

蓝莓汁乳酸菌的发酵特性

吴万林^{1,2}, 余元善², 肖更生², 徐玉娟², 吴继军², 李璐², 邹波², 邹颖²

(1. 华南农业大学食品学院, 广东广州 510642) (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: 蓝莓汁中分别接种干酪乳杆菌、保加利亚乳杆菌、植物乳杆菌和嗜酸乳杆菌进行发酵, 比较蓝莓汁发酵过程中乳酸菌活菌数、pH 值、总滴定酸、总糖、还原糖、总花色苷、总酚、抗氧化能力和色泽等变化。结果表明, 蓝莓汁营养丰富, 上述各种乳酸菌均能在蓝莓汁中正常生长, 发酵 24 h, 活菌数达 8.10 lg cfu/mL 以上; 此外, 植物乳杆菌和嗜酸乳杆菌产酸能力均强于其它两种乳酸菌, 可滴定酸含量均超过 10.29 g/L, 而植物乳杆菌对蓝莓汁中糖的消耗能力最强, 总糖的残留量为 40.26%; 在花色苷和总酚的保留率以及抗氧化能力等方面, 植物乳杆菌和嗜酸乳杆菌也要优于其它两种乳酸菌。植物乳杆菌与嗜酸乳杆菌单独发酵和混合发酵时蓝莓汁营养品质的差异分析表明, 单独发酵组与混合发酵组在抗氧化能力和总酚的保留上无明显差异, 但混合发酵组在花色苷和色泽的保留方面明显优于单独发酵组。综上所述, 蓝莓汁应以植物乳杆菌与嗜酸乳杆菌混合发酵为宜。

关键词: 蓝莓汁; 混合发酵; 植物乳杆菌; 嗜酸乳杆菌

文章篇号: 1673-9078(2020)03-159-166

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.3.021

Fermentation Characteristics of Lactic Acid Bacteria in Blueberry Juice

WU Wan-lin^{1,2}, YU Yuan-shan², XIAO Geng-sheng², XU Yu-juan², WU Ji-jun², LI Lu², ZOU Bo², ZOU Ying²

(1. College of Food Science South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

(2. Sericultural & Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China)

Abstract: The blueberry juice was inoculated with *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus bulgaricus*, *Lactobacillus plantarum* and *Lactobacillus acidophilus* to compare the viable bacteria count, pH value, total titration acid, total sugar, reducing sugar, total Anthocyanins, total phenolics, antioxidant capacity and color change respectively. The results showed that the blueberry juice was rich in nutrients, and all the above lactic acid bacteria grew well in blueberry juice. After 24 h of fermentation, the viable counts reached 8.10 lg cfu/mL or more; in addition, the acid-producing abilities of *L. plantarum* and *L. acidophilus* were stronger than those of the other two lactic acid bacteria, and the titratable acid reached above 10.29 g/L, while *L. plantarum* had the strongest ability to consume sugar in blueberry juice, and the residual total sugar was 40.26%; *L. plantarum* and *L. acidophilus* were also superior to the other two lactic acid bacteria in terms of the retention rate of anthocyanins, total phenols and antioxidant capacity. The difference of nutrient quality of blueberry juice between *L. plantarum* and *L. acidophilus* in single and mixed fermentation showed that there was no significant difference in antioxidant capacity and total phenol retention between the two groups, the mixed fermentation group was significantly superior to the single fermentation group in the retention of anthocyanins and color. In conclusion, the mixed fermentation of *L. plantarum* and *L. acidophilus* should be suitable for blueberry juice.

Key words: blueberry juice; mixed fermentation; *L. plantarum*; *L. acidophilus*

引文格式:

吴万林, 余元善, 肖更生, 等. 蓝莓汁乳酸菌的发酵特性 [J]. 现代食品科技, 2020, 36(3): 159-166

WU Wan-lin, YU Yuan-shan, XIAO Geng-sheng, et al. Fermentation characteristics of lactic acid bacteria in blueberry juice [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(3): 159-166

收稿日期: 2019-09-25

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0400703); 广东省自然科学基金团队项目 (2015A030312001); 广州市科技民生科技攻关项目 (201803020007)

作者简介: 吴万林 (1994-), 男, 在读硕士研究生, 研究方向: 食品工程

通讯作者: 肖更生 (1965-), 男, 研究员, 研究方向: 农产品加工

蓝莓(*Vaccinium Spp*), 属杜鹃花科, 越橘属植物, 原产于北美洲和东亚, 果实呈蓝色, 果肉细腻, 口感极佳^[1]。蓝莓果实中含有丰富的营养成分, 尤其富含花青素, 它不仅具有良好的营养保健作用, 还具有防止脑神经老化、强心、抗癌、软化血管、增强人体免疫等功能, 有“浆果之王”和“人类五大健康食品之一”等美誉^[2]。蓝莓传统上多作为鲜果食用, 然而蓝莓果皮薄且含水量高, 采摘和包装贮运过程中容易形成机械伤害和微生物侵染而引发腐烂变质, 对其食用价值和经济价值均造成较大损失^[3]。目前, 以蓝莓为原料的产品种类单一, 主要包括蓝莓果汁、果酒、果酱、果脯和糖果等^[4]。但随着经济的增长和人们生活水平的提高, 对蓝莓加工产品的需求也与日俱增, 单一的蓝莓产品已不能满足广大人们的需求。

乳酸菌主要用于乳制品中, 以凝固型发酵乳和各种乳饮料为代表, 具有调节胃肠道菌群, 维持人体器官微生态平衡, 促进食物消化, 改善胃肠道功能, 降低胆固醇, 提高身体免疫力等多种功能和优点^[5]。近年来, 随着消费者对低脂、低糖、不含胆固醇饮食的日益关注, 采用乳酸菌发酵的果蔬汁饮料产品受到人们的青睐, 关于乳酸菌发酵果蔬汁饮料的研究也越来越多。Panda 等^[6]采用发酵乳杆菌发酵花椒梨汁, 将其与新鲜果汁进行对比分析, 发酵果汁在口感、风味等各方面都优于原汁。张丽华等^[7]研究发现乳酸菌发酵不仅能改善红枣汁的色泽, 还能较好地保留红枣汁中抗坏血酸和多酚等抗氧化物质; Di Cagon 等^[8]研究发现乳酸菌发酵可以增加石榴汁的风味物质含量和种类; 袁星星等^[9]研究发现乳酸菌发酵不仅能降低三华李汁的酸度, 而且很好地保留了三华李本身的营养物质; 束文秀等^[10,11]发现胡柚汁分别接种植物乳杆菌 L1 和发酵乳杆菌 L2 发酵后, 不仅能显著提高胡柚汁的抗氧化性, 还丰富了胡柚汁的风味。但目前, 关于蓝莓汁乳酸菌发酵饮料的报道还比较少, 如果将蓝莓汁经乳酸菌发酵, 在保留蓝莓汁本身含有的丰富营养物质和抗氧化物质的基础上, 给蓝莓汁增添多种功能因子并带来独特的发酵风味, 这对于提高人们健康水平、拓展蓝莓加工途径和增加饮料品种有着重要的意义。

本研究选用鲜榨并经灭菌的蓝莓汁为原料, 分别接种四种不同乳酸菌进行发酵, 探究初始 pH 对不同乳酸菌在蓝莓汁中生长的影响, 以及发酵过程蓝莓汁中乳酸菌的活菌数、pH 值、可滴定酸、总糖、还原糖、总花色苷、总酚、抗氧化能力和色差等变化, 以期为研发新型功能性蓝莓汁乳酸菌发酵饮料提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与主要试剂

新鲜蓝莓, 产地辽宁大连; 嗜酸乳杆菌(*L. acidophilus*)、干酪乳杆菌(*L. casei*)、保加利亚乳杆菌(*L. bulgaricus*)和植物乳杆菌(*L. plantarum*)购自于上海润盈生物工程有限公司; 果胶酶, 购自于烟台市帝伯仕自酿机有限公司; MRS 培养基和肉汤培养基, 购自于广东环凯微生物科技有限公司; 碳酸钠, 购自于天津市福晨化学试剂厂; 无水乙醇和苯酚, 购自于天津市科密欧化学试剂有限公司; 浓硫酸, 购自于天津市进丰化工有限公司。其他试剂均为国产分析纯。

1.2 主要仪器与设备

SPX-250B-Z 生化培养箱、YXQ-LS-50S 型立式蒸汽灭菌锅, 上海博讯实业有限公司医疗设备厂; 无菌操作台, 苏净集团苏州安康空气技术有限公司; LLJ-206J 型多功能料理机, 江门市贝尔斯顿电器有限公司; PB-10 型 pH 计, Sartorius 公司; UV1800 型紫外可见分光光度计, 日本岛津; Infinite M200PRO 型酶标仪, 瑞士 TECAN 公司。

1.3 蓝莓汁的制备

新鲜蓝莓用打浆机打浆, 并加入蓝莓质量 0.05% 的果胶酶, 在 50 °C 水浴条件下酶解 1 h, 过滤, 滤液装入复合铝箔袋中, 贮藏于-20 °C 库中备用。

1.4 乳酸菌培养物的制备

将四种乳酸菌的保藏培养物分别置于 MRS 肉汤中进行活化复壮, 活化复壮后再在 MRS 肉汤中 37 °C 培养 18 h。

1.5 初始 pH 对不同乳酸菌在蓝莓汁中生长的影响

蓝莓汁常温解冻, 向蓝莓汁中添加碳酸钠, 将其 pH 值调节至 3.5~5.0 之间, 各种不同 pH 的蓝莓汁经 95 °C 水浴灭菌 10 min, 冷却至室温后分别接入体积分数为 1% 的各种乳酸菌培养物(接种量为 6.35 lg cfu/mL), 置于 37 °C 培养箱中培养, 24 h 后取样, 测定蓝莓汁中乳酸菌的活菌数。

1.6 蓝莓汁的发酵培养

蓝莓汁常温解冻, 向蓝莓汁中添加碳酸钠调节 pH 至适宜值, 经 95 °C 水浴灭菌 10 min 后, 置于无菌操作台中, 分别在已灭菌的 500 mL 三角瓶中加入 400

mL 蓝莓汁, 每瓶分别接入体积分数为 1% 的各种乳酸菌培养物(接种量为 $6.35 \lg \text{cfu/mL}$), 置于 37°C 培养箱中, 每隔 12 h 取样测定相应的微生物和理化指标。

1.7 测定方法

1.7.1 乳酸菌活菌数的测定

采用稀释倒平板法, 具体原理及步骤参考 GB 4789-2016 中乳酸菌菌落总数的测定方法^[12]。

1.7.2 pH 和可滴定酸的测定

pH 值的测定采用 pH 计直接测定; 可滴定酸测定及计算方法参考 GB/T 12456-2008 食品中总酸的测定, 含量以乳酸计^[13]。

1.7.3 糖组分的测定

总糖采用苯酚硫酸法测定, 结果以葡萄糖含量计算^[14]; 还原糖采用 DNS 法测定, 结果以葡萄糖含量计算^[15]。

1.7.4 总花色苷含量的测定

采用 pH 示差法对总花色苷进行测定, 参考文献^[16]方法, 并作适当改动。样品用 1% 的盐酸甲醇溶液稀释 10 倍后分别移取 2 mL 样品于两个试管中, 分别加入 8 mL 的 pH 1.0 的 KCl 溶液 (0.025 mol/L) 和 pH 4.5 的 CH_3COONa (0.4 mol/L), 混匀, 室温避光放置 15 min, 于 510 nm 和 700 nm 处进行吸光度检测。总花色苷按如下公式进行计算。

$$\text{最终吸光值} A = (A_{510} - A_{700})_{\text{pH}1.0} - (A_{510} - A_{700})_{\text{pH}4.5}$$

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

式中: A_{510} 、 A_{700} 分别为 510 nm 和 700 nm 处的吸光值; $MW=449.2$; DF =溶液稀释倍数; $\epsilon=26900$; l 为路径长度常数。

1.7.5 总多酚含量的测定

参照 Folin Ciocalteu 法^[17]进行测定, 结果以没食子酸当量表示。

1.7.6 DPPH 自由基清除能力的测定

参考文献^[18]的方法, 并做适当调整。取稀释后的样品 $50 \mu\text{L}$, 加入 $150 \mu\text{L}$ DPPH 溶液 (0.2 mmol/L), 混匀后在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, 实验同时设试剂空白组 (无水乙醇)、对照组 (以等体积甲醇代替样品)、样品空白组 (以等体积无水乙醇代替 DPPH 溶液)。DPPH 清除率按下式计算。

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

式中: A_1 为对照组吸光度; A_0 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。

1.7.7 色差的测定

采用全自动色差仪 (透视模式) 测定发酵蓝莓汁样品的色泽, 以未发酵蓝莓汁作为参比液, 结果以总色差 ΔE^* 计^[19], 计算公式为:

$$\Delta E^* = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2}$$

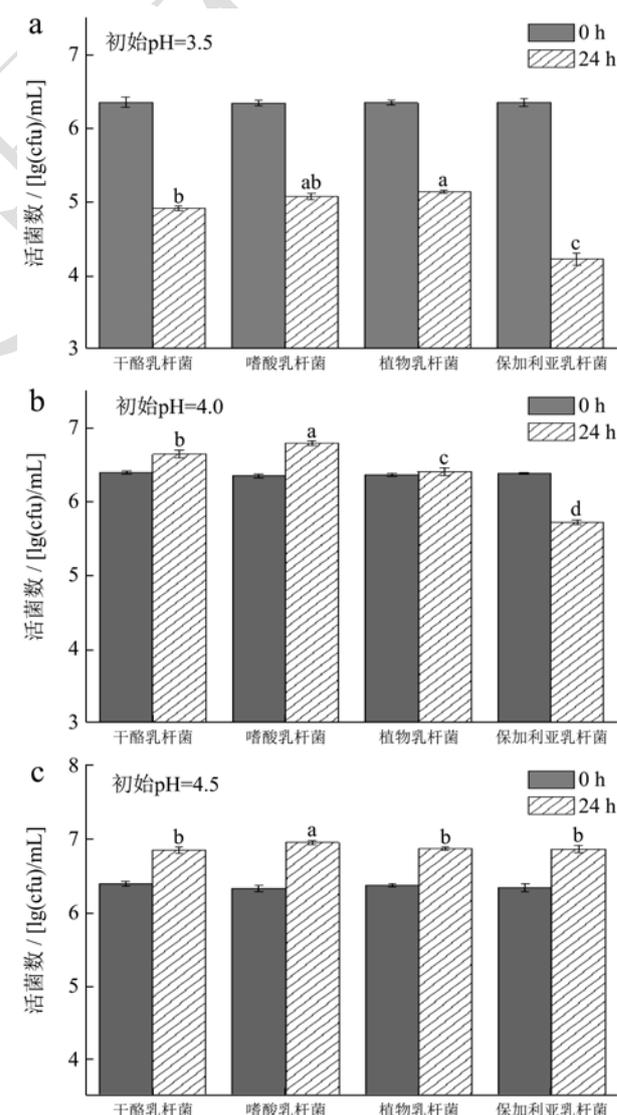
式中: L_0 、 a_0 、 b_0 为未发酵蓝莓汁的 Hunter 参数; L 、 a 、 b 为发酵蓝莓汁的 Hunter 参数。

1.7.8 数据处理与分析

以上测定均重复 3 次, 全部实验数据以均值 \pm 标准差表示, 用 SPSS 23 和 Origin 8.5.1 软件对实验数据进行统计分析和图形绘制。

2 结果与讨论

2.1 初始 pH 值对不同乳酸菌在蓝莓汁中生长的影响



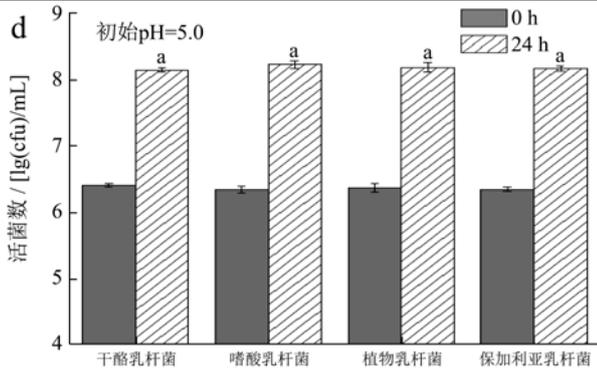


图1 乳酸菌在不同初始 pH 的蓝莓汁中活菌数的对比

Fig.1 Comparison of viable counts of lactic acid bacteria in blueberry juice at different initial pH

注：a、b、c 表示不同组之间的显著性差异 ($p < 0.05$)。

图1反映的是在不同初始 pH 下，四种不同乳酸菌在蓝莓汁中培养 0 h 和 24 h 的活菌数对比。由图 1a 可知，当初始 pH 为 3.5 时，在蓝莓汁中培养 24 h 的四种乳酸菌的活菌数均低于其初始接菌量 (6.35 lg cfu/mL)，这表明四种乳酸菌在初始 pH 为 3.5 的蓝莓汁中生长均受到抑制。其中，保加利亚乳杆菌 24 h 时的活菌数明显低于其它三种乳酸菌，这表明其耐酸能力最弱。由图 1b 可知，当蓝莓汁的初始 pH 为 4.0 时，干酪乳杆菌、嗜酸乳杆菌和植物乳杆菌在 24 h 时的活菌数略高于其初始接菌量，表明在初始 pH 为 4.0 时，这三种乳酸菌均能在蓝莓汁生长，但生长并不好。而保加利亚乳杆菌在初始 pH 为 4.0 时的蓝莓汁中依然不能正常生长，再次表明保加利亚乳杆菌在这四种乳酸菌中耐酸能力最弱。由图 1c、d 可知，当初始 pH ≥ 4.5 ，四种乳酸菌均能在蓝莓汁中正常生长，而蓝莓汁的初始 pH 为 5.0 时，四种乳酸菌培养 24 h 的活菌数明显高于初始 pH 为 4.5 时的活菌数，这表明初始 pH 为 5.0 的蓝莓汁更加适合这四种乳酸菌的生长。

2.2 蓝莓汁发酵过程中活菌数的变化

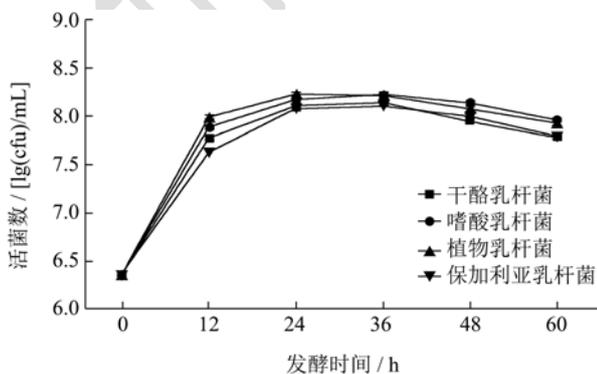


图2 蓝莓汁发酵过程中活菌数的变化

Fig.2 Changes in viable counts during fermentation of blueberry juice

由图2可知，四种乳酸菌经过前期的活化、复壮，再接种到蓝莓汁中，迅速进入对数生长期，0~24 h，乳酸菌活菌数呈指数增长，四种乳酸菌的生长速度存在显著性差异 ($p < 0.05$)，其中，植物乳杆菌和嗜酸乳杆菌的生长速度较快，发酵 12 h 时，活菌数分别可达 7.99 lg cfu/mL 和 7.88 lg cfu/mL，而保加利亚乳杆菌的生长速度最慢，发酵 12 h 时，其活菌数为 7.62 lg cfu/mL，显著低于其它三种乳酸菌。发酵 24 h 后，蓝莓汁中各种乳酸菌的活菌数趋于稳定，四种乳酸菌的活菌数均可达到 8.10 lg cfu/mL 以上。

2.3 蓝莓汁发酵过程中 pH 和可滴定酸度的变化

由图3可知，在整个发酵过程中，四种蓝莓汁中的 pH 值均呈下降趋势；发酵 36 h 后，四种发酵蓝莓汁中的 pH 值趋于稳定。其中，嗜酸乳杆菌、植物乳杆菌和保加利亚乳杆菌发酵的蓝莓汁的 pH 可降到 4.2 以下，而干酪乳杆菌发酵的蓝莓汁的 pH 值下降幅度最小，仅下降了 0.7。这表明四种乳酸菌在蓝莓汁发酵过程中均会产酸，其中嗜酸乳杆菌、植物乳杆菌和保加利亚乳杆菌发酵产酸能力较强。

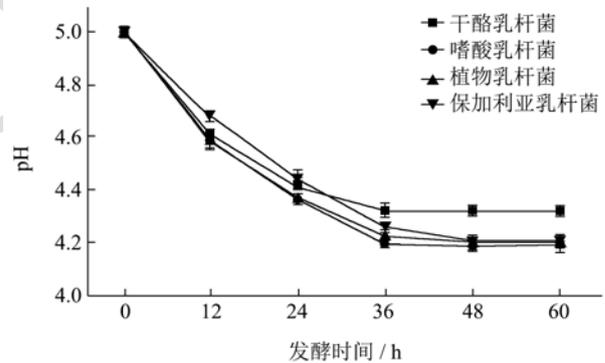


图3 不同乳酸菌发酵蓝莓汁的过程中 pH 的变化

Fig.3 Changes in pH during the fermentation of blueberry juice by various lactic acid bacteria

由图4可知，在四种乳酸菌发酵蓝莓汁的过程中，产生的可滴定酸均呈上升的趋势。在 0~36 h，四种蓝莓汁中的可滴定酸含量均迅速上升；发酵 36 h 后，四种蓝莓汁中的可滴定酸含量趋于稳定，其中，植物乳杆菌和嗜酸乳杆菌发酵的蓝莓汁可滴定酸含量无显著性差异 ($p > 0.05$)，均可达 10.29 g/L 以上，而保加利亚乳杆菌和干酪乳杆菌发酵的蓝莓汁可滴定酸含量存在显著性差异 ($p < 0.05$)，最高分别可达 9.85 g/L 和 9.21 g/L，均显著低于植物乳杆菌和嗜酸乳杆菌发酵的蓝莓汁。

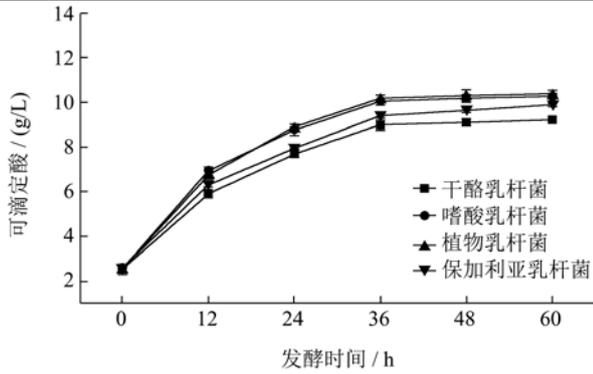


图4 不同乳酸菌发酵蓝莓汁的过程中可滴定酸的变化

Fig.4 Changes in titratable acid during the fermentation of blueberry juice by various lactic acid bacteria

2.4 蓝莓汁发酵过程中总糖和还原糖的变化

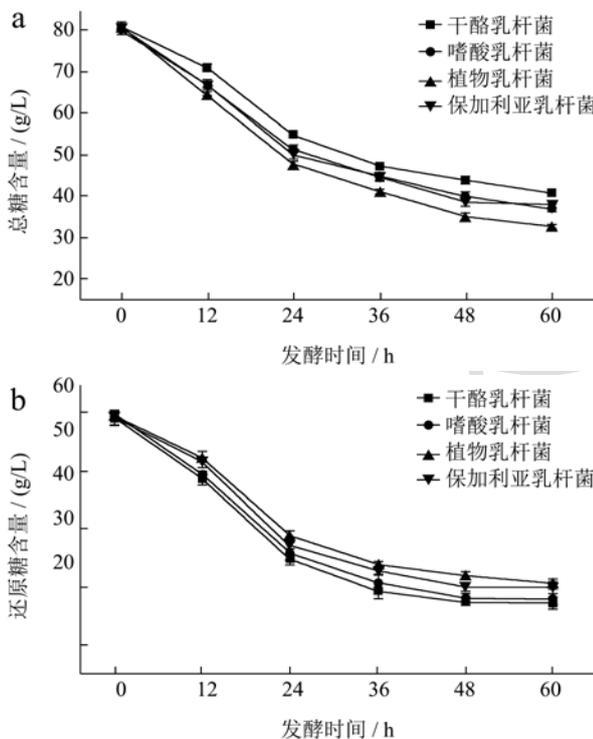


图5 不同乳酸菌发酵蓝莓汁的过程中总糖和还原糖的变化

Fig.5 Changes in total sugar and reducing sugar during the fermentation of blueberry juice by various lactic acid bacteria

图5反映的是不同乳酸菌发酵蓝莓汁的过程中总糖和还原糖的变化。从图5a可以看出,在整个发酵过程中,四种蓝莓汁中总糖的含量均呈下降趋势,且下降趋势一致。0~24 h,四种蓝莓汁中总糖的含量均下降,这是因为在这个时间段四种乳酸菌处于对数生长期,需要消耗大量的糖。发酵24 h后,四种蓝莓汁中总糖含量虽继续下降,但下降速率放缓,这可能是因为乳酸菌发酵产酸,使蓝莓汁的pH降低,而较低的pH反过来抑制了乳酸菌消耗糖的能力。当发酵到达终点时,干酪乳杆菌发酵的蓝莓汁中总糖的残留量最高,

为40.88 g/L;干酪乳杆菌和保加利亚乳杆菌发酵的蓝莓汁中总糖的残留量接近,为37.38 g/L;而植物乳杆菌发酵的蓝莓汁中总糖的残留量最低,为32.39 g/L。这表明植物乳杆菌消耗糖的能力强于其它三种乳酸菌。

由图5b可知,在整个发酵过程中,四种蓝莓汁的还原糖消耗趋势与总糖的下降趋势基本一致,并且,当发酵到达终点时,四种蓝莓汁中还原糖的残留量与总糖的残留量相差不大,这说明四种乳酸菌在蓝莓汁的发酵过程中主要消耗的是还原糖。

2.5 蓝莓汁发酵过程中总花色苷的变化

蓝莓汁中的花色苷是其呈色物质和功能性成分,大部分以单体的形式存在。由图6可知,在乳酸菌发酵蓝莓汁的过程中,随着发酵周期的延长,四种蓝莓汁的总花色苷含量整体呈现下降趋势,这是因为发酵环境中氧气含量和微生物的代谢作用会使花色苷含量减少^[20]。0~12 h,由于蓝莓汁中含氧量较高以及处于对数生长阶段的乳酸菌更加旺盛的代谢作用,四种蓝莓汁的总花色苷含量下降速率是最快的。当发酵进行48 h后,四种蓝莓汁的总花色苷含量基本趋于稳定,其中嗜酸乳杆菌发酵的蓝莓汁总花色苷含量最高,为167.37 mg/L,保留率可达79.86%,而干酪乳杆菌发酵的蓝莓汁总花色苷含量最低,为139.13 mg/L,保留率为64.10%,植物乳杆菌和保加利亚乳杆菌发酵的蓝莓汁总花色苷含量和保留率则介于这两者之间。这表明在四种乳酸菌中嗜酸乳杆菌在发酵蓝莓汁的过程中保留花色苷的能力最强。

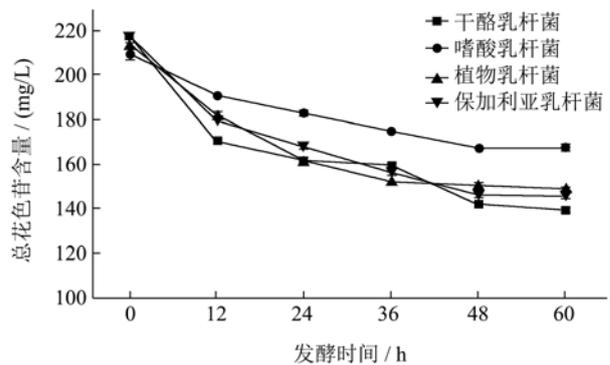


图6 不同乳酸菌发酵蓝莓汁的过程中总花色苷的变化

Fig.6 Changes in total anthocyanins during the fermentation of blueberry juice by various lactic acid bacteria

2.6 蓝莓汁发酵过程中总酚的变化

由图7可知,在整个发酵过程中,四种蓝莓汁的总酚含量均呈下降趋势。0~12 h,各组发酵蓝莓汁的总酚含量下降速率较快,有研究表明,发酵前期总酚

的快速下降可能与果汁的多酚类物质被残留的氧气氧化有关^[17,19]。随着发酵的进行, 各组发酵蓝莓汁的总酚含量持续下降, 36 h 后, 干酪乳杆菌和植物乳杆菌发酵的蓝莓汁总酚含量趋于稳定, 而嗜酸乳杆菌和保加利亚乳杆菌发酵的蓝莓汁总酚含量继续下降。当发酵到达终点时, 四种蓝莓汁的总酚含量有明显差异, 其中植物乳杆菌发酵的蓝莓汁的总酚含量最高, 为 878.12 mg/L, 保留率为 78.25%, 而干酪乳杆菌发酵的蓝莓汁的总酚含量最低, 为 783.20 mg/L, 保留率为 70.71%, 嗜酸乳杆菌和保加利亚乳杆菌发酵的蓝莓汁总酚含量和保留率接近, 介于上述两者之间。这表明在四种乳酸菌中植物乳杆菌在发酵蓝莓汁的过程中保留总酚的能力最强。

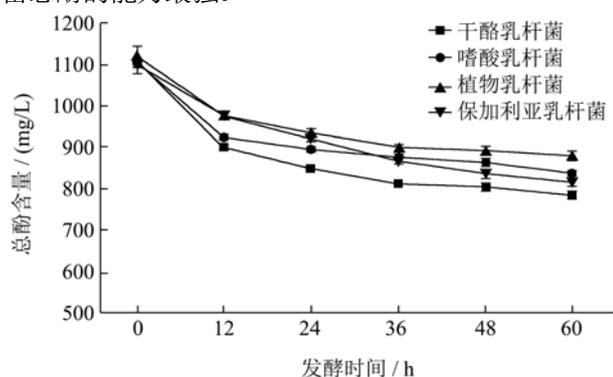


图 7 不同乳酸菌发酵蓝莓汁的过程中总酚的变化

Fig.7 Changes in total phenols during the fermentation of blueberry juice by various lactic acid bacteria

2.7 蓝莓汁发酵过程中抗氧化活性的变化

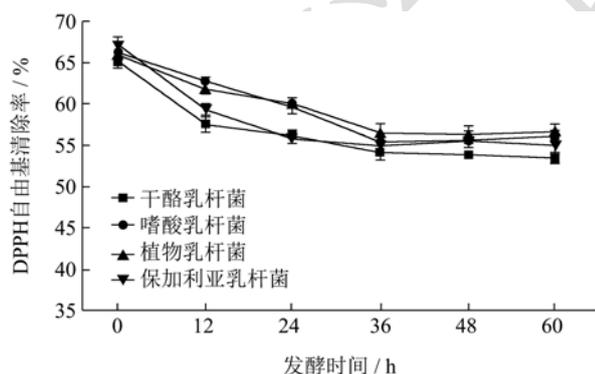


图 8 不同乳酸菌发酵蓝莓汁的过程中 DPPH 自由基清除率的变化

Fig.8 Changes in DPPH free radical scavenging rate during the fermentation of blueberry juice by various lactic acid bacteria

本研究选用了 DPPH 自由基清除能力的方法来评价发酵过程中蓝莓汁抗氧化活性的变化。由图 8 可知, 发酵过程中各组蓝莓汁的 DPPH 自由基清除率随发酵的进行呈一直下降的趋势, 这与花色苷和总酚含量的变化趋势相似。在 0~12 h, 干酪乳杆菌和保加利亚乳

杆菌发酵的蓝莓汁 DPPH 自由基清除率下降速率明显快于其他两种乳酸菌; 发酵 36 h 时, 各组蓝莓汁的 DPPH 自由基清除率下降至最低值, 随后趋于平衡。当发酵结束后, 植物乳杆菌和嗜酸乳杆菌发酵的蓝莓汁 DPPH 自由基清除率分别下降了 9.25% 和 9.93%, 而干酪乳杆菌和保加利亚乳杆菌发酵的蓝莓汁 DPPH 自由基清除率分别下降了 11.67% 和 12.14%, 表明植物乳杆菌和嗜酸乳杆菌发酵蓝莓汁要比其他两种乳酸菌更有效保持蓝莓汁的抗氧化活性。

2.8 蓝莓汁发酵过程中色差的变化

由图 9 可以看出, 在整个发酵过程中, 四种不同乳酸菌发酵的蓝莓汁的色差值大体上均呈增大的趋势。其中, 发酵 60 h 时, 干酪乳杆菌发酵的蓝莓汁的色差值最大, 为 5.87; 而植物乳杆菌发酵的蓝莓汁的色差值最小, 为 4.09, 嗜酸乳杆菌和保加利亚乳杆菌发酵的蓝莓汁的色差值比较接近, 为 4.66。

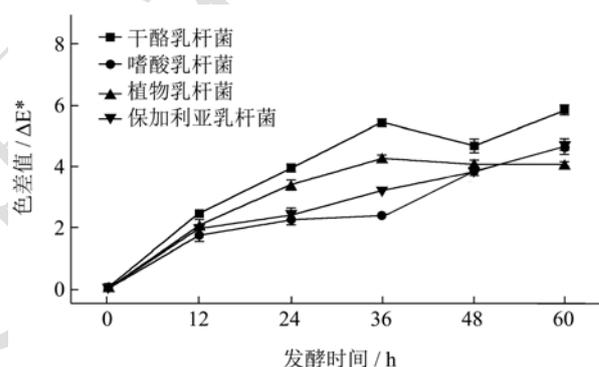


图 9 不同乳酸菌发酵蓝莓汁的过程中色差的变化

Fig.9 Changes in chromatic aberration during the fermentation of blueberry juice by various lactic acid bacteria

2.9 单独发酵和混合发酵蓝莓汁营养品质的

差异分析

植物乳杆菌和嗜酸乳杆菌在四种乳酸菌发酵蓝莓汁过程中糖消耗能力、产酸能力、花色苷和总酚的保留以及抗氧化活性等方面均优于其它两种乳酸菌, 故本研究选择了植物乳杆菌与嗜酸乳杆菌混合发酵蓝莓汁, 并与各自单独发酵的蓝莓汁进行营养品质的比较。

表 1 表示的是植物乳杆菌与嗜酸乳杆菌单独发酵和混合发酵时蓝莓汁营养品质的差异。由表 1 可知, 与未发酵的蓝莓汁相比, 三组发酵蓝莓汁中的花色苷和总酚含量均显著降低, 其中, 花色苷含量存在显著性差异, 混合发酵组的蓝莓汁总花色苷含量最高, 为 175.64 mg/L; 混合发酵组的蓝莓汁总酚含量与植物乳杆菌单独发酵的蓝莓汁总酚含量无显著性差异, 但均

比嗜酸乳杆菌单独发酵的蓝莓汁总酚含量高; 三组蓝莓汁的 DPPH 自由基清除率均显著降低, 但三者之间无显著性差异; 此外, 与未发酵的蓝莓汁相比, 三组

发酵蓝莓汁的总色差明显增大, 并且存在显著性差异, 其中混合发酵组的蓝莓汁总色差最小。

表 1 单独发酵和混合发酵蓝莓汁营养品质的差异

Table 1 Differences in nutritional quality of blueberry juice between single fermentation and mixed fermentation

项目	总花色苷/(mg/L)	总酚/(mg/L)	DPPH 清除率/%	ΔE^*
初始含量	214.38±1.12 ^a	1107.69±14.96 ^a	66.03±0.84 ^a	-
植物乳杆菌	148.81±0.76 ^d	877.36±9.14 ^b	56.70±0.91 ^b	4.08±0.12 ^b
嗜酸乳杆菌	168.29±1.27 ^c	837.20±6.72 ^c	55.98±0.75 ^b	4.70±0.10 ^a
植物乳杆菌+嗜酸乳杆菌	175.64±1.06 ^b	873.43±8.24 ^b	56.43±0.59 ^b	3.52±0.09 ^c

注: 同一列右肩字母不同表示显著性差异 ($p < 0.05$)。

3 结论

蓝莓汁中不同初始 pH 值对四种乳酸菌的生长具有较大影响, 较高的 pH 值利于菌株的生长, 当 pH 值高于 4.5 时, 四种乳酸菌均能正常生长, 其中, 嗜酸乳杆菌耐酸能力最强。在蓝莓汁发酵过程中, 四种乳酸菌均能产酸, 其中植物乳杆菌和嗜酸乳杆菌的产酸能力较强。此外, 植物乳杆菌消耗总糖和还原性糖的能力也优于其他三种乳酸菌。而在四种蓝莓汁发酵过程中蓝莓汁中的总花色苷含量、总酚含量和抗氧化活性均呈下降趋势, 并且四种乳酸菌表现出来的能力差异很大, 其中嗜酸乳杆菌和植物乳杆菌在蓝莓汁发酵过程中对总花色苷含量、总酚含量及抗氧化活性保留方面具有优势。最后, 对植物乳杆菌与嗜酸乳杆菌单独发酵和混合发酵时蓝莓汁营养品质的差异进行分析, 在抗氧化能力和总酚的保留上, 混合发酵组与单独发酵组无明显差异, 但在花色苷和色差的保留率方面, 混合发酵组明显优于单独发酵组。综上所述, 蓝莓汁应以植物乳杆菌与嗜酸乳杆菌混合发酵为宜。

参考文献

- [1] 王姗姗, 孙爱东, 李淑燕. 蓝莓的保健功能及其开发应用[J]. 中国食物与营养, 2010, 6: 17-20
WANG Shan-shan, SUN Ai-dong, LI Shu-yan. Advancement of health function of blueberry and its utilization [J]. Food and Nutrition in China, 2010, 6: 17-20
- [2] 程思颖. 蓝莓深加工技术研究进展探讨[J]. 食品安全导刊, 2018, 12: 134-135
CHENG Si-ying. Research progress on blueberry deep processing technology [J]. China Food Safety Magazine, 2018, 12: 134-135
- [3] 姜爱丽. 蓝莓果实采收后生理生化代谢及调控研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2011
JIANG Ai-li. Study on physio-biochemical metabolism and

its regulation of postharvest blueberry fruits [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2011

- [4] 李斌. 蓝莓加工及功能性研究与应用[J]. 新农业, 2016, 18: 34-35
LI Bin. Blueberry processing and functional research and application [J]. Xin Nongye, 2016, 18: 34-35
- [5] 吴倩, 余元善, 徐玉娟, 等. 不同乳酸菌对凝固型荔枝酸奶的发酵特性和质构的影响[J]. 现代食品科技, 2019, 35(7): 99-106
WU Qian, YU Yuan-shan, XU Yu-juan, et al. Effects of different lactic acid bacteria on fermentation characteristics and texture of set-style yogurt fortified with lychee juice [J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(7): 99-106
- [6] Panda S K, Behera S K, Qaku X W, et al. Quality enhancement of prickly pears (*Opuntia* sp.) juice through probiotic fermentation using *Lactobacillus fermentum*-ATCC 9338 [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 75: 453-459
- [7] 张丽华, 刘梦培, 邓莹楠, 等. 不同乳酸菌发酵对红枣汁贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(4): 332-336, 347
ZHANG Li-hua, LIU Meng-pei, DENG Ying-nan, et al. Effect of various lactic acid fermentation on quality of jujube juice during storage [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(4): 332-336, 347
- [8] Cagno R D, 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
- [9] 袁星星, 余元善, 吴继军, 等. *Lactobacillus Fermentum* 发酵降酸对三华李汁品质的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(11): 134-138
YUAN Xing-xing, YU Yuan-shan, WU Ji-jun, et al. Effect of deacidification by fermentation with *Lactobacillus fermentum* on the qualities of plum (*Prunus salicina* Lindl. cv. Sanhua)

- juice [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2016, 32(11): 134-138
- [10] 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 Wen-xiu, WU Zu-fang, WENG Pei-fang, 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
- [11] 束文秀,吴祖芳,刘连亮,等.胡柚汁益生菌发酵挥发性风味特征[J]. *食品科学*, 2018, 39(4):59-65
- SHU Wen-xiu, WU Zu-fang, LIU Lian-liang, et al. Volatile flavor compounds of fermented grapefruit juice with probiotics [J]. *Food Science*, 2018, 39(4): 59-65
- [12] 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]
- GB 4789.35-2016, National Food Safety Standards Food Microbiology Testing Lactic Acid Bacteria Testing [S]
- [13] GB/T 12456-2008,食品中总酸的测定[S]
- GB/T 12456-2008, Determination of Total Acid in Food [S]
- [14] 蔡红梅,田子玉.苯酚-硫酸法测定草莓中总糖含量[J]. *吉林农业*, 2019, 4:46
- CAI Hong-mei, TIAN Zi-yu. Determination of total sugar content in strawberry by phenol-sulfuric acid method [J]. *Agriculture of Jilin*, 2019, 4: 46
- [15] 曾志恒,曾辉,程翊,等.双孢蘑菇发酵液还原糖和总糖的含量测定[J]. *中国食用菌*, 2018, 37(6):40-43
- ZENG Zhi-heng, ZENG Hui, CHENG Yi, et al. Determination of reducing sugar and total sugar content in fermentation liquid of *Agaricus bisporus* [J]. *Edible Fungi of China*, 2018, 37(6): 40-43
- [16] Giusti M M, Wrolstad R E. Characterization and Measurement of Anthocyanins by UV-Visible Spectroscopy [M]. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, 2001
- [17] Yu Y, Xu Y, Wu J, 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(12): 114-120
- [18] Anna S Ł, Alicja Z. K, Katarzyna W, et al. Composition and antioxidant activity of red fruit liqueurs [J]. *Food Chemistry*, 2014, 157(157C): 533-539
- [19] 龚小洁,余元善,徐玉娟,等.乳酸菌发酵对荔枝果渣理化指标的影响[J]. *现代食品科技*, 2015, 10:257-262
- GONG Xiao-jie, YU Yuan-shan, XU Yu-juan, et al. Effect of fermentation with lactic acid bacteria on the physicochemical properties of litchi pomace [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2015, 10: 257-262
- [20] 古小露,马媛,耿福能,等.发酵剂复配对全石榴发酵汁品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(17):105-110
- GU Xiao-lu, MA Yuan, GENG Fu-neng, et al. Effects of vat starters on the quality of pomegranate fermented juice [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(17): 105-110
- (上接第 16 页)
- [28] Zhang Y, Chen X, Yang L, et al. Effects of rosmarinic acid on liver and kidney antioxidant enzymes, lipid peroxidation and tissue ultrastructure in aging mice [J]. *Food & function*, 2015, 6(3): 927-931
- [29] Mariadoss, Arokia Vijaya Anand, et al. Phloretin loaded chitosan nanoparticles enhance the antioxidants and apoptotic mechanisms in DMBA induced experimental carcinogenesis [J]. *Chemico-biological Interactions*, 2019, 308: 11-19
- [30] Martins R, Lithgow G J, Link W. Long live FOXO: unraveling the role of FOXO proteins in aging and longevity [J]. *Aging cell*, 2016, 15(2): 196-207
- [31] Lee G J, Lim J J, Hyun S. Minocycline treatment increases resistance to oxidative stress and extends lifespan in *Drosophila* via FOXO [J]. *Oncotarget*, 2017, 8(50): 87878-87890
- [32] Ahn H M, Lee K S, Lee D S, et al. JNK/FOXO mediated peroxiredoxinV expression regulates redox homeostasis during *Drosophila melanogaster* gut infection [J]. *Developmental & Comparative Immunology*, 2012, 38(3): 466-473