

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

鞠葛金悦^{1,2}, 徐红雨^{1,2}, 温靖², 吴继军², 余元善², 李璐², 田书源¹, 王晶晶¹

(1. 锦州医科大学食品科学与工程学院, 辽宁锦州 121001) (2. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业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)

摘要: 以植物乳杆菌和发酵乳杆菌分别发酵的毛酸浆果汁为原料, 采用体外模拟胃肠消化体系, 对发酵果汁中两种乳酸菌的消化耐受性、多酚含量及抗氧化活性的变化进行了研究。结果表明: 在体外模拟胃肠消化 10 h 后, 植物乳杆菌和发酵乳杆菌菌落总数分别为 7.54 CFU/mL 和 7.82 CFU/mL。体外消化前后, 毛酸浆发酵果汁多酚含量由 0.33±0.01 mg/mL 及 0.40±0.03 mg/mL 提高到 1.37±0.03 mg/mL 及 1.30±0.01 mg/mL, 多酚释放量与胃液 pH 值呈正相关。在模拟胃液消化 2 h 后, 植物乳杆菌发酵果汁的 DPPH·、ABTS⁺·清除力和总还原力 (FRAP) 分别上升了 4.92%、23.80% 和 41.32% ($p < 0.05$); 而发酵乳杆菌发酵果汁分别上升了 4.98%、15.55% 和 17.72%。结果提示, 经体外消化后毛酸浆果汁中两种乳酸菌-植物乳杆菌和发酵乳杆菌仍具有很好的活力, 果汁中多酚含量和抗氧化活性均较高。

关键词: 毛酸浆; 乳酸菌; 体外消化; 多酚; 抗氧化

文章编号: 1673-9078(2021)07-108-114

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.7.1182

In Vitro Assessment of the Digestive Tolerance and Antioxidation of Juice from *Physalis pubescens* L. Fermented by Lactic Acid Bacteria

JU Ge-jinyue^{1,2}, XU Hong-yu^{1,2}, WEN Jing², WU Ji-jun², YU Yuan-shan², LI Lu², TIAN Shu-yuan¹, WANG Jing-jing¹

(1. College of Food Science and Engineering, Jinzhou Medical University, Jinzhou 121001, China) (2. Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Sericultural & Agri-Food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510610, China)

Abstract: The simulated gastrointestinal digestion system *in vitro* was applied to evaluate the digestive tolerance of two strains of lactobacillus, polyphenol content and antioxidation of juice from *Physalis pubescens* L. fermented by two lactobacillus strains, *Lactobacillus plantarum* and *Lactobacillus fermentans*. The results showed that the total count of *Lactobacillus plantarum* and *Lactobacillus fermentans* were separately 7.54 CFU/mL and 7.82 CFU/mL of juice following digestion for 10 h in simulated gastrointestinal system *in vitro*. The polyphenol content increased from 0.33±0.01 mg/mL and 0.40±0.03 mg/mL to 1.37±0.03 mg/mL and 1.30±0.01 mg/mL, respectively, in the fermented juice of *Physalis pubescens* L. before and after *in vitro* digestion. The polyphenol releasing level positively correlated with pH value of gastric juice. DPPH·, ABTS⁺· scavenging power and total reducing power (FRAP) increased by 4.92%, 23.80% and 41.32%, respectively, when the *Lactobacillus plantarum* fermented juice was digested for 2 h in simulated gastric system. While those of fermented by *Lactobacillus plantarum* increased by 4.98%, 15.55% and 17.72%, respectively. The results showed that *Lactobacillus plantarum* and *Lactobacillus fermentans* still had good activity after *in vitro* digestion, and the content of polyphenols and antioxidant activity in the juice were high.

引文格式:

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 Ge-jinyue, XU Hong-yu, WEN Jing, et al. *In Vitro* assessment of the digestive tolerance and antioxidation of juice from *Physalis pubescens* L. fermented by lactic acid bacteria [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(7): 108-114, +56

收稿日期: 2020-12-20

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目 (2019-ZD-0805); 广州市科技计划项目 (201903010045; 201909020001); 国家级大学生创业实训项目 (202010160006X)

作者简介: 鞠葛金悦 (1996-), 女, 硕士, 研究方向: 农产品深加工; 通讯作者: 王晶晶 (1979-), 女, 副教授, 研究方向: 农产品深加工安全控制技术

Key words: *Physalis pubescens* L.; lactobacillus; *in vitro* digestion; polyphenol; antioxidant

毛酸浆 (*Physalis pubescence* L.) 为茄科酸浆属一年生草本植物, 俗称洋姑娘或黄姑娘, 是东北特色浆果。富含营养物质和功能活性成分, 毛酸浆中的黄酮类、甾体类、苯丙素类、生物碱类、脂肪酸类等多种化学成分具有抗肿瘤、抗菌、抗氧化、利尿、免疫抑制等多种药理活性, 近些年在国内受到部分学者关注, 但鲜有国外学者对其进行研究^[1-4]。

近年来, 乳酸菌作为益生菌重要的组成部分受到越来越多研究者的关注, 利用乳酸菌对这些肠道疾病的预防作用制成口感鲜美的发酵型果汁, 即有利于人体肠道健康, 又满足了人们的饮食需要。利用乳酸菌对果蔬进行发酵, 能将乳酸菌的益生功能与果蔬的营养功能有效的结合起来, 还能够赋予果蔬新的风味, 提高生物活性^[5,6]。乳酸菌可定植于人肠道内发挥其生理功能, 而其在肠道中的定植能够改善人体肠道菌群的构成, 起到抑制致病菌, 维持肠道生态环境的平衡^[7,8]。因此, 对消化环境的耐受力是筛选发酵果蔬汁的益生菌重要的标准之一。食物通过胃肠消化进入人体从而影响人体健康, 彻底理解消化过程中食物发生的变化, 对于理解生物利用率和生物活性至关重要。在过去十年中, 对于胃肠道消化食物过程的研究逐渐增多^[9]。在理想情况下, 食物消化应该在人体内进行研究, 但体内消化实验具有高费用、高耗时以及较大个体差异等特点, 而体外模拟消化与之相比较为便捷、快速、成本低、重复性高等优点^[10]。体外模拟胃肠道环境实验, 可为筛选更易定植于肠道、激发发酵果汁中抗氧化能力的乳酸菌提供理论依据。

本文分别采用植物乳杆菌和发酵乳杆菌对毛酸浆果汁进行发酵, 通过检测发酵果汁经过体外模拟胃液和肠液后乳酸菌的存活率、果汁多酚含量和抗氧化性的变化, 评价了毛酸浆发酵果汁的体外消化耐受性及生物活性变化, 为毛酸浆乳酸菌发酵果汁的开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

毛酸浆, 购于辽宁省锦州市。

发酵乳杆菌 (*Lactobacillus fermenti*)、植物乳杆菌 (*Lactobacillus plantarum*): 由广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所提供。

MRS 肉汤培养基、MRS 培养基, 广东环凯微生物科技有限公司; 水溶性 VE (Trolox)、1,1-二苯基-2-

三硝基苯肼 (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)、2,2'-联氨基-双-(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐 (2,2'-amino-di (3-ethyl-benzothiazoline sulphonic acid-6) ammonium salt, ABTS), 美国 Sigma-Aldrich 公司; 猪胃白酶 (酶活力 3200 U/mg)、猪胰蛋白酶 (酶活力 4~6 U/mg)、猪胆盐、Folin-Ciocalteu 试剂, 上海源叶生物科技有限公司; 甲酸、甲醇 (均为色谱纯), 德国 Merck 公司; 其他试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

UV-1800 型分光光度计、LC-20A HPLC 仪, 日本岛津公司; pH 计 PB-10, 德国 Sartorius; 恒温摇床培养箱、立式蒸汽灭菌锅, 上海博讯实业有限公司; 高速冷冻离心机, 美国 Thermo Fisher Scientific 公司。ALC-210.4 分析天平, 赛多利斯科学仪器有限公司; SYNERGY H1 多功能酶标仪, 美国伯腾仪器有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 发酵毛酸浆果汁的制备

1.3.1.1 菌株活化

从 -80 °C 冰箱中取出冻存菌株, 取 500 μ L 甘油菌于 50 mL 灭菌 MRS 肉汤培养基中, 37 °C 静置培养 24 h, 取菌液接种于 MRS 培养基, 37 °C 培养 48 h。取活化后的单菌落接种于 10 mL MRS 肉汤培养基, 37 °C 静置培养 12 h。

1.3.1.2 毛酸浆果浆制备

选取新鲜成熟完整的毛酸浆果, 去萼, 清洗, 沥干后放入榨汁机中打浆, 过滤, 果汁经巴氏杀菌, 放置于 4 °C 冰箱中冷藏备用。

1.3.1.3 乳酸菌发酵毛酸浆果汁

将发酵乳杆菌及植物乳杆菌以 $1.0 \times 10^{6.5}$ CFU/mL 的接种量接入到毛酸浆果汁中, 37 °C 发酵 48 h, 即可得到乳酸菌发酵毛酸浆果汁。

1.3.2 模拟体外消化体系

1.3.2.1 模拟胃液消化试验

制备 PBS 缓冲溶液, 用稀盐酸分别调节 pH 值到 1.5、2.0、3.0 及 4.0。121 °C 高压灭菌 30 min 后, 分别添加 10.0 g/L 胃蛋白酶, 溶解后用无菌 0.22 μ m 微孔滤膜过滤除菌。将毛酸浆发酵果汁以 10% (V/V) 的添加量添加至人工胃液中, 置于 37 °C、100 r/min 恒温摇床进行消化, 2 h 后取样检测乳酸菌、多酚和抗氧化指标。

1.3.2.2 模拟肠液消化试验

制备 PBS 缓冲溶液, 用 NaOH 调节 pH 至 7.5。121 °C 高压灭菌后添加 10.0 g/L 胰蛋白酶, 充分溶解, 用无菌 0.22 μm 微孔滤膜过滤除菌。将发酵毛酸浆果汁以 10% (V/V) 的添加量添加至人工肠液中, 放置 37 °C、100 r/min 恒温摇床进行消化, 分别于 0、1、2、3、4 h 时进行取样, 检测乳酸菌、多酚和抗氧化指标。

1.3.2.3 模拟胆盐液试验

取 MRS 肉汤培养基, 分别以 0、1、2、3、4 g/L 的浓度将胆盐添加至 MRS 肉汤培养基中, 121 °C 灭菌。将发酵毛酸浆果汁添加至模拟胆盐液, 于 24 h 后进行取样, 检测乳酸菌菌落总数。

1.3.2.4 模拟胃肠道体系试验

参考 Zhuang Guo 和 Megda Silva Fernandes 等方法, 稍作改进^[11,12]。配置 pH 为 3.0 的人工胃液, 配置加有 3 g/L 胆盐的人工肠液, 用无菌 0.22 μm 微孔滤膜过滤除菌。将发酵毛酸浆果汁按 10% (V/V) 的添加量添加至人工胃液中, 放置 37 °C、100 r/min 恒温摇床消化 2 h。然后, 从上述已消化 2 h 的人工含菌胃液取 1 mL, 加入到已加入 3 g/L 胆盐的 9 mL 人工肠液中, 在 37 °C、100 r/min 的恒温摇床中继续培养。在第 0、2、4、6、8、10 h 时间点进行取样, 检测乳酸菌、多酚和抗氧化指标。

1.3.3 消化后果汁提取物的制备

取经过模拟胃液、肠液及模拟胃肠道环境消化后的果汁 1 mL, 加入 1 mL 体积分数为 80% 的酸化甲醇水溶液, 超声 30 min 后, 15000 r/min 离心 20 min, 收集提取液, 检测多酚和抗氧化指标。

1.3.4 乳酸菌菌落数的测定

参考国标 GB 4789.35-2016 的方法进行乳酸菌菌落数的测定^[13]。

1.3.5 多酚含量的测定

采用 Folin-Ciocalteu 检测法^[14]。取稀释后的样品 1 mL, 加入 2 mL Folin-Ciocalteu 溶液, 再加入 2 mL 10% Na₂CO₃ 溶液, 室温条件下避光 1 h, 于 760 nm 处测定吸光值。以没食子酸为标准品绘制标准曲线。

1.3.6 清除 DPPH 自由基能力的测定

参考 Sokolletowska 等^[15]的方法进行。取适当稀释后的样品 50 μL, 加入 150 μL, 浓度为 0.2 mmol/L 的 DPPH 溶液, 混匀, 室温条件下避光反应 20 min, 用酶标仪测定波长 517 nm 处的吸光度。以 Trolox 为标准品, 测定不同质量浓度的 Trolox 对 DPPH 自由基的清除率, 并绘制标准曲线。样品对 DPPH 自由基清除

能力以 Trolox 当量表示, 以鲜质量计。DPPH 清除率按公式 (1) 计算。

$$\text{清除率} / \% = \frac{(A_1 - A_0) - (A_i - A_j)}{A_1 - A_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: A₁ 为对照组吸光度; A₀ 为试剂空白组吸光度; A_i 为样品组吸光度; A_j 为样品空白组吸光度。

1.3.7 样品 ABTS⁺能力的测定

参考 Re 等^[16]的方法略作修改。将 7 mmol/L 的 ABTS 溶液 (50 mL) 与 0.88 mL 140 mmol/L 的过硫酸钾溶液混合, 形成 ABTS 储备液。取适当稀释后的样品 10 μL, 加入 200 μL ABTS 溶液, 旋涡振荡 30 s 后, 在室温条件下避光反应 6 min, 用酶标仪测定波长 734 nm 处吸光度。以 Trolox 为标准品, 测定不同质量浓度的 Trolox 对 ABTS⁺的清除率, 绘制标准曲线。样品 ABTS⁺清除率按公式 (1) 计算。

1.3.8 三价铁离子还原能力的测定

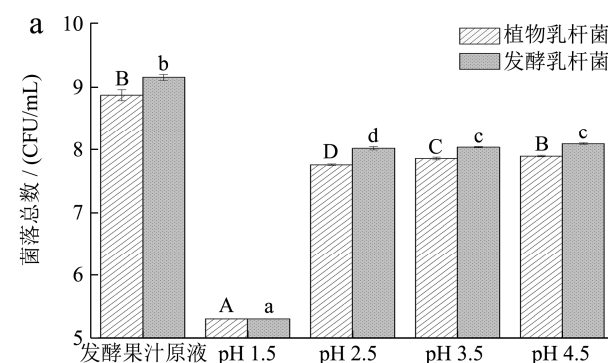
参考田燕等^[17]的方法进行。取适当稀释后的样品 1 mL, 加入 0.2 mL 0.2 mol/L PBS (pH 6.6) 和 1.5 mL 0.3% 铁氰化钾溶液, 混匀, 50 °C 孵育 20 min, 迅速冷却, 加入 1 mL 10% 的三氯乙酸, 混匀后 3000 r/min 离心 10 min, 取上清液 2 mL, 加入 0.5 mL 0.3% 三氯化铁溶液混匀, 再加 3 mL 纯水, 摇匀, 测定波长 700 nm 处的吸光度。以 Trolox 为标准品, 样品的铁离子还原能力以 Trolox 当量表示, 以鲜质量计。

1.4 数据处理

数据处理采用 SPSS 17.0 软件进行分析, 一元方差分析, 以 Duncan 法进行数据显著性分析, $p < 0.05$ 表示差异显著。实验重复 3 次, 结果以均值 ± 标准差表示, 并用 Origin 2017 软件制图。

2 结果与分析

2.1 果汁中乳酸菌体外消化耐受力分析



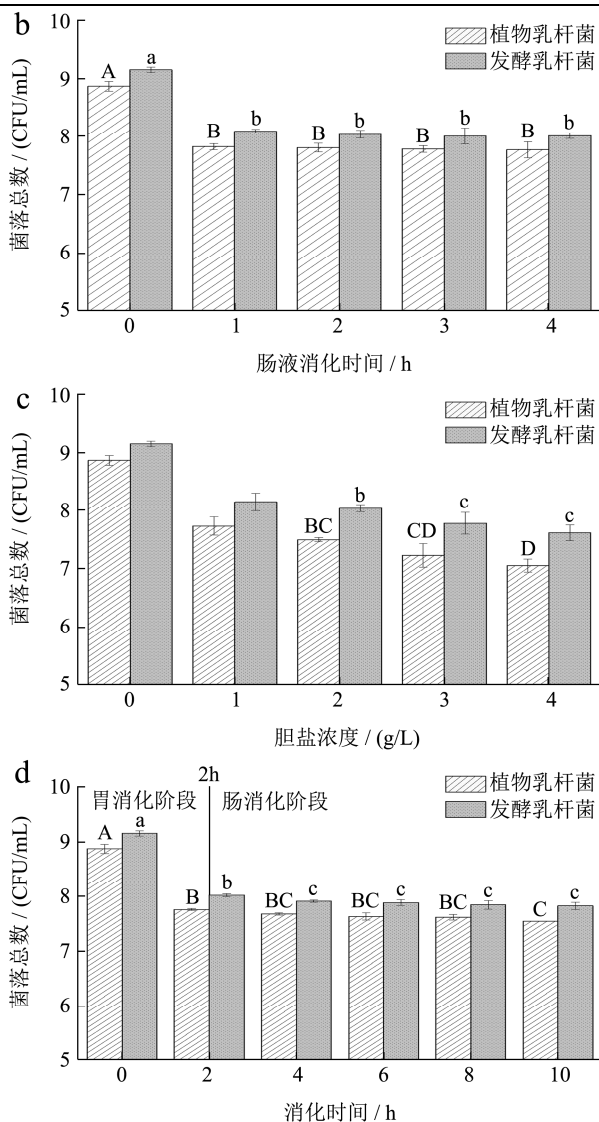


图1 毛酸浆发酵果汁模拟胃液、肠液、胆盐液及胃肠消化过程中菌落总数的变化

Fig.1 The viable counts of ferment *Physalis pubescens* L. juice in artificial gastric juice, artificial intestinal juice, artificial bile salt and simulated gastrointestinal digestion

注: a: 模拟胃消化; b: 模拟肠消化; c: 模拟胆盐液; d: 模拟胃肠消化过程; 大写字母为植物乳杆菌之间的显著差异 ($p < 0.05$), 小写字母为发酵乳杆菌的显著差异 ($p < 0.05$)。

2.1.1 胃液 pH 值的影响

胃液对于乳酸菌是一个极其严峻的生存环境, 探究胃液耐受性对于乳酸菌的筛选具有重要意义^[18]。通常空腹时人体内胃环境 pH 在 1.3~2.0 之间, 由于食物的缓冲能力不同, 食物的摄入会将胃的 pH 调节至 4.5 及以上^[19,20]。同时也有研究表明, 食物在胃中的排空时间与食物的物理性质相关, 流体食物的排空时间一般在 1~2 h^[21]。因此, 选取 pH 为 1.5、2、3、4, 消化时间为 2 h 的条件下对进行试验。图 1a 提示, 胃液 pH 与毛酸浆中乳酸菌残存量呈正相关 ($p < 0.05$)。毛酸浆

果汁经 pH 为 1.5、2、3、4 的胃液消化 2 h 后, 果汁中植物乳杆菌从 8.87 CFU/mL 分别下降为 5.30 CFU/mL、7.76 CFU/mL、7.85 CFU/mL 和 7.89 CFU/mL; 发酵乳杆菌的菌落总数从 15 CFU/mL 分别下降为 5.30 CFU/mL、8.02 CFU/mL、8.04 CFU/mL 和 8.09 CFU/mL。关小莺等^[22]对干酪乳杆菌发酵荔枝汁进行模拟消化, 也发现胃液 pH 下降, 乳杆菌的活菌数也随之下降。与本文研究结果一致。但毛酸浆中发酵乳杆菌及植物乳杆菌在 pH 为 1.5 的胃酸环境中的耐受力强于关小莺等所研究的干酪乳杆菌。pH 过低的环境下会破坏乳酸菌的自我保护机制, 是降低乳酸菌菌落数的原因之一^[23]。

2.1.2 肠液消化时间的影响

在空肠及十二指肠中胆盐浓度为 1~5 g/L^[24]。因此试验胆盐浓度设置为 0~4 g/L, 消化时间 1~4 h 的耐受力, 每小时取样一次进行菌落计数。图 1b 提示, 在消化 1 h 后植物乳杆菌与发酵乳杆菌的菌群数分别从 8.87 CFU/mL 和 9.15 CFU/mL 降低到 7.82 CFU/mL 和 8.09 CFU/mL。延长消化时间, 两种菌菌落数量变化不显著 ($p > 0.05$), 说明两种乳酸菌可在肠道内很好的存活。

2.1.3 胆盐浓度的影响

胆汁中含有大量胆盐, 通常胆盐会影响乳酸菌耐受性^[25,26]。本研究也发现, 胆盐添加量与毛酸浆果汁中乳酸菌菌落数呈负相关 (如图 1c)。两种乳酸菌能够耐受一定浓度的胆盐。胆盐浓度为 4 g/L 时, 消化 24 h, 果汁中发酵乳杆菌及植物乳杆菌菌落数分别为 7.06 CFU/mL 和 7.62 CFU/mL。

2.1.4 胃肠消化过程的影响

毛酸浆发酵果汁经体外模拟胃肠体系消化后, 发酵乳杆菌数量由胃液体系到肠液体系显著降低 ($p < 0.05$), 但与肠液消化时间长短无关 ($p > 0.05$); 但植物乳杆菌菌落总数由胃消化结束 (7.76 CFU/mL) 至 10 h 后肠液消化结束 (7.54 CFU/mL), 有显著性变化 ($p < 0.05$), 肠液消化 4 h~8 h 时菌落总数变化不显著。对比蔡静静等^[27]关于乳制品中的七种乳酸菌的耐受性研究结果, 本文选用的植物乳杆菌及发酵乳杆菌耐受性更强。总体来说, 两种乳酸菌在消化 10 h 后仍可较好适应胃肠道环境, 利于其在肠道内定植, 从而调节肠道菌群环境^[28]。

2.2 体外模拟消化过程中发酵毛酸浆果汁多酚变化规律

如图 2a 所示, 胃液 pH 值对毛酸浆果汁中多酚释放量影响显著 ($p < 0.05$)。pH 值在 1.5~4 间, 多酚含

量从 0.33 mg/mL 提高至 0.53 mg/mL, 因此, 胃液酸度降低利于多酚的释放。多酚是具有多种生理活性的植物化学物质^[29,30]。本文的研究结果显示, 在 pH 值 1.5~4 之间的胃液环境下, 毛酸浆多酚较消化前显著提高。这可能是由于酸性条件下, 多酚类物质发生水解导致某些苷类化合物转化成苷元, 增加多酚的含量^[31]。胃液中的胃蛋白酶一方面可以水解发酵果汁中的多酚与蛋白质结合形成的化学键, 如共价键与氢键等, 多酚由结合态变为游离态, 另一方面, 胃蛋白酶还会减弱细胞壁与酚酸之间相互作用的酯键, 从而利于酚酸类化合物的释放^[32]。

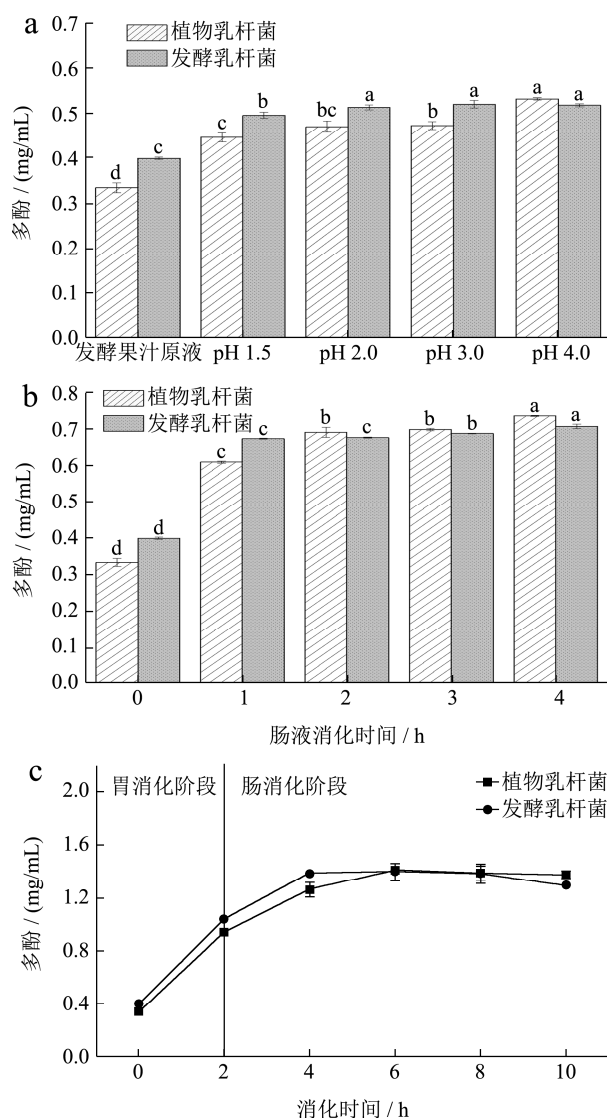


图2 毛酸浆发酵果汁模拟胃液、肠液、胆盐液及胃肠消化过程中多酚的变化

Fig.2 The polypheol of ferment *Physalis pubescens* L. juice in artificial gastric juice, artificial intestinal juice, artificial bile salt and simulated gastrointestinal digestion

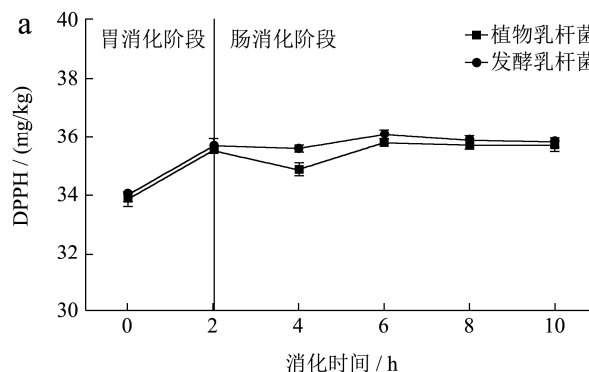
注: a: 模拟胃消化; b: 模拟肠消化; c: 模拟胃肠消化过程; 大写字母为植物乳杆菌之间不同表示差异显著($p<0.05$),

小写字母为发酵乳杆菌不同表示差异显著 ($p<0.05$)。

如图 2b 所示, 发酵毛酸浆果汁中的多酚释放量随肠液消化时间的延长而显著增加 ($p<0.05$)。在模拟胃肠消化过程中 (图 2c), 果汁在进入胃肠消化体系 4 h 内, 其多酚释放最为明显 ($p<0.05$), 此后变化不显著。与肠液消化阶段相比, 胃液是果汁释放多酚的主要阶段。消化前后相比, 两种毛酸浆乳酸菌发酵果汁中多酚含量菌可提高 1.45 倍及 1.29 倍, 菌种间变化无差异性。酚类化合物主要以酯类、糖苷类和化合物的形式存在于食物中, 不能以天然形式吸收^[32]。只有多酚类化合物分解形成高度亲脂性的苷元才可以通过生物膜然后被吸收^[33]。而当结合酚的释放达到平衡时, 多酚含量平衡, 不再发生显著性变化。这与饶雪甜等^[34]人的研究结论相一致。

2.3 体外模拟消化过程中发酵毛酸浆果汁抗氧化性变化规律

图 3 显示了毛酸浆发酵果汁 DPPH 自由基清除力、ABTS⁺、FRAP 等抗氧化指标变化情况。在模拟胃体外消化阶段, 毛酸浆发酵果汁的 DPPH·、ABTS⁺ 清除力和总还原力 (FRAP) 显著上升 ($p<0.05$)。植物乳杆菌分别上升了 4.92%、23.80% 及 41.32%, 发酵乳杆菌分别上升了 4.98%、15.55% 及 17.72%。模拟肠体外消化 2 h 内, 植物乳杆菌发酵果汁的三种抗氧化指标均显著降低 1.89%、14.67% 及 13.08% ($p<0.05$), 发酵乳杆菌发酵果汁的三种抗氧化指标则分别降低了 0.02%、19.71% 及 5.55%。此后果汁的两个自由基清除力指标变化不明显, 但还原力仍分别下降了 35.50% 和 27.1% ($p<0.05$)。本研究发现, 在模拟胃液消化阶段, 抗氧化与酚类的增加呈显著正相关。而在肠消化阶段, 虽然毛酸浆果汁中酚类物质增加, 但抗氧化性降低。这也许是由于, 从胃液到肠液, pH 值从酸性提升到中性, 一些化合物因敏感提供而引起的结构重组, 或者与食物成分结合形成新的复合物, 从而导致果汁抗氧化能力和还原力的降低^[35]。



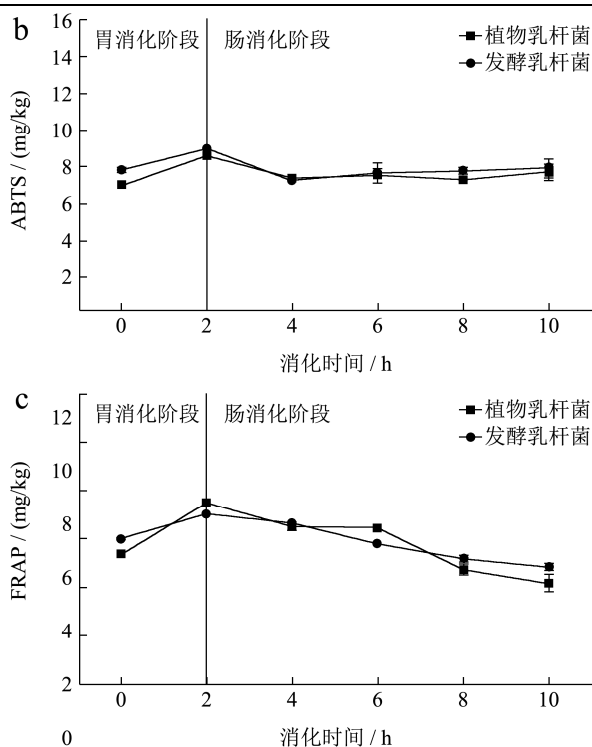


图3 毛酸浆发酵果汁模拟胃肠消化过程中抗氧化性的变化

Fig.3 The antioxidant properties of ferment *Physalis pubescens* L. juice in simulated gastrointestinal digestion

L. juice in simulated gastrointestinal digestion

注: a: DPPH 变化规律; b: ABTS⁺变化规律; c: FRAP 变化规律。

3 结论

本研究模拟体外胃肠道消化系统,对发酵毛酸浆果汁中的乳酸菌耐受性进行了评价,分析了消化后毛酸浆果汁的活性成分及抗氧化性的变化情况。研究中发现,毛酸浆乳酸菌发酵果汁经体外胃肠道消化后,植物乳杆菌及发酵乳杆菌菌群数量依旧可以保持在 7.54 CFU/mL 和 7.82 CFU/mL。经模拟胃液、肠液消化后,毛酸浆发酵果汁多酚含量由 0.33±0.01 mg/mL 及 0.40±0.03 mg/mL 提高了 45.15%及 29.20%;胃液消化后,抗氧化活性和还原力均有不同程度的提高,菌群环境耐受性强。该结论对乳酸菌发酵植物原料的功效性研究提供了参考。

参考文献

[1] Xiuli Zhao, Hengchao Liu, Yajing Wu, et al. Intervention with the crude polysaccharides of *Physalis pubescens* L. mitigates colitis by preventing oxidative damage, aberrant immune responses, and dysbacteriosis [J]. Journal of Food Science, 2020, 85(8): 2956-2607

[2] Annayara C F Fernandes, Angélica C de Souza, Cintia L Ramos, et al. Sensorial, antioxidant and antimicrobial

evaluation of vinegars from surpluses of physalis (*Physalis pubescens* L.) and red pitahaya (*Hylocereus monacanthus*) [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(5): 2267-2274

[3] Fan Yuqi, Mao Yiwei, Cao Shijie, et al. S5, a withanolide isolated from *Physalis pubescens* L., Induces G2/M cell cycle arrest via the EGFR/P38 pathway in human melanoma A375 cells [J]. Molecules (Basel, Switzerland), 2018, 23(12): 3175

[4] Chen Xiaoyong, Li Xiong, Zhang Xiaobo, et al. Antihyperglycemic and antihyperlipidemic activities of a polysaccharide from *Physalis pubescens* L. in streptozotocin (STZ)-induced diabetic mice.[J]. Food & function, 2019, 10(8): 4868-4876

[5] 卢嘉懿.乳酸菌发酵果蔬汁风味品质研究与控制[D].广州:华南理工大学,2019

LU Jia-yi. Changes and control on sensory quality of lactic acid bacteria fermented fruit and vegetable juices [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019

[6] Chunqing Ai, Na Ma, Qiuxiang Zhang, et al. Immunomodulatory effects of different lactic acid bacteria on allergic response and its relationship with *in vitro* properties [J]. Plos One, 2016, 11(10): e0164697

[7] 陈欢.新疆哈萨克族传统奶酪中乳酸菌发酵剂的筛选及对奶酪风味影响的研究[D].石河子:石河子大学,2019

CHEN Huan. Screening of lactic acid bacteria starter in Xinjiang Kazakh traditional cheese and its effect on cheese flavor [D]. Shihezi: Shihezi University, 2019

[8] ZHANG Wen-ming,WANG Hai-feng, GAO Kan, et al. *Lactobacillus reuteri* glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase functions in adhesion to intestinal epithelial cells [J]. Canadian Journal of Microbiology, 2015, 61(5): 373-380

[9] Dupont D, Alric M, Blanquet-Diot S, et al. Can dynamic *in vitro* digestion systems mimic the physiological reality [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(10): 1546-1562

[10] Minekus M, Alminger M, Alvito P, et al. A standardised static *in vitro* digestion method suitable for food: an international consensus [J]. Food Function, 2014, 5(6): 1113-1124

[11] Zhuang Guo, Jicheng Wang, Liya Yan, et al. *In vitro* comparison of probiotic properties of *Lactobacillus casei* Zhang, a potential new probiotic, with selected probiotic strains [J]. LWT-Food Science and Technology, 2009,42(10): 1640-1646

[12] Meg da Silva Fernandes, Fernando Sanches Lima, Daniele

- Rodrigues, et al. Evaluation of the isoflavone and total phenolic contents of kefir-fermented soymilk storage and after the *in vitro* digestive system simulation [J]. Food Chemistry, 2017, 229(15): 373-380
- [13] GB 4789.35-2016,食品安全国家标准 食品微生物学检验 乳酸菌检验[S]
- [14] Yuanshan Yu, Yujuan Xu, Jijun Wu, et al. Effect of ultra-high pressure homogenisation processing on phenolic compounds, antioxidant capacity and anti-glucosidase of mulberry juice [J]. Food Chemistry, 2014, 153(15): 114-120
- [15] Anna Sokół-Lętowska, Alicja Z Kucharska, Katarzyna Wińska, et al. Composition and antioxidant activity of red fruit liqueurs [J]. Food Chemistry, 2014, 157(15): 533-539
- [16] Roberta Re, Nicoletta Pellegrini, Anna Proteggente, et al. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay [J]. Free Radical Biology and Medicine, 1999, 26(9): 1231-1237
- [17] 田燕,邹波,董晓倩,等.不同聚合度柿子单宁的体内外抗氧化作用[J].食品科学,2013,34(13):54-60
TIAN Yan, ZOU Bo, DONG Xiao-qian, et al. *In vitro* and *in vivo* antioxidant activity of persimmon tannin fractions of different degrees of polymerization [J]. Food Science, 2013, 34(13): 54-60
- [18] 崔美岩,张淼,许宗为,等.乳酸菌在极端条件下抗逆性的研究进展[J].中国乳品工业,2016,44(5):28-31
CUI Mei-yan, ZHANG Miao, XU Zong-wei, et al. Research progress of lactic acid bacteria resistance under extreme conditions [J]. China Dairy Industry, 2016, 44(5): 28-31
- [19] Rihua Xu, Nan Shang, Pinglan Li. *In vitro* and *in vivo* antioxidant activity of exopolysaccharide fractions from *Bifidobacterium animalis* RH [J]. Anaerobe, 2011, 17(5): 226-231
- [20] K. Schulze. Imaging and modelling of digestion in the stomach and the duodenum [J]. Neurogastroenterology & Motility, 2006, 18(3): 172-183
- [21] Blanquet-Diot Stéphanie, Soufi Maha, Rambeau Mathieu, et al. Digestive stability of xanthophylls exceeds that of carotenes as studied in a dynamic *in vitro* gastrointestinal system [J]. The Journal of Nutrition, 2009, 139(5): 876-883
- [22] 关小莺,温靖,肖更生,等.干酪乳杆菌发酵荔枝汁在模拟胃肠道中耐受能力及其抑菌性的研究[J].现代食品科技,2019, 35(4):96-102
GUAN Xiao-ying, WEN Jing, XIAO Geng-sheng, et al. Antimicrobial activity of the litchi juice fermented by lactobacillus casei and the strain's tolerance in simulated gastrointestinal tract [J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(4): 96-102
- [23] Maarten van de Guchte, Pascale Serror, Christian Chervaux, et al. Stress responses in lactic acid bacteria [J]. Antonie van Leeuwenhoek, 2002, 82(1-4): 187-216
- [24] M Alminger, A M Aura, T Bohn, et al. *In vitro* models for studying secondary plant metabolite digestion and bioaccessibility [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2014, 13(4): 413-436
- [25] 张会生,熊涛.三株乳酸菌的鉴定及益生性能[J].南昌大学学报(理科版),2019,43(4):336-341
ZHANG Hui-sheng, XIONG Tao. Identification and probiotic properties of three strains of lactic acid bacteria [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2019, 43(4): 336-341
- [26] Ana Y Bustos, Graciela Font de Valdez, Silvina Fadda, et al. New insights into bacterial bile resistance mechanisms: the role of bile salt hydrolase and its impact on human health [J]. Food Research International, 2018, 112: 250-262
- [27] 蔡静静,张亚川,李谓,等.新疆伊犁地区乳制品中乳酸菌发酵和益生特性及其复合发酵方案优化[J].食品科学,2020, 41(18):172-179
CAI Jing-jing, ZHANG Ya-chuan, LI Xu, et al. Fermentation and probiotic properties of lactic acid bacteria isolated from dairy products in Yili, Xinjiang and optimization of their mixtures for mixed-culture fermentation [J]. Food Science, 2020, 41(18): 172-179
- [28] Ruiz Lorena, Margolles Abelardo, Sánchez Borja. Bile resistance mechanisms in *Lactobacillus* and *Bifidobacterium* [J]. Frontiers in Microbiology, 2013, 24(4): 396
- [29] Khaing zar Myint, Ke Wu, Yongmei Xia, et al. Polyphenols from *Stevia rebaudiana* (Bertoni) leaves and their functional properties [J]. Journal of Food Science, 2020, 85(2): 240-248
- [30] Miller, Ruiz-Larrea. Flavonoids and other plant phenols in the diet: their significance as antioxidants [J]. Journal of Nutritional & Environmental Medicine, 2009, 12(1): 39-51
- [31] 邓娜,乔沈,高芯,等.响应面试验优化石榴皮多酚提取工艺及石榴不同部位多酚的抗氧化活性分析[J].食品科学,2016, 37(6):39-43
DENG Na, QIAO Shen, GAO Xin, et al. Optimization of extraction process of polyphenols from pomegranate peel by response surface methodology and antioxidant activity analysis of polyphenols in different parts of pomegranate fruit [J]. Food Science, 2016, 37(6): 39-43