

酶法制备紫马铃薯汁 及其乳酸菌发酵特性

邹颖, 卜智斌, 余元善, 邹波, 肖更生*, 温靖, 程丽娜, 李俊

(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: 本文以紫马铃薯为原料, 通过酶法制备富含花色苷的紫马铃薯汁, 分别使用干酪乳杆菌、保加利亚乳杆菌及植物乳杆菌三种乳酸菌对其进行发酵, 研究烫漂时间、酶用量对紫马铃薯汁出汁率、花色苷、还原糖含量的影响及发酵过程中 pH、花色苷、总酚含量、糖组分、有机酸、DPPH·清除能力等变化。结果表明: 紫马铃薯经烫漂护色 2.5 min 时出汁率最高。烫漂时间对紫马铃薯汁的花色苷含量影响极为显著, 烫漂 2.5 min 时花色苷含量比未经烫漂处理的提升了 7.7 倍。经高温 α -淀粉酶 (20 U/g)、糖化酶 (200 U/g) 酶解处理后的紫马铃薯汁出汁率为 $69.80\% \pm 3.85\%$, 总酚含量 1136.7 ± 33.76 mg/L, 花色苷含量为 218.25 ± 1.89 mg/L。紫马铃薯汁经乳酸菌发酵后 pH 逐渐下降, 并产生大量的乳酸, 产酸能力大小依次为保加利亚乳杆菌 > 植物乳杆菌 > 干酪乳杆菌, 蔗糖、葡萄糖和果糖在发酵过程中均作为底物被乳酸菌消耗, 发酵 48 h 后花色苷、总酚、DPPH·清除能力分别下降了 11.33% ~ 17.82%、6.22% ~ 7.73%、24.23% ~ 27.62%。抗氧化活性下降与花色苷和总酚含量的减少有关。

关键词: 紫马铃薯, 花色苷, 乳酸菌, 发酵, 酶解

Enzymatic Preparation of Purple Potato Juice and Its Fermentation Characteristics of Lactic Acid Bacteria

ZOU Ying, BU Zhi-bin, YU Yuan-shan, ZOU Bo, XIAO Geng-sheng*, WEN Jing, CHENG Li-na, LI Jun

(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: In this paper, purple potato juice rich in anthocyanins was prepared by enzymatic method. *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus bulgaricus* and *Lactobacillus plantarum* were used to ferment purple potato juice. The effect of blanching time, high temperature α -amylase dosage on the yield and anthocyanin content of purple potato juice and changes of pH, anthocyanin, total phenol content, sugar component, organic acid and DPPH scavenging capacity during fermentation were studied. The results showed that the purple potato had the highest juice yield after blanching and color protection for 2.5 min. The blanching time had a significant effect on the anthocyanin content of purple potato juice. The anthocyanin content was 7.7 times higher than that without blanching when blanching for 2.5 min. With the treatment of high temperature α -amylase (20 U/g) and saccharification enzyme (200 U/g), the yield of purple potato juice was $69.80\% \pm 3.85\%$, the total phenol content was 1136.67 ± 33.76 mg/L, and the anthocyanin content was 218.25 ± 1.89 mg/L. The pH value of purple potato juice gradually decreased after fermentation by lactic acid bacteria, and a large amount of lactic acid was produced. The acid production capacity was in the order of *Lactobacillus bulgaricus* > *Lactobacillus plantarum* > *Lactobacillus casei*. Sucrose, glucose and fructose were consumed by lactic acid bacteria as substrates during fermentation. The anthocyanin, total phenol and DPPH·clearing ability decreased by 11.33% ~ 17.82%, 6.22% ~ 7.73%, 24.23% ~ 27.62%, respectively after 48 h of fermentation. The decrease of antioxidant activity is associated with that of anthocyanin and total phenolic content.

Key words: purple potato; anthocyanin; lactic acid bacteria; fermentation; enzymatic hydrolysis

中图分类号: TS255.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2020)02-0016-06

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2020.02.003

引文格式: 邹颖, 卜智斌, 余元善, 等. 酶法制备紫马铃薯汁及其乳酸菌发酵特性[J]. 食品工业科技, 2020, 41(2): 16-20, 26.

收稿日期: 2019-04-23

作者简介: 邹颖 (1994-), 女, 硕士, 研究实习员, 研究方向: 果蔬加工, E-mail: m18998368641@163.com。

* 通讯作者: 肖更生 (1965-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 果蔬加工, E-mail: gshxiao@aliyun.com。

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2017YFD0400703); 广州市科技民生科技攻关项目 (201803020007); 广东省省级科技计划项目 (2017B020207005); 广东省甘薯马铃薯产业技术体系创新团队 (2019KJ111)。

紫马铃薯又名紫色土豆、黑马铃薯、黑土豆,属于茄科茄属,薯型长椭圆型,表皮光滑,薯肉颜色独特呈紫黑色,含有蛋白质、脂肪、碳水化合物、有机酸等丰富的营养物质,具有极高的营养价值,紫马铃薯中除了普通马铃薯所含有的丰富的营养物质外,还富含具有增强人体免疫力、延缓衰老、抗氧化活性等生理活性功能的花色苷及多酚类物质^[1],因此开发以紫马铃薯为原料的新型健康食品具有一定的实际意义。但目前紫马铃薯以鲜食为主,少数用于加工,综合经济效益较低。为顺应马铃薯主粮化战略,必须大力发展马铃薯制品深加工产业和丰富产品种类,以提高马铃薯经济附加值。

随着经济的发展,具有功能保健性的食品越来越受到青睐,富含多种营养的果蔬汁逐渐成为市场新宠,目前利用紫马铃薯为原料开发紫马铃薯饮料的相关研究已有报道,陈杰华等^[2]通过酶法生产紫马铃薯饮料,确定紫马铃薯饮料的最佳酶解工艺条件;张佳丽等^[3]通过感官评定法优化紫色马铃薯醋饮料配方,并以离心沉淀率为指标对其稳定剂进行优化,得到最佳工艺;郭婷^[4]通过冷冻取汁技术确定紫色马铃薯的最佳处理条件,并在此基础上确定紫色马铃薯饮料配方、澄清及杀菌参数,但以上相关报道主要集中在紫色马铃薯饮料的工艺优化,且工艺较为单一。乳酸菌发酵能赋予果蔬良好的风味,提升果蔬汁的营养价值,紫色马铃薯中丰富的糖类物质可为乳酸菌的生长提供充足的碳源,是乳酸菌生长的良好基质^[5]。

因此,本文以紫马铃薯为原料,通过烫漂护色酶法制备富含花色苷的紫马铃薯汁,经乳酸菌发酵后研制一种营养丰富、色泽鲜亮、风味独特的紫马铃薯发酵饮料,旨在为紫马铃薯的产业化深加工提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

紫马铃薯(黑金刚) 购于当地农贸市场,产于山东;乳酸菌种:干酪乳杆菌(*Lactobacillus casei*, Lc)、保加利亚乳杆菌(*Lactobacillus bulgaricus*, Lb)及植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*, Lp) 本实验室保存;糖化酶(100000 U/g) 上海阿拉丁生化科技股份有限公司;没食子酸 美国 Sigma 公司;高温 α 淀粉酶(20000 U/mL)、Folin-Ciocalteu 试剂、果糖、葡萄糖、蔗糖、酒石酸、苹果酸、乙酸、乳酸、草酸和柠檬酸 上海源叶生物科技有限公司;其他试剂 均为国产分析纯。

RFM3400 阿贝折光计 英国 Bellingham + Stanley 公司;PB-10 型 pH 计 赛多利斯公司;HWS24 型电热恒温水浴锅 上海一恒科技有限公司;UV-1800 型分光光度计 日本岛津公司;UltraScan VIS 型全自动色差计 美国 HunterLab 公司;立式压力蒸汽灭菌锅 上海博迅实业有限公司医疗设备厂;Agilent 1200 series 型高效液相色谱仪 美国安捷伦科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 制汁工艺流程 新鲜紫马铃薯→挑选→清洗、去

皮→切块→烫漂→打浆→酶解→灭酶→离心→杀菌→冷却→成品

1.2.2 烫漂时间对马铃薯汁出汁率及花色苷含量的影响 取新鲜紫马铃薯清洗去皮切块(约 1.5 cm × 1 cm × 1 cm),分别在沸水中烫漂 0、1、2、2.5、3、4 min 后,取出后立即用冷水将薯条表面的淀粉和泡沫冲洗干净,沥干,按料液比 1:1 加水打浆,分别加入 40 U/g 高温 α -淀粉酶于 90 ℃加热 60 min,待其冷却至 55 ℃后,加入 0.2% (200 U/g) 的糖化酶水解 120 min,灭酶后(沸水浴 10 min)过滤离心(1500 × g, 10 min)取上清液,研究烫漂时间对紫马铃薯汁的出汁率及花色苷含量的影响。

1.2.3 高温 α -淀粉酶用量对马铃薯汁出汁率、花色苷及还原糖含量的影响 经 1.2.2 优化得到的紫马铃薯浆,分别加入不同添加量(0、20、40、60 U/g)的高温 α -淀粉酶,于 90 ℃加热 60 min,待其冷却至 55 ℃后,加入 0.2% (200 U/g) 的糖化酶水解 120 min,灭酶后(沸水浴 10 min)过滤离心(1500 × g, 10 min)取上清液,研究高温 α -淀粉酶用量对马铃薯汁出汁率、花色苷及还原糖含量的影响。

1.2.4 乳酸菌发酵对紫马铃薯汁理化特性的影响

1.2.4.1 乳酸菌培养物制备 把 3 种乳酸菌(Lc、Lb 及 Lp)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(30 ℃,静置发酵)中培养 18 h。

1.2.4.2 紫马铃薯汁的乳酸菌发酵培养 经酶解制备的紫马铃薯汁煮沸 10 min,置于无菌操作台上,分别在已灭菌的 500 mL 三角瓶中加入 400 mL 紫马铃薯汁,每瓶分别接入三种乳酸菌培养物(接种量 6.0lg CFU/mL 左右),置于 37 ℃培养箱中培养,每隔 12 h 取样 1 次,并分别测定相应的理化指标(pH、有机酸、糖组分、花色苷、总酚含量、抗氧化活性)。

1.2.5 测定方法

1.2.5.1 出汁率的测定 出汁率(%) = (汁液总质量 - 加入水质量) × 100 / 紫马铃薯质量

1.2.5.2 花色苷含量的测定 花色苷含量采用 pH 示差法测定^[6],取紫马铃薯汁,分别加入 pH_{1.0}和 pH_{4.5}的缓冲液,避光放置 15 min,测定 510 和 700 nm 处的吸光值。

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

花色苷含量(mg/L) = $(A \times M_w \times \text{稀释倍数} \times 1000) / (\varepsilon \times l)$

以矢车菊素-3-葡萄糖苷计,其分子量 M_w 为 449.2, ε 为 26900 L/cm, l 表示光径为 1 cm 的比色皿。

1.2.5.3 还原糖含量的测定 还原糖的测定采用 3,5-二硝基水杨酸比色法(DNS)^[7]。

葡萄糖标准曲线:先将葡萄糖在 105 ℃干燥至恒重,用蒸馏水配制 0~1 mg/mL 的不同浓度的葡萄糖标准溶液。取 0.5 mL 葡萄糖标准溶液于具塞试管中,加入 1 mL DNS 试剂,混合均匀后沸水浴 3 min,冷却至室温测定其在 540 nm 下的吸光值。

样品的测定:先将酶解制备的紫马铃薯汁用蒸

馏水稀释到合适的浓度,取 0.5 mL 样品于具塞试管中,后续步骤与标准品的测定相同。

1.2.5.4 pH 的测定 pH 用 pH 计直接测定。

1.2.5.5 有机酸的测定 参考袁星星等^[8]的方法,采用 HPLC 法测定。色谱柱为 Agilent ZORBAX SB-C18(4.6×250 mm)色谱柱;柱温为 30℃;检测器为二极管阵列检测器;流动相:0.1 mol/L (NH₄)₂HPO₄ (磷酸调节 pH=2.70);流速为 1.0 mL/min;检测波长为 210 nm。将样品用 0.3% 偏磷酸稀释至合适浓度后过膜,进样量为 10 μL,并采用外标法(酒石酸、苹果酸、乙酸、乳酸、草酸和柠檬酸为标准品)定量。

1.2.5.6 糖组分测定 糖组分的测定:采用 HPLC 法测定,包括葡萄糖、蔗糖、果糖。色谱柱为 ShodexAsahipak NH2P-50 4E(4.6 mm×250 mm)色谱柱,检测器为蒸发光(ELSD)检测器,柱温 40℃,漂移管温度为 50℃,流动相为 70% 乙腈,流速 1 mL/min,取 1 mL 发酵紫马铃薯汁加 3 mL 无水乙醇离心取上清液过膜,进样量为 10 μL。

1.2.5.7 总酚含量的测定 采用福林酚法测定^[9],结果以没食子酸当量计。

1.2.5.8 清除 DPPH 自由基能力的测定 参考 Sokolletowska^[10]等,取 50 μL 50、100、200、300、400、500 μmol/L Trolox 标准溶液或稀释后的样品混合 150 μL DPPH 溶液共同置于 96 孔细胞板中,暗处放置 30 min 后,于 517 nm 测试吸光强度。结果以 Trolox 当量计算。

1.3 数据处理

采用 SPSS 17.0 软件中的 ANOVA 方法对数据进行差异显著性检验分析,以 $P < 0.05$ 为差异显著,数据以平均值 ± 标准差的形式来表示。

2 结果与分析

2.1 烫漂时间对紫马铃薯汁出汁率、花色苷含量的影响

不同烫漂时间对紫马铃薯汁的出汁率及花色苷含量的影响如图 1 所示,随着烫漂时间从 1 min 增加到 4 min,紫马铃薯汁的出汁率先增加后减小,其中烫漂 2.5 min 时出汁率最高为 69.53%。而烫漂时间对紫马铃薯汁的花色苷含量影响极为显著,未经烫漂处理得到的紫马铃薯汁的花色苷含量仅为 27.72 mg/L,因紫马铃薯极易发生酶促褐变,烫漂后可钝化酶活性,从而抑制营养物质的氧化损失、酶褐变等一系列不良变化^[11]。随着烫漂时间的增加,紫马铃薯汁的花色苷含量显著上升后有所下降,烫漂 2.5 min 时花色苷含量高达 213.58 mg/L,比未经烫漂处理的花色苷含量提升了 7.7 倍,但烫漂时间大于 2.5 min 时,出汁率和花色苷含量均呈现下降的趋势,可能由于烫漂时间过长引起汁液流失,影响了水分和花色苷的保存。另一方面从实物中也能直观看出色泽的变化,烫漂时间为 0 和 1 min 的马铃薯汁呈深褐色,而其他烫漂时间为 2、2.5、3、4 min 处理后的马铃薯汁则呈现清亮均一的紫红色,与前者色泽差异明显。综合考虑出汁率、花色苷含量及汁液色泽,2.5 min 为紫马铃薯最佳烫漂时间。

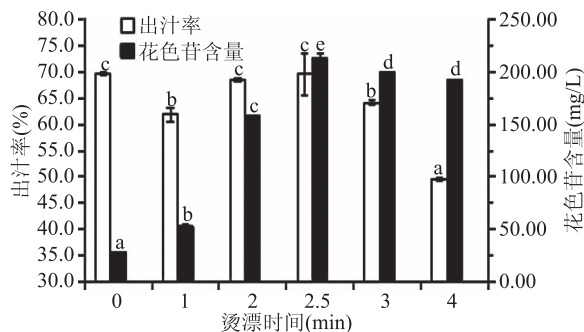


图 1 烫漂时间对紫马铃薯汁出汁率、花色苷含量的影响

Fig.1 Effects of blanching time on yield

and anthocyanin content of purple potato juice

注:同一指标不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

2.2 高温 α-淀粉酶用量对紫马铃薯汁出汁率、花色苷及还原糖含量的影响

不同高温 α-淀粉酶添加量对紫马铃薯汁的出汁率及花色苷含量的影响如表 1 所示,未添加高温 α-淀粉酶,只经过糖化酶水解的马铃薯浆较粘稠,出汁率较低为 $48.19\% \pm 2.36\%$,花色苷含量也最低,经高温 α-淀粉酶先液化再糖化的马铃薯汁出汁率显著增加,花色苷含量亦随之升高,高温 α-淀粉酶添加量为 20 U/g 时,出汁率和花色苷含量均达到最大值分别为 $69.80\% \pm 3.85\%$ 和 218.25 ± 1.89 mg/L。从还原糖含量变化来看,未添加高温 α-淀粉酶,只经过糖化酶水解得到的马铃薯汁还原糖含量与其他组差异显著。在 0~20 U/g 用量范围内,随着酶用量的增大,马铃薯汁中还原糖含量显著提高;当酶用量大于 20 U/g 时,继续增大酶用量,还原糖含量变化不显著,说明此时马铃薯浆中的淀粉已经基本被水解完全。α-淀粉酶使得淀粉分子内部的 α-1,4-糖苷键发生改变,将淀粉水解为糊精、低聚糖和单糖;再加入糖化酶可以进一步水解糊精和多糖^[12]。从而充分利用紫马铃薯中大量的淀粉,改善饮料的稳定性和口感,使细胞内的花色苷更完全地释放出来。

表 1 高温 α-淀粉酶用量

对紫马铃薯汁出汁率、花色苷及还原糖含量的影响

Table 1 Effect of high temperature α-amylase dosage on the juice yield, anthocyanin and sugar content of purple potato juice

α-淀粉酶用量 (U/g)	出汁率 (%)	花色苷含量 (mg/L)	还原糖 (g/L)
0	48.19 ± 2.36^a	189.03 ± 0.94^b	39.71 ± 0.87^b
20	69.80 ± 3.85^b	218.25 ± 1.89^a	41.34 ± 0.54^a
40	69.53 ± 2.66^b	213.58 ± 0.47^a	42.03 ± 1.02^a
60	70.93 ± 1.49^b	209.07 ± 1.42^a	41.49 ± 0.81^a

注:同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),表 2、表 3 同。

2.3 不同乳酸菌发酵期间紫马铃薯汁中 pH 的变化

由图 2 可知,酶法制备的紫马铃薯汁的最初 pH 约为 5.98。在 48 h 内,随着发酵时间的延长,3 种乳酸菌发酵的紫马铃薯汁的 pH 均呈下降趋势;其中,

表2 发酵期间紫马铃薯汁中有机酸的变化
Table 2 Changes of organic acids in purple potato juice during fermentation

	酒石酸(g/L)	苹果酸(g/L)	乳酸(g/L)	草酸(g/L)	乙酸(g/L)	柠檬酸(g/L)
0 h	1.08 ± 0.02 ^a	0.80 ± 0.03 ^a	0.46 ± 0.02 ^a	0.27 ± 0.01 ^b	—	—
Lc12 h	1.22 ± 0.03 ^{ab}	—	7.06 ± 0.14 ^b	0.17 ± 0.02 ^a	1.82 ± 0.02 ^c	0.03 ± 0.00 ^a
Lc24 h	1.15 ± 0.01 ^a	—	8.31 ± 0.04 ^c	0.16 ± 0.03 ^a	1.70 ± 0.01 ^{bc}	0.02 ± 0.00 ^a
Lc36 h	1.15 ± 0.02 ^a	—	8.68 ± 0.07 ^c	0.15 ± 0.01 ^a	2.01 ± 0.03 ^d	0.01 ± 0.00 ^a
Lc48 h	1.36 ± 0.05 ^b	—	8.43 ± 0.08 ^c	0.16 ± 0.01 ^a	1.53 ± 0.02 ^b	0.01 ± 0.00 ^a
Lb12 h	1.55 ± 0.06 ^c	—	7.67 ± 0.06 ^b	0.26 ± 0.01 ^b	0.41 ± 0.01 ^a	1.49 ± 0.01 ^c
Lb24 h	1.77 ± 0.01 ^d	—	13.11 ± 0.13 ^d	0.28 ± 0.02 ^b	0.39 ± 0.04 ^a	1.23 ± 0.01 ^d
Lb36 h	1.82 ± 0.03 ^d	—	19.07 ± 0.09 ^b	0.17 ± 0.01 ^a	0.34 ± 0.01 ^a	1.29 ± 0.01 ^d
Lb48 h	1.74 ± 0.02 ^d	—	21.64 ± 0.15 ⁱ	0.18 ± 0.02 ^a	0.50 ± 0.02 ^{ab}	1.71 ± 0.01 ^f
Lp12 h	1.59 ± 0.04 ^c	1.70 ± 0.06 ^b	8.78 ± 0.04 ^c	0.21 ± 0.01 ^{ab}	2.72 ± 0.03 ^e	0.84 ± 0.01 ^c
Lp24 h	1.58 ± 0.03 ^c	2.70 ± 0.03 ^d	13.18 ± 0.03 ^d	0.17 ± 0.01 ^a	2.94 ± 0.03 ^f	0.62 ± 0.01 ^b
Lp36 h	1.48 ± 0.02 ^{bc}	2.40 ± 0.10 ^c	15.07 ± 0.07 ^e	0.23 ± 0.01 ^{ab}	3.56 ± 0.04 ^g	0.52 ± 0.01 ^b
Lp48 h	1.48 ± 0.05 ^{bc}	2.30 ± 0.03 ^c	16.49 ± 0.04 ^f	0.15 ± 0.01 ^a	3.72 ± 0.02 ^g	0.01 ± 0.00 ^a

0~12 h下降幅度最大,从 5.98 下降至 4.0 左右;主要是乳酸菌的快速增殖消耗糖代谢产酸的原因^[13];12 h后 Lc 发酵的紫马铃薯汁的 pH 变化不大,而 Lb 及 Lp 发酵的紫马铃薯汁的 pH 仍然缓慢下降,48 h 时 pH 分别下降至 3.44 和 3.67。随着发酵的进行,样品中累积大量有机酸,酸性的样品环境和高浓度的 H⁺,会抑制乳酸菌生长,菌的产酸能力受到影响,发酵后期 pH 变化不大。

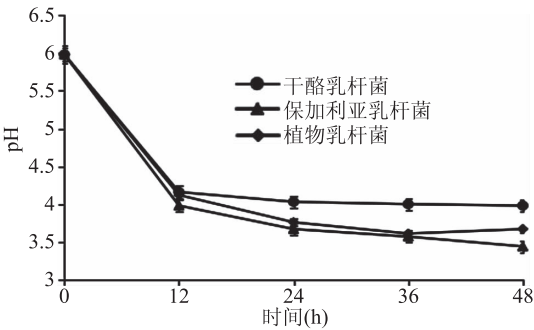


图2 发酵期间紫马铃薯汁中 pH 的变化
Fig.2 Changes of pH value in purple potato juice during fermentation

2.4 不同乳酸菌发酵期间紫马铃薯汁中有机酸的变化

利用 HPLC 对发酵期间紫马铃薯汁中有机酸进行测定,结果如表 2 所示。有机酸是果蔬的主要风味营养物质,对发酵果蔬的品质有着重要的影响^[14]。紫马铃薯汁中含有酒石酸、苹果酸、乳酸、草酸等有机酸,经乳酸菌发酵后有机酸含量增加,其中乳酸含量变化最显著,发酵 48 h 后,Lc、Lb 及 Lp 发酵后的乳酸含量分别从 0.46 g/L 提升至 8.43、21.64、16.49 g/L;酒石酸含量亦有显著的增加,经 Lc、Lb 及 Lp 发酵后分别从 1.08 g/L 提升至 1.36、1.74、1.48 g/L;苹果酸的变化趋势与乳酸菌的种类有关,经 Lc、Lb 发酵后苹果酸完全被消耗,可能是由于在乳酸菌苹果乳酸酶的作用下发生脱羧反应生成了乳酸和 CO₂,使苹果酸含量逐渐减少;但经 Lp 发酵 24 h 后苹果酸

含量从 0.80 g/L 增加到 2.70 g/L。草酸在发酵期间变化量较小,且三种菌差异不大,可能是微生物发酵未对紫马铃薯汁中的草酸进行转化。乙酸和柠檬酸均为从无到有的积累,发酵后乙酸含量从高到低依次为:Lp > Lc > Lb,发酵后柠檬酸含量从高到低依次为:Lb > Lp > Lc,发酵过程中有机酸含量的增加有利于风味的增加,缩短发酵时间,抑制腐败菌的产生。

2.5 不同乳酸菌发酵期间紫马铃薯汁中糖含量的变化

由表 3 可知,紫马铃薯汁的主要糖组成为葡萄糖(26.98 ± 0.13 g/L)、蔗糖(8.99 ± 0.02 g/L)、果糖(2.88 ± 0.09 g/L)。对于 Lc 组,发酵 48 h 时,蔗糖由发酵前的 8.99 ± 0.02 g/L 显著降低到 4.01 ± 0.03 g/L ($P < 0.05$),葡萄糖由 26.98 ± 0.13 g/L 增加到 29.87 ± 0.16 g/L,果糖由 2.88 ± 0.09 g/L 增加至 5.68 ± 0.02 g/L,蔗糖含量的减少可能是在蔗糖酶的作用下被转化为葡萄糖和果糖;葡萄糖和果糖的变化趋势

表3 发酵期间紫马铃薯汁中糖组分的变化
Table 3 Changes of sugar component in purple potato juice during fermentation

	果糖(g/L)	葡萄糖(g/L)	蔗糖(g/L)
0 h	2.88 ± 0.09 ^a	26.98 ± 0.13 ^c	8.99 ± 0.02 ^b
Lc12 h	5.95 ± 0.02 ^c	22.33 ± 0.09 ^b	5.22 ± 0.03 ^d
Lc24 h	5.96 ± 0.03 ^c	24.29 ± 0.08 ^b	4.88 ± 0.02 ^c
Lc36 h	5.56 ± 0.01 ^b	29.33 ± 0.17 ^d	4.40 ± 0.01 ^b
Lc48 h	5.68 ± 0.02 ^b	29.87 ± 0.16 ^d	4.01 ± 0.03 ^a
Lb12 h	0.00	20.98 ± 0.09 ^a	7.22 ± 0.02 ^g
Lb24 h	0.00	21.35 ± 0.08 ^{ab}	5.91 ± 0.04 ^c
Lb36 h	0.00	19.55 ± 0.11 ^a	5.95 ± 0.05 ^c
Lb48 h	0.00	18.99 ± 0.06 ^a	5.07 ± 0.02 ^{cd}
Lp12 h	0.00	24.14 ± 0.09 ^b	8.61 ± 0.03 ^b
Lp24 h	0.00	24.87 ± 0.10 ^b	7.52 ± 0.04 ^g
Lp36 h	0.00	27.92 ± 0.12 ^c	7.02 ± 0.05 ^g
Lp48 h	0.00	29.80 ± 0.11 ^d	6.38 ± 0.09 ^f

相似,发酵后两种糖含量均稍有升高,可能是由于蔗糖的转化所致;对于 Lb 组,发酵 48 h 时,蔗糖由发酵前的 8.99 ± 0.02 g/L 显著降低到 5.07 ± 0.02 g/L ($P < 0.05$),葡萄糖由 26.98 ± 0.13 g/L 减少到 18.99 ± 0.06 g/L,果糖完全被消耗,Lp 对糖的利用与 Lb 相似,这两种菌对糖类的消耗大于 Lc,与其产酸能力相对应。减少的糖类主要用于乳酸菌的生长以及参与代谢过程被转化成有机酸等其他物质。

2.6 不同乳酸菌发酵期间紫马铃薯汁中花色苷、总酚含量及抗氧化性(DPPH)的变化

如图 3 所示,紫马铃薯汁经乳酸菌发酵后花色苷含量均呈下降的趋势,经 Lc、Lb 及 Lp 发酵 48 h 后分别从 194.54 ± 3.07 mg/L 下降至 161.81 ± 1.65 、 172.50 ± 4.96 、 168.83 ± 3.07 mg/L,降解率分别为 17.82%、11.33%、13.22%。花色苷含量下降可能是由于花色苷稳定性差,在发酵过程中其自身会发生降解,也会受到乳酸菌转化作用的影响。

如图 4 所示,紫马铃薯汁经乳酸菌发酵后总酚含量均呈略微下降的趋势,经 Lc、Lb 及 Lp 发酵后分别从 1136.67 ± 33.76 mg/L 下降至 1065.95 ± 22.93 、 1048.83 ± 38.22 、 1063.24 ± 22.63 mg/L,保留率分别为 93.78%、92.27%、93.54%。总酚与花色苷含量下降幅度有所差异,且总酚下降程度低于花色苷,表明发酵过程中会有某些酚酸类物质的增加,且发酵期间花色苷、酚酸的合成和降解与乳酸菌种类有关。一些乳酸菌(如 Lp)在发酵过程中会产生酚酸脱羧酶,实现酚类物质的相互转化,乳酸菌产生的酚酸脱羧酶,可以把复杂的大分子酚类物质转化成小分子酚类物质,从而使总酚含量增加^[15]。

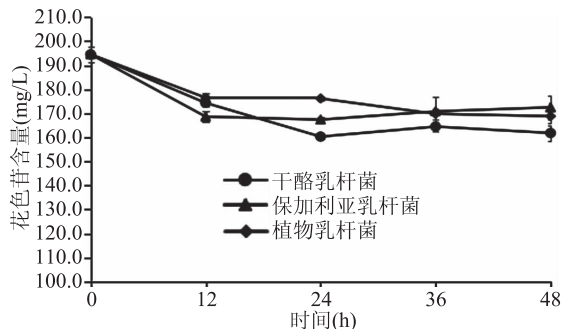


图 3 发酵期间紫马铃薯汁中花色苷含量的变化

Fig.3 Changes of anthocyanin content in purple potato juice during fermentation

如图 5 所示,紫马铃薯汁经乳酸菌发酵后抗氧化活性呈先下降后趋于平稳的趋势,经 Lc、Lb 及 Lp 发酵 48 h 后分别从 4.09 ± 0.31 μ mol TE/mL 下降至 3.09 ± 0.19 、 3.10 ± 0.12 、 2.96 ± 0.25 μ mol TE/mL,降解率分别为 24.41%、24.23%、27.62%。紫马铃薯汁的抗氧化活性下降的原因可能是花色苷和总酚含量的减少,这与李丰廷等的研究结果一致^[16]。

3 结论

紫马铃薯经烫漂护色 2.5 min 时出汁率最高。烫漂时间对紫马铃薯汁的花色苷含量影响极为显著,烫漂 2.5 min 时花色苷含量比未经烫漂处理的提

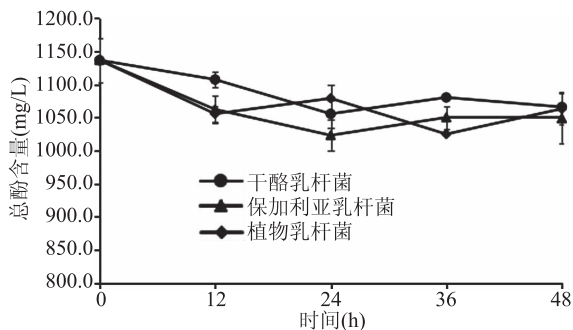


图 4 发酵期间紫马铃薯汁中总酚含量的变化

Fig.4 Changes of total phenolic content in purple potato juice during fermentation

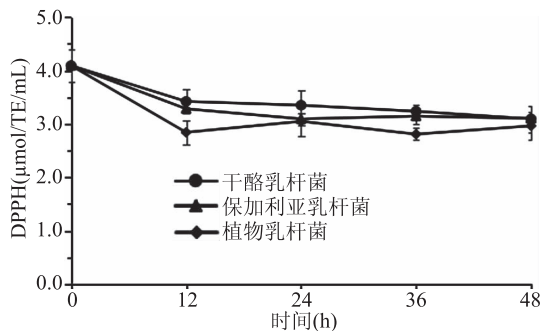


图 5 发酵期间紫马铃薯汁的 DPPH 自由基清除能力的变化

Fig.5 Changes of DPPH· scavenging ability of purple potato juice during fermentation

升了 7.7 倍。经高温 α -淀粉酶(20 U/g)、糖化酶(200 U/g)酶解处理后的紫马铃薯汁出汁率为 $69.80\% \pm 3.85\%$,总酚含量 1136.7 ± 33.76 mg/L,花色苷含量为 218.25 ± 1.89 mg/L。紫马铃薯汁经乳酸菌发酵过程中 pH 逐渐下降,并产生大量的乳酸,产酸能力大小依次为 Lb > Lp > Lc,蔗糖、葡萄糖和果糖在发酵过程中均作为底物被乳酸菌消耗,用于乳酸菌的生长以及在发酵代谢中转化成其他的有机酸等营养物质,发酵 48 h 后花色苷、总酚、DPPH·清除能力分别下降了 11.33%~17.82%、6.22%~7.73%、24.23%~27.62%。发酵期间花色苷、酚酸的合成和降解与乳酸菌种类有关,抗氧化活性下降与花色苷和总酚含量的减少有关。

参考文献

- [1] 陈杰华.新型紫马铃薯功能性食品工艺研究[D].杭州:浙江大学,2012.
- [2] 陈杰华,蒋益虹,王颖滢,等.酶法生产紫马铃薯饮料的工艺研究[J].中国食品学报,2012,4(12):57-64.
- [3] 张佳丽,郭婷,晋玉潇,等.紫色马铃薯醋饮料的配方及稳定剂的优化[J].农产品加工,2018,450(2):22-25,32.
- [4] 郭婷.紫色马铃薯冷冻取汁预处理及饮料主要工艺的优化[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2018..
- [5] 谢桂勉,吴洪亮,庄姗姗,等.益生菌发酵紫薯风味冷冻饮品的研制[J].轻工科技,2017,33(6):20-22.
- [6] 邹波,吴继军,徐玉娟,等.不同紫肉甘薯品种饮料加工特

(下转第 26 页)

Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54: 6303–6307.

[5] Sharifimehr S, Soltanizadeh N, Goli SAH. Physicochemical properties of fried shrimp coated with bio-nano-coating containing eugenol and Aloe vera [J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 109: 33–39.

[6] 刘启祥, 谢家恩, 张立冬, 等. 丁香酚对大鼠肾缺血再灌注性损伤保护作用的研究 [J]. 临床和实验医学杂志, 2017, 16 (13): 1261–1264.

[7] 马强, 吴文宁, 陈荣. Eugenol 对 H_2O_2 诱导的 H9C2 心肌细胞损伤的保护作用 [J]. 安徽医学, 2017, 38 (11): 1369–1373.

[8] Mateen S, Rehman MT, Shahzad S, et al. Anti-oxidant and anti-inflammatory effects of cinnamaldehyde and eugenol on mononuclear cells of rheumatoid arthritis patients [J]. European Journal of Pharmacology, 2019, 852: 14–24.

[9] Fujisawa S, Atsumi T, Satoh K, et al. Radical generation, radical-scavenging activity, and cytotoxicity of eugenol-related compounds [J]. In Vitro and Molecular Toxicology, 1999, 13: 269–280.

[10] Fujisawa S, Atsumi T, Kadoma Y, et al. Antioxidant and prooxidant action of eugenol-related compounds and their cytotoxicity [J]. Toxicology, 2002, 177: 39–54.

[11] Ozkan A, Erdogan A. Membrane and DNA damaging/protective effects of eugenol, eucalyptol, terpinen-4-ol, and camphor at various concentrations on parental and drug-resistant H1299 cells [J]. Turkish Journal of Biology, 2013, 37 (4): 405–413.

[12] Yagalakshmi B, Viswanathan P, Anuradha C V. Investigation of antioxidant, anti-inflammatory and DNA-protective properties of eugenol in thioacetamide-induced liver injury in rats [J]. Toxicology, 2010, 268: 204–212.

[13] 李帆, 邢珂慧, 邵佩兰, 等. 红枣色素与枣多糖的协同抗氧化作用 [J]. 食品工业科技, 2019, 40 (9): 13–17, 23.

[14] 石艳宾. 金银花、银杏叶总黄酮协同清除 DPPH 自由基作用研究 [J]. 食品研究与开发, 2017, 38 (5): 43–46.

[15] Luis A, Duarte A, Pereira L, et al. Interactions between the major bioactive polyphenols of berries: Effects on antioxidant properties [J]. European Food Research and Technology, 2018, 244 (1): 175–185.

(上接第 20 页)

性评价 [J]. 广东农业科学, 2017, 44 (4): 118–124.

[7] 赵凯, 许鹏举, 谷广辉. 3,5-二硝基水杨酸比色法测定还原糖含量的研究 [J]. 食品科学, 2008 (8): 534–536.

[8] 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, 62.

[9] Lin L, Zhao H, Dong Y, et al. Macroporous resin purification behavior of phenolics and rosmarinic acid from *Rabdosia serra*, (MAXIM.) HARA leaf [J]. Food Chemistry, 2012, 130 (2): 417–424.

[10] Sokolietowska A, Kucharska A Z, Winska K, et al. Composition and antioxidant activity of red fruit liqueurs [J]. Food Chemistry, 2014, 157: 533–539.

[16] Bao X L, Yuan H H, Zhao H L, et al. Antioxidant synergisms between cymbopogon citratus polyphenols and α -tocopherol in DPPH radical-scavenging assay [J]. Asian Journal of Chemistry, 2015, 27 (9): 3188–3196.

[17] Yuan H H, Sun B, Gao F, et al. Synergistic anticancer effects of andrographolide and paclitaxel against A549 NSCLC cells [J]. Pharmaceutical Biology, 2016, 54 (11): 2629–2635.

[18] Colaric M, Veberic R, Solar A, et al. Phenolic acids, syringaldehyde, and juglone in fruits of different cultivars of *Juglans regia* L. [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53: 6390–6396.

[19] Yukihito S, Fumiaki K, Akinori T, et al. Total syntheses of (+)-polygalolide A and (+)-polygalolide B: Elucidation of the absolute stereochemistry and biogenetic implications [J]. Chemistry-A European Journal, 2012, 18: 9682–9690.

[20] Brand-Williams W, Cuvelier M, Berset C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity [J]. LWT-Food Science and Technology, 1995, 28: 25–30.

[21] Sentkowska A, Pyrzynska K. Investigation of antioxidant interaction between green tea polyphenols and acetaminophen using isobolographic analysis [J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2018, 159: 393–397.

[22] Radica S-P, Ana M, Maja T, et al. Levetiracetam synergizes with gabapentin, pregabalin, duloxetine and selected antioxidants in a mouse diabetic painful neuropathy model [J]. Psychopharmacology, 2017, 234 (11): 1781–1794.

[23] Santiesteban-Lopez A, Palou E, Lopez-Malo A. Susceptibility of foodborne bacteria to binary combinations of antimicrobials at selected aw and pH [J]. Journal of Applied Microbiology, 2007, 102: 486–497.

[24] Hassanzadeh-Kiabi F, Negahdari B. Antinociceptive synergistic interaction between *Achillea millefolium* and *Origanum vulgare* L. extract encapsulated in liposome in rat [J]. Artificial cells, Nanomedicine, and Biotechnology, 2018, 46 (5): 994–1000.

[25] Bondet V, Brand-Williams W, Berset C. Kinetics and mechanisms of antioxidant activity using the DPPH· free radical method [J]. LWT-Food Science and Technology, 1997, 30: 609–615.

[11] 陈乃富. 热处理法钝化蕨菜多酚氧化酶活性的工艺条件研究 [J]. 食品工业科技, 2005 (10): 49–51.

[12] 刘聪慧. 马铃薯乳酸发酵饮料的工艺研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.

[13] 熊涛, 肖阳生, 李军波, 等. 温度对四川泡菜中菌系及其代谢产物分布的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2016, 42 (2): 77–81.

[14] 王升万. 益生菌发酵果蔬原浆在加工过程中主要营养成分变化的研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2015.

[15] 邵齐. 乳酸菌发酵果蔬浆加工及贮藏期间品质的变化研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2018.

[16] 李丰廷, 邹波, 肖更生, 等. 植物乳杆菌在桑果浆中的发酵特性研究 [J]. 蚕业科学, 2018, 44 (5): 746–752.