *in vitro* digestion

酵果汁的总酚含量在体外消化过程中均呈现下降趋势。酚类物质的稳定性在体外消化过程中会受到模拟体系中多种因素的影响。有研究表明,模拟体系中的消化酶会使酚类化合物分解,不同的无机离子能够促进或抑制多酚物质的降解^[30-31]。此外,总酚含量在体外模拟过程中的变化与酚类化合物同食品基质的结合状态有关^[32]。当果汁中的酚类物质同沉淀物中的食品基质结合时,胃部的低 pH 环境和胃蛋白酶会促进酚类物质从食品基质中的释放,从而使消化液中的酚类含量升高,而对于游离态的酚类物质,胃部 pH 的变化会使酚类化合物在其胃消化过程中会发生氧化、去糖基化、水解、转化和裂解反应而被转化成与初试化合物完全不同的代谢物^[33]。在本实验中,五种三华李果汁样品的总酚含量在经口消化阶段仅出现小幅度的下降,而在经胃和经肠阶段呈现出较大幅度的下降,与牛至中酚类化合物在体外消化过程中变化趋势一致^[34]。三华李果汁经口消化后总酚含量的下降是因为无机离子与 α -淀粉酶的共同作用导致果汁中多酚在经口消化过程中轻微降解。而经胃消化阶段总酚含量的显著性下降则可能是因为三华李果汁中仅有少量的多酚化合物与蛋白质等大分子食品基质相结合,而三华李果汁中的游离态酚类物质含量较高,经胃消化后,酚类物质的降解和转化远高于酚类物质的释放,因此,由 Folin-Ciocalteu 比色法测得的总酚含量呈现出显著性的下降^[35]。而由于酚类化合物在肠道碱性 pH 下的不稳定性以及胰蛋白酶的降解作用,在经肠消化阶段酚类化合物含量则多倾向于发生显著性的降低,在许多研究中也发现类似的结果^[36-38]。

所有三华李果汁样品的总黄酮含量在经口和经肠消化阶段略有下降,而经胃消化阶段呈现大幅下降(图 4B),这可归因于胃消化阶段的低 pH 所导致的黄酮的大量降解,而口和肠消化阶段的环境为较温和的中性环境,对黄酮的影响较小,在类似的研究中有相似的结果^[39]。

三华李果汁样品中的总花色苷含量经口和胃消化后出现上升的趋势,而经肠消化后出现显著的下降(图 4C),其变化趋势与 Mcdougall 等^[40]的研究结果相同。这可能是因为金属离子的螯合作用使得花色苷能够保持结构的稳定而未被降解;而低 pH 环境和消化酶的作用有利于花色苷的游离^[41]。研究表明,胃蛋白酶的添加使黑加仑果汁中的花色苷在胃液中的释放量增大,而胰蛋白酶则使花色苷在肠液中的损失量增大^[41]。此外,花色苷在模拟肠液的 pH 下,主要以无色查尔酮假基碱基分子形式存在,在温度等因素的影响下,其 B 和 C 环之间发生裂变而致使其含量的下降。也有研究表明,有机酸(如草酸等)能够对花色苷具有护色作用,且护色效果与有机酸含量成正相关^[42],在胃部 pH 条件下,有机酸可以稳定存在,而当消化进行到肠部时,果汁中的有机酸在碱性条件下易

与阳离子生成盐或不溶性沉淀物而失去其护色作用,这也可能是发酵三华李果汁花色苷含量在经胃阶段上升而在经肠阶段下降的原因。

2.6.3 体外消化过程中三华李果汁抗氧化性的变化

由图 5 可知,五种三华李果汁样品的抗氧化性总体呈现下降的趋势,与其总酚含量在体外消化过程中的变化趋势一致,这与预期一致。其中,四种三华李果汁样品的铁离子还原能力(图 5B)经口消化后均未出现显著性下降($P>0.05$)。软枣猕猴桃游离酚类提取物的体外消化过程也呈现出相似的现象,其抗氧化性经口消化后并未表现出明显的下降^[35]。这可能是由于经口消化阶段 pH 比较温和,不会对酚类化合物稳定性产生较大的影响,此外, α -淀粉酶和无机离子对三华李发酵果汁的总酚含量及抗氧化性的影响也较小。不同三华李发酵果汁的抗氧化活性在经胃和经肠消化阶段呈现出显著性下降($P<0.05$),这可能主要与 pH 的降低以及酚类物质的降解有关。有研究表明, pH 会对抗氧化物质的构型产生影响,进而影响其反应性,随着 pH 的升高,抗氧化物质的反应性随之降低,在肠液 pH 环境($\text{pH}7.0\pm0.2$)下抗氧化物质的反应性较低也是三华李发酵果汁经肠消化后抗氧

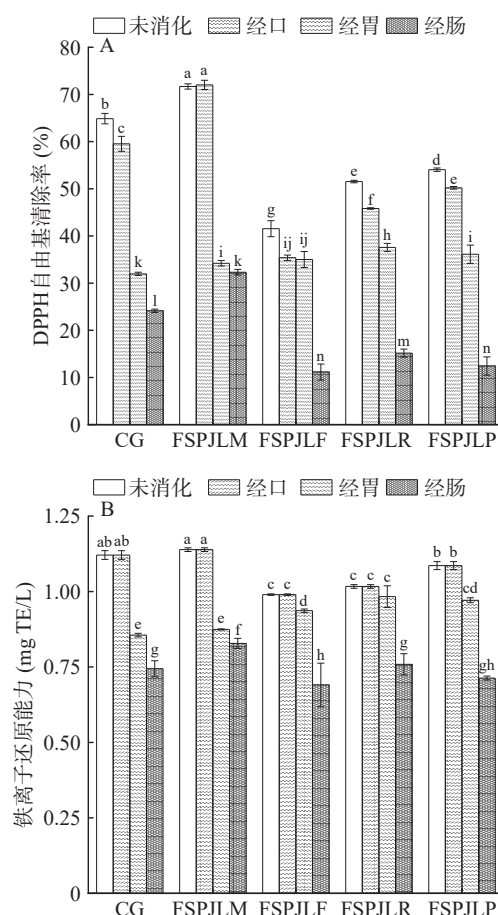


图 5 不同益生菌发酵三华李果汁体外消化过程中 DPPH 自由基清除率(A)及铁离子还原能力(B)的变化

Fig.5 Changes of DPPH radical scavenging rate (A) and ferric ion reducing antioxidant power (B) of Sanhua plum juice fermented by different probiotics during *in vitro* digestion

化活性降低的原因之一^[36]。

3 结论

本研究系统解析了 LM、LF、LR 和 LP 四种不同益生菌对三华李果汁理化性质、活性物质、抗氧化能力和体外消化特性的影响。结果表明,经发酵 48 h 后四种发酵三华李果汁中益生菌活菌数均处于 $10^7 \sim 10^8$ CFU/mL 之间。由于益生菌发酵特性的差异,经 LM 发酵的三华李果汁 pH 下降,可滴定酸含量升高,而其他三种三华李发酵果汁的 pH 和可滴定酸含量变化趋势则与之相反。此外,四种菌均可消耗三华李果汁中的苹果酸,并合成乳酸,其中经 LF、LR 和 LP 发酵的三华李果汁中乳酸含量远高于 FSPJLM。与此同时,FSPJLM 与未发酵三华李果汁的颜色最为相近,这可能是由于其低 pH 环境较好地保留了三华李果汁中的花色苷。与未发酵三华李果汁相比,经 LM 发酵的三华李果汁其总酚、总花色苷含量以及抗氧化活性均出现显著性升高,而经 LF、LR、LP 发酵的三华李果汁总酚含量则略有下降,这主要是由于菌株特异性造成的。从四种益生菌发酵的三华李果汁总黄酮含量普遍下降和总花色苷含量普遍上升的趋势来看,在发酵过程中部分类黄酮物质可能被发酵菌株转化为花色苷类物质。

体外消化模拟结果显示,LM 对胃肠道消化极不耐受,FSPJLM 经体外消化后未检测到活菌;与之相反,发酵效果较差的 LF 表现出良好的胃肠道耐受性。此外,发酵三华李果汁的总酚、总黄酮及抗氧化活性在体外消化过程中均呈降低的趋势。综合来看,LP 和 LR 对三华李果汁具有较好的发酵特性,且其对胃肠道具有较好的耐受性,可作为益生菌发酵三华李果汁的发酵剂。

参考文献

- [1] GHEZIEL C, RUSSO P, ARENA M P, et al. Evaluating the probiotic potential of *Lactobacillus plantarum* strains from algerian infant feces: Towards the design of probiotic starter cultures tailored for developing countries[J]. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 2019, 11(1): 113–23.
- [2] CHEN G L, CHEN S G, ZHAO Y Y, et al. Total phenolic contents of 33 fruits and their antioxidant capacities before and after *in vitro* digestion[J]. *Industrial Crops and Products*, 2014, 57: 150–157.
- [3] WANG Z N, FENG Y Z, YANG N N, et al. Fermentation of kiwifruit juice from two cultivars by probiotic bacteria: Bioactive phenolics, antioxidant activities and flavor volatiles[J]. *Food Chemistry*, 2022, 373: 131455.
- [4] MANGA J A M, ZANGUÉ S C D, TATSADJEU L N, et al. Producing probiotic beverage based on raffia sap fermented by *Lactobacillus fermentum* and *Bifidobacterium bifidum*[J]. *Research on Crops*, 2019, 20(3): 629–634.
- [5] DZANDU B, CHOTIKO A, SATHIVEL S. Antioxidant activity and viability of *Lactocaseibacillus rhamnosus*, *Lactocaseibacillus casei*, and co-culture in fermented tomato juice during refrigerated storage[J]. *Food Bioscience*, 2022, 50: 102085.
- [6] BAGHER H S M, DORNOUSH J, MOHAMMAD J. Improving bioactive properties of peach juice using *Lactobacillus* strains fermentation: Antagonistic and anti-adhesion effects, anti-inflammatory and antioxidant properties, and Maillard reaction inhibition[J]. *Food Chemistry*, 2021, 365: 130501.
- [7] 胡珊, 黄皓, 梁卫驱, 等. 荔枝内生乳酸菌的筛选、鉴定及发酵效果分析[J]. *南方农业学报*, 2019, 50(1): 137–143. [HUS, HAUNG H, LAING W Q, et al. Screening, identification and fermentation effects of endogenous *Lactobacillus* strains isolated from litchi[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2019, 50(1): 137–143.]
- [8] BACKIALAKSHMI S, MEENAKSHI R N, SARANYA A, et al. Biopreservation of fresh orange juice using Antilisterial bacteriocins 101 and Antilisterial bacteriocin 103 purified from *Leuconostoc mesenteroides*[J]. *Food Processing and Technology*, 2015, 6(8): 1–5.
- [9] 高畅, 孟祥红, 张芳. 发酵条件对酸樱桃发酵汁挥发性风味物质的影响探究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(20): 6607–6612. [GAO C, MENG X H, ZHANG F. Study on the effect of fermentation conditions on volatile flavor substances of sour cherry fermentation juice[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2022, 13(20): 6607–6612.]
- [10] ALI M, CHENG J H, SUN D W. Effects of dielectric barrier discharge cold plasma treatments on degradation of anilazine fungicide and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) juice[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2020, 56(1): 69–75.
- [11] WU W L, XIAO G S, YU Y S, et al. Effects of high pressure and thermal processing on quality properties and volatile compounds of pineapple fruit juice[J]. *Food Control*, 2021, 130: 108293.
- [12] 黄豪, 周义, 陈佳慧, 等. 乳酸菌发酵对山楂汁理化性质、酚类化合物、抗氧化性及风味的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(10): 97–106. [HUANG H, ZHOU Y, CHEN J H, et al. Effect of lactic acid bacteria fermentation on physicochemical properties, phenolic compounds, antioxidant activity and volatile components of Hawthorn juice[J]. *Food Science*, 2022, 43(10): 97–106.]
- [13] 束文秀, 吴祖芳, 翁佩芳, 等. 植物乳杆菌和发酵乳杆菌对胡柚汁发酵品质及其抗氧化性的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(2): 152–158. [SHU W X, WU Z F, WENG P F, et al. Comparison of quality characteristics and antioxidant activity of the fruit juice of *Citrus paradisi* cv. Changshan Huyou Fermented by *Lactobacillus plantarum* and *Lactobacillus fermentum*[J]. *Food Science*, 2019, 40(2): 152–158.]
- [14] WILLIAM T. Effects of high pressure and ultrasound on phytochemical and volatile compounds in the processing of a sulfur dioxide-free mulberry (*Morus nigra*) fruit wine [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2015.
- [15] 鞠葛金悦, 徐红雨, 温靖, 等. 毛酸浆乳酸菌发酵果汁的体外消化耐受性及抗氧化活性变化[J]. *现代食品科技*, 2021, 37(7): 108–114, 56. [JU G J R, XU Y H, WEN J, et al. *In vitro* assessment of the digestive tolerance and antioxidant of juice from *Physalis pubescens* L. fermented by lactic acid bacteria[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2021, 37(7): 108–114, 56.]
- [16] MINEKUS M, ALMINGER M, ALVITO P, et al. A standardised static *in vitro* digestion method suitable for food—an international consensus[J]. *Food and Funct*, 2014, 5(6): 1113–1124.
- [17] KWAU E, MA Y K, TCHABO W, et al. Effect of *Lactobacillus* strains on phenolic profile, color attributes and antioxidant activities of lactic acid-fermented mulberry juice[J]. *Food Chemistry*, 2018, 250: 148–154.
- [18] DEMIR N, BAHCECI K S, ACAR J. The effects of different initial *Lactobacillus plantarum* concentrations on some properties of

- fermented carrot juice[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2006, 30(3): 352–363.
- [19] SUN J K, ZHAO C, PU X L, et al. Flavor and functional analysis of *Lactobacillus plantarum* fermented apricot juice[J]. *Fermentation*, 2022, 8(10): 533–533.
- [20] 李欣洁, 吕欣然, 杨雨帆, 等. 不同益生菌发酵对黑胡萝卜汁感官品质和营养品质的影响研究[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(10): 24–31. [LI X J, LÜ X R, YANG Y F, et al. Effects of different probiotics fermentation on sensory quality and nutritional quality of black carrot juice [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(10): 24–31.]
- [21] SÜMEYYE A K, MELTEM T, MEHMET Ö. Effects of fermentation time and pH on quality of black carrot juice fermented by kefir culture during storage[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 102(6): 2563–2574.
- [22] 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.]
- [23] 李栋, 牟德华, 郭逸, 等. 乳酸菌发酵鸭梨汁工艺优化及风味研究[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(1): 94–104. [LI D, MU D H, GUO Y, et al. Process optimization and effects on flavor of fermenting pear juice with lactic acid bacteria[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(1): 94–104.]
- [24] MANTZOURANI I, KAZAKOS S, TERPOU A, et al. Potential of the probiotic *Lactobacillus Plantarum* ATCC 14917 strain to produce functional fermented pomegranate juice[J]. *Foods*, 2019, 8(1): 4.
- [25] FILANNINO P, BAI Y P, DI CAGNO R, et al. Metabolism of phenolic compounds by *Lactobacillus* spp. during fermentation of cherry juice and broccoli puree[J]. *Food Microbiology*, 2015, 46: 272–279.
- [26] LI M Y, QIN J W, ZHONG B, et al. Improving acidity and flavors of citrus juice as well as its antioxidant activity by co-fermentation with deacidification bacteria combination[J]. *Food Bioscience*, 2023, 53: 102592.
- [27] 赵沁雨, 兰天, 袁取予, 等. 植物乳杆菌发酵对果汁品质的影响研究概述[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(16): 300–307. [ZHAO Q Y, LAN T, YUAN Q Y, et al. Research progress on the effect of *Lactobacillus plantarum* fermentation on juice quality[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(16): 300–307.]
- [28] ZHANG Y, LIU W P, WEI Z H, et al. Enhancement of functional characteristics of blueberry juice fermented by *Lactobacillus plantarum*[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 139: 110590.
- [29] 袁静宇, 张毅. 乳酸菌混合发酵对不同品种红枣汁品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(16): 187–194. [YUAN J Y, ZHANG Y. Effect of co-fermentation technology with lactic acid bacteria on the quality of cloudy juice of different varieties of red jujube[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(16): 187–194.]
- [30] BOBRICH A, FANNING K J, RYCHLIK M, et al. Phytochemicals in Japanese plums: Impact of maturity and bioaccessibility[J]. *Food Research International*, 2014, 65: 20–26.
- [31] ARGYRI K, KOMAITIS M, KAPSOKEFALOU M. Iron decreases the antioxidant capacity of red wine under conditions of *in vitro* digestion[J]. *Food Chemistry*, 2006, 96(2): 281–289.
- [32] TARKO T, DUDA-CHODAK A. Influence of food matrix on the bioaccessibility of fruit polyphenolic compounds[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(5): 1315–1325.
- [33] SPINOLA V, LLORENT-MARTINEZ E J, CASTILHO P C. Antioxidant polyphenols of Madeira sorrel (*Rumex maderensis*): How do they survive to *in vitro* simulated gastrointestinal digestion? [J]. *Food Chemistry*, 2018, 259: 105–112.
- [34] GUTIERREZ-GRIJALVA E P, ANGULO-ESCALANTE M A, LEON-FELIX J, et al. Effect of *in vitro* digestion on the total antioxidant capacity and phenolic content of 3 species of oregano (*Hedeoma patens*, *Lippia graveolens*, *Lippia palmeri*) [J]. *Journal of Food Science*, 2017, 82(12): 2832–2839.
- [35] 李斌, 张继月, 耿丽娟, 等. 软枣猕猴桃在体外模拟消化过程中酚类物质及抗氧化活性的变化规律[J]. *食品科学*, 2021, 42(23): 196–205. [LI B, ZHANG J Y, GENG L J, et al. Changes of phenolics and antioxidant activities of kiwiberry (*Actinidia arguta*) fruit during *in vitro* simulated digestion[J]. *Food Science*, 2021, 42(23): 196–205.]
- [36] CHEN G L, CHEN S G, XIE Y Q, et al. Total phenolic, flavonoid and antioxidant activity of 23 edible flowers subjected to *in vitro* digestion[J]. *Journal of Functional Foods*, 2015, 17: 243–259.
- [37] WOOTTON-BEARD P C, MORAN A, RYAN L. Stability of the total antioxidant capacity and total polyphenol content of 23 commercially available vegetable juices before and after *in vitro* digestion measured by FRAP, DPPH, ABTS and Folin-ciocalteu methods[J]. *Food Research International*, 2011, 44(1): 217–224.
- [38] BERMUDEZ-SOTO M J, TOMAS-BARBERAN F A, GARCIA-CONESA M T. Stability of polyphenols in chokeberry (*Aronia melanocarpa*) subjected to *in vitro* gastric and pancreatic digestion [J]. *Food Chemistry*, 2007, 102(3): 865–874.
- [39] DOGAN K, AKMAN P K, TORNUK F. Role of non-thermal treatments and fermentation with probiotic *Lactobacillus plantarum* on *in vitro* bioaccessibility of bioactives from vegetable juice[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101(11): 4779–4788.
- [40] MCDUGALL G J, DOBSON P, SMITH P, et al. Assessing potential bioavailability of raspberry anthocyanins using an *in vitro* digestion system[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, 53(15): 5896–5904.
- [41] UZUNOVIC A, VRANIC E. Stability of anthocyanins from commercial black currant juice under simulated gastrointestinal digestion[J]. *Bosnian Journal of Basic Medical Sciences*, 2008, 8(3): 254–258.
- [42] ALAGÖZ K S, TÜRKİYILMAZ M, ÖZKAN M. Effects of fermentation time and pH on quality of black carrot juice fermented by kefir culture during storage[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(6): 2563–2574.