

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240813002

乳酸菌发酵对莲藕全粉浆品质的影响

李梦紫, 贾春兰, 易阳, 孙莹, 江雪玉, 彭凯迪*

(武汉轻工大学食品科学与工程学院, 武汉 430048)

摘要: **目的** 探究乳酸菌发酵对莲藕全粉浆品质的影响。**方法** 分别采用植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*, Lp)、嗜酸乳杆菌(*Lactobacillus acidophilus*, La)、类干酪乳杆菌(*Lactobacillus caseioides*, Lc)以及3者的复合菌(compound bacteria, Cb)对莲藕全粉浆进行发酵,测定发酵过程中的乳酸菌菌落数和pH变化,并比较不同乳酸菌发酵对莲藕全粉浆理化品质及感官特性的影响。**结果** Lp、Lc和Cb分别发酵12、6和8h时,莲藕全粉浆中的活菌数均达到8.00 log CFU/mL以上,pH从6.20±0.06下降到4.13±0.24。相比于未发酵莲藕全粉浆,Lp、La和Cb发酵均能使浆液的红色度(a^*)显著降低。乳酸菌发酵均能使浆液黏度增加,其中,La发酵的活菌数最多(9.40 log CFU/mL),且黏弹性最大;发酵后还原糖含量从609.11 mg/L下降到337.85~459.06 mg/L。发酵前后总酚变化不显著,总黄酮含量从243.33 mg/L下降至144.77~200.95 mg/L。发酵积累了有机酸,有机酸含量从2817.17 μg/mL增加到4164.11~5180.92 μg/mL。其中,经过Lp发酵的乳酸、柠檬酸含量最高。在发酵莲藕全粉浆中共检出16种游离氨基酸,氨基酸含量最高的是精氨酸。此外,除Lp,其余发酵组鲜味氨基酸总量显著上升($P<0.05$)。不同乳酸菌发酵均能显著提高莲藕全粉浆的抗氧化性,并改善其风味和口感。**结论** 本研究结果可为乳酸菌发酵莲藕全粉浆研发提供理论依据。

关键词: 莲藕全粉浆; 乳酸菌; 理化品质; 感官特性

Effects of lactic acid bacteria fermentation on the quality of lotus root whole powder slurry

LI Meng-Zi, JIA Chun-Lan, YI Yang, SUN Ying, JIANG Xue-Yu, PENG Kai-Di*

(School of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430048, China)

ABSTRACT: Objective To explore the effects of lactic acid bacteria fermentation on the quality of lotus root whole powder slurry. **Methods** The lotus root whole powder slurry was fermented separately by *Lactobacillus plantarum* (Lp), *Lactobacillus acidophilus* (La), *Lactobacillus caseioides* (Lc), and a composite of these 3 bacteria (Cb). The changes in the number of lactic acid bacteria and pH during fermentation were measured, and the effects of different lactic acid bacteria fermentation on the physicochemical quality and sensory characteristics of lotus root whole slurry were compared. **Results** When Lp, Lc and Cb were fermented for 12, 6 and 8 h, respectively, the number of viable bacteria in the whole slurry of lotus root reached more than 8.00 log CFU/mL, and the pH decreased

基金项目: 湖北省重点研发计划项目(2022BBA0023、2021BED006、2024BBB044)、湖北省农产品加工与转化重点实验室开放课题项目(2023HBSQGDKFB03)

Fund: Supported by the Science and Technology Department of Hubei Province (2022BBA0023, 2021BED006, 2024BBB044), and the Open Project of Hubei Key Laboratory of Agricultural Products Processing and Transformation (2023HBSQGDKFB03)

***通信作者:** 彭凯迪, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品组分间相互作用和功能性食品的创制。E-mail: kaidi19930218@outlook.com

***Corresponding author:** PENG Kai-Di, Ph.D, Lecturer, School of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430048, China. E-mail: kaidi19930218@outlook.com

from 6.20 ± 0.06 to 4.13 ± 0.24 . Fermentation by lactic acid bacteria also enhanced the viscoelasticity of the lotus root whole powder slurry. Notably, the La-fermented sample exhibited the highest viable bacteria count ($9.40 \log \text{CFU/mL}$) and viscoelasticity. Apart from the Lc group, the red color values (a^*) of the other three fermented lotus root whole powder slurry groups was decreased compared to the unfermented samples. Post-fermentation, the reducing sugar content decreased from 609.11 mg/L to $337.85\text{--}459.06 \text{ mg/L}$, the total phenol content remained unchanged, while the total flavonoid content decreased from 243.33 mg/L to $144.77\text{--}200.95 \text{ mg/L}$. Organic acids accumulated during fermentation, with organic acid content rising from $2817.17 \mu\text{g/mL}$ to $4164.11\text{--}5180.92 \mu\text{g/mL}$. Additionally, the Lp-fermented sample demonstrated the highest lactic acid, citric acid content. The 16 kinds of free amino acids were detected in the fermented slurry, with arginine being the most abundant. Except for the Lp group, all other fermentation groups showed a significant increase in the total amount of umami amino acids ($P < 0.05$). The fermentation of different lactic acid bacteria could significantly improve the antioxidant activity, flavor and taste of lotus root whole powder slurry. **Conclusion** The results can provide theoretical basis for the research and development of lotus root whole powder fermented by lactic acid bacteria.

KEY WORDS: lotus root whole powder slurry; lactic acid bacteria; physical and chemical quality; organoleptic properties

0 引言

乳酸菌(lactic acid bacteria)是一类革兰氏阳性菌,能利用可发酵碳水化合物产生大量乳酸,并且在食品工业中的果蔬发酵应用成为了研究热点。果蔬中富含碳水化合物、矿物质、有机酸等营养物质,是乳酸菌发酵的理想基质^[1]。通过乳酸菌发酵,果蔬中的营养成分和生物活性物质会发生变化^[2],对果蔬制品的口感、营养价值等有改善作用^[3]。有研究表明,乳酸菌进行发酵时可合成胞外多糖,有助于改善果蔬的流变学特征,增加果蔬的黏稠度,提升果蔬的稳定性^[4]。此外,乳酸菌发酵的果蔬还具有改善肠道菌群^[5]、抗氧化^[6]、降血糖^[7]等多种功能特性。例如,使用植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*, Lp)发酵的木薯具有更好的产品性能^[8];通过使用嗜酸乳杆菌(*Lactobacillus acidophilus*, La)发酵可以提高甘薯抗氧化活性,抑制癌细胞的增殖^[9];使用类干酪乳杆菌(*Lactobacillus caseioides*, Lc)发酵可以改善甜菜的风味,提高甜菜汁的贮藏稳定性^[10]。

莲藕(*Nelumbo nucifera* Gaertn.)是莲科植物的可食根茎,作为一种水生经济作物广泛种植于我国长江中下游流域,也是湖北省栽培的特色水生蔬菜之一^[11],在湖北省莲种植面积约 9.63 万 hm^2 ^[12]。莲藕的营养价值高,含多酚、淀粉、膳食纤维、维生素等营养成分^[13]。研究证明从莲藕中提取的生物活性成分具有多种生理功能,如抗炎、抗氧化、抗衰老等^[14]。近年来,莲藕除被广泛用作鲜食材料,还被加工成多种产品,包括腌制藕片、藕汁饮料以及藕淀粉等。尽管藕淀粉已实现商业化生产,但其仅利用了莲藕中的淀粉成分,而其他营养成分尚未得到充分开发和利用。相较之下,莲藕全粉综合利用了整个莲藕,含有丰富的膳食纤维,营养价值更高。在莲藕全粉中引入乳酸菌发酵,

能提高品质与增加产品多样性。目前,将莲藕进行发酵的报道主要集中在莲藕果醋的风味^[15]、莲藕汁发酵酸奶的口感^[16]和将乳酸菌喷涂在莲藕表面保鲜^[17]等方面,关于乳酸菌发酵莲藕全粉的营养品质特性的研究报道相对较少。因此,本研究通过乳酸菌发酵改善莲藕全粉的营养品质,扩展莲藕全粉在食品加工领域的多样化应用。

综上,本研究以莲藕全粉为发酵基质,考察不同乳酸菌发酵过程中的活菌数和 pH 变化,并比较发酵后莲藕全粉浆的色泽、流变特性、营养组成和抗氧化活性差异,并进行感官评定,探究乳酸菌发酵对莲藕全粉浆营养成分和感官特性的影响,为发酵型莲藕全粉产品的精深加工提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜莲藕“武植二号”,采收于湖北省武汉市江夏区棋良公司莲藕生产基地。将新鲜莲藕去皮、清洗、切块、 $65 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干 10 h 、粉碎后过 80 目 筛即为莲藕全粉,于干燥器皿中保存备用。

Lp(保藏号为 CICC 24437),购买于中国工业微生物菌种保藏中心;La(保藏号为 GDMCC NO.1.731)和 Lc(保藏号为 GDMCC NO.1.159)购买于广东省微生物菌种保藏中心。

德氏乳杆菌(De Man-Rogosa-Sharpe, MRS)肉汤培养基、MRS 琼脂培养基(青岛高科技工业园海博生物技术有限公司);福林-酚(Folin-ciocalteu, FC)(武汉特尔惠生物科技有限公司);95%芦丁标准品(上海源叶生物科技有限公司);1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)(北京雷根生物技术有限公司);2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐 [2,2'-azinobis-(3-

ethylbenzthiazoline-6-sulphonate, ABTS)]试剂盒(上海生工有限公司); 苯酚、浓硫酸、氢氧化钠、葡萄糖、3,5-二硝基水杨酸、酒石酸钾钠、偏重亚硫酸钠、酚酞、邻苯二甲酸氢钾、没食子酸、酒石酸、柠檬酸、乳酸、琥珀酸、草酸、丙酸、丙二酸、甲酸(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

5804R 冷冻高速离心机(德国艾本德股份有限公司); GI54DS 立式高压蒸汽灭菌锅[致微(厦门)仪器有限公司]; A360 型紫外可见分光光度计[翱艺仪器(上海)有限公司]; PB-10 型 pH 计(德国 Sartorius 公司); SPX-250B-Z 生化培养箱(上海博讯实业有限公司); 界面流变仪(英国马尔文有限公司); UltraScan VIS 全自动色差仪(美国 HunterLab 公司); SUNRISE 酶标定量测定仪[西化仪(北京)科技有限公司]; Agilent 1200 高效液相色谱仪(美国 Agilent 公司); L-8900 全自动氨基酸分析仪(日本日立公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 菌种活化

将-80 °C 冰箱中甘油管保藏的乳酸菌分别接种到 MRS 肉汤培养基中, 于 37 °C 恒温培养 9 h, 备用。

1.3.2 莲藕全粉浆发酵

莲藕全粉和水按 1:25 (*m/v*) 混合, 于 121 °C 高压蒸汽灭菌 15 min。待莲藕浆冷却后, 以 0.1% (*v/v*) 接种量分别将单一菌种 Lp、La、Lc 的菌悬液和复合菌液(compound bacteria, Cb)(Lp、La、Lc 比例为 3:1:2) 接种于莲藕浆中, 于 37 °C 下发酵 24 h, 得到发酵莲藕全粉浆。以相同条件下未接种发酵的莲藕全粉浆为对照(Control)。

1.3.3 活菌数与 pH 的测定

参照 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》测定不同乳酸菌发酵莲藕全粉浆的活菌数; pH 测定使用 pH 计。

1.3.4 色泽分析

通过手持色差仪测定莲藕全粉浆的色泽, 其中 L^* 表示亮度, a^* 表示红绿值, b^* 表示黄蓝值。在测定前使用白版进行校准, 平行测定 5 次取平均值。

1.3.5 流变学特性测定

参考文献[18]的方法进行流变学特性的测定。选用直径为 40 mm 的锥板, 板间隙为 1 mm, 在 0.1% 的恒定应变下, 在 0.1~100.0 Hz 范围内对样品进行频率扫描。黏度通过剪切扫描测定, 剪切速率的范围设为 0.01~100.00 s^{-1} 。所有样品在 25 °C 下进行测量。

1.3.6 还原糖、总酚和总黄酮含量的测定

参考文献[19]的方法测定莲藕全粉浆中还原糖, 参考文献[20]的方法测定总酚和总黄酮的含量, 并稍做修改。样品前处理: 取 4 mL 藕浆加 6 mL 无水乙醇, 混匀后置于 200 W 超声场中浸提 40 min、10000 r/min 转速离心 15 min,

取上清液。

采用二硝基水杨酸法测定上清液中还原糖含量: 取上清液 2 mL 加入试管, 并加入 3 mL 二硝基水杨酸试剂, 经 5 min 沸水浴处理后立即冷却, 加入 3 mL 蒸馏水, 于 540 nm 处测定吸光度。以干燥至恒重的无水葡萄糖绘制标准曲线。

采用 Folin-ciocalteu 法测定上清液中总酚含量: 取上清液 200 μ L 加入 800 μ L 去离子水, 向其中加入 125 μ L Folin-ciocalteu 试剂, 混匀后在 25 °C 下避光反应 6 min, 再加入 7% 的碳酸钠溶液 1.25 mL, 补加去离子水至 3 mL, 充分混匀后在 25 °C 下避光反应 90 min。反应结束后采用分光光度计测定 760 nm 处的吸光度, 以没食子酸标准溶液建立总酚含量测定的标准曲线, 并进一步计算藕浆中总酚含量(mg/L)。

采用硝酸铝显色法测定上清液中总黄酮含量: 取 4 mL 上清液加入 0.3 mL 5% $NaNO_2$, 混匀静置 6 min, 加入 0.3 mL 10% $Al(NO_3)_3$, 再混匀静置 6 min, 加入 4 mL 1.0 mol/L NaOH, 用 80% 乙醇定容至 10 mL, 混匀静置 15 min。反应结束后采用分光光度计测定 510 nm 下的吸光度, 配置芦丁标准溶液建立总黄酮含量标准曲线。

1.3.7 有机酸的测定

参照 GB 5009.157—2016《食品安全国家标准 食品中有机酸的测定》测定莲藕全粉浆中的有机酸含量。有机酸测定样品前处理: 取莲藕全粉浆 5 mL 于离心机离心 (10800 r/min, 5 min), 上清液过微孔滤膜(0.22 μ m), 得到供试品溶液。

采用 Agilent 1260 高效液相色谱系统, 适配 Agilent 1260 VWD 检测器, 色谱柱为 Agilent ZORBAX SB-C₁₈ (4.6 mm×250 mm, 5 μ m), 流动相为 20 mmol/L NaH_2PO_4 水溶液(pH 2.7), 流速 0.8 mL/min, 等梯度洗脱。柱温 40 °C, 进样量 20 μ L, 检测波长 210 nm。

混合标准品溶液的制备称取酒石酸、柠檬酸、乳酸、琥珀酸、草酸、丙酸、丙二酸、甲酸, 用超纯水溶解配制标准品溶液, 按以上色谱条件进行测定。

1.3.8 游离氨基酸测定

采用氨基酸全自动分析仪进行氨基酸测定。程序为 Hydrolysate Standard, 锂盐柱分析柱, Pressure E 压力 25~40 bar, Pressure R 压力 8~12 bar, 茚三酮流速 240 μ L/min, 流动相为含锂离子溶液, 流速 120 μ L/min, 柱温 40 °C, 反应器温度 115 °C, 进样量 30 μ L; 混合标准品溶液浓度 62.5 nmol/mL。

样品的处理参考杨阳等^[21]的方法。准确称取 3 g 样品于 15 mL 离心管中, 加 0.02 mol/L 的盐酸 5 mL, 旋涡混匀 5 min, 超声提取 5 min, 避光静置 2 h, 4000 r/min, 离心 10 min, 准确取 1 mL 上清液, 加入 1 mL 6%~8% 磺基水杨酸, 涡旋 1 min, 避光静置 1 h, 15000 r/min, 离心 15 min, 取上清液用 0.22 μ m 的滤膜过滤后, 上机测定。

1.3.9 抗氧化能力测定

样品参照 1.3.6 进行预处理。

DPPH 自由基清除能力参考文献[22]方法测定, 并稍作修改。以无水乙醇溶解制备质量浓度为 0.056 mg/mL 的 DPPH 工作液, 于 -20 °C 避光保存。分别将 2 mL DPPH 溶液和 1 mL 无水乙醇, 2 mL DPPH 溶液和 1 mL 样品溶液, 2 mL 无水乙醇和 1 mL 样品样液, 混合、摇匀后避光反应 30 min, 于 517 nm 处测定吸光度。样液的 DPPH 自由基清除率 C (%) 按如下公式(1)计算:

$$C/\%=[1-(A_s-A_t)/A_0]\times 100\% \quad (1)$$

式中: A_0 表示 2 mL DPPH 溶液和 1 mL 无水乙醇的吸光度, A_s 表示 2 mL DPPH 溶液和 1 mL 样品溶液的吸光度, A_t 表示 2 mL 无水乙醇和 1 mL 样品样液的吸光度。

ABTS⁺自由基清除能力参考文献[23]方法测定, 并稍作修改。将样品用 pH 7.2、0.2 mol/L 的磷酸盐缓冲液稀释 5 倍后取 5 μ L 于 96 孔酶标板中, 加入 195 μ L 7 mmol/L ABTS⁺溶液, 避光反应 8 min 后于 734 nm 处测定吸光度。结果以 trolox 等效抗氧化能力(trolox-equivalent antioxidant capacity, TEAC)来表示(mmol/L)。

1.3.10 感官评价

参照杨艳君等^[24]的方法并修改, 从香气、口感、色泽、风味和整体可接受度 5 方面对乳酸菌发酵莲藕全粉浆进行感官评定打分, 评定过程由 14 名专业人员组成的感官评定小组进行, 结果计算方式为去掉一个最高分和一个最低分取余下结果的平均值。感官评价标准见表 1。

表 1 乳酸菌发酵莲藕全粉浆感官评价标准
Table 1 Sensory evaluation standard of lactic acid bacteria fermented lotus root whole powder slurry

项目	评分标准	评分
香气(20分)	各种香气协调纯正, 有良好的莲藕香气及发酵特有的香气	14~20
	莲藕香气及发酵特有的香气较淡	7~13
	香气不明显, 有轻微异味	0~6
口感(20分)	口感丰富、醇厚、细腻, 香气浓郁	14~20
	口感略为单薄, 香气不浓郁	7~13
	口感单薄, 有异味	0~6
色泽(20分)	颜色明亮, 有光泽且色泽均一	14~20
	颜色较浅或较深, 无光泽	7~13
	其他颜色	0~6
风味(20分)	风味独特, 典型性好	14~20
	风味优良, 典型性较好	7~13
	没有优良的气味	0~6
整体可接受度(20分)	非常喜欢	14~20
	一般喜欢	7~13
	不喜欢	0~6

1.4 数据处理

所有的实验重复 3 次或以上, 结果以平均值 \pm 标准偏差表示, 采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS Statistics 26 进行数

据处理与显著性分析, Origin 2021 进行相关图形的绘制。

2 结果与分析

2.1 莲藕全粉发酵过程中的活菌数与 pH 变化

由图 1A 可知, 随着发酵时间的增加, Lp、La、Lc、Cb 活菌数先显著增加, 分别在 12、6、12、8 h 达到最大值, 为 8.69、9.40、8.87 和 8.56 log CFU/mL; 随后, Lp 和 Cb 的活菌数趋于稳定, La 和 Lc 的活菌数有所下降; 在发酵 24 h 后, 4 组莲藕全粉浆的活菌数约为 8.34 log CFU/mL。其中, La 在发酵 6 h 左右, 活菌数相较于其他组最大, 这可能与 La 具有更强的糖苷水解酶活性相关, 能充分利用莲藕全粉浆促进其增殖^[25]。如图 1B 所示, 莲藕全粉浆的 pH 随着发酵时间的增加先快速减少而后趋于平稳, Lp、La 和 Lc 组均在 12 h 后 pH 最低, 分别为 3.76、3.96 和 4.08, 而 Cb 在发酵 8 h 后 pH 最低, 为 4.32。结果表明, 乳酸菌能很好地利用莲藕全粉浆进行生长代谢而产生酸性物质使浆液 pH 下降。基于不同乳酸菌在莲藕全粉浆的生长情况, 选择菌种处于其生长对数末期时终止发酵进行后续实验。

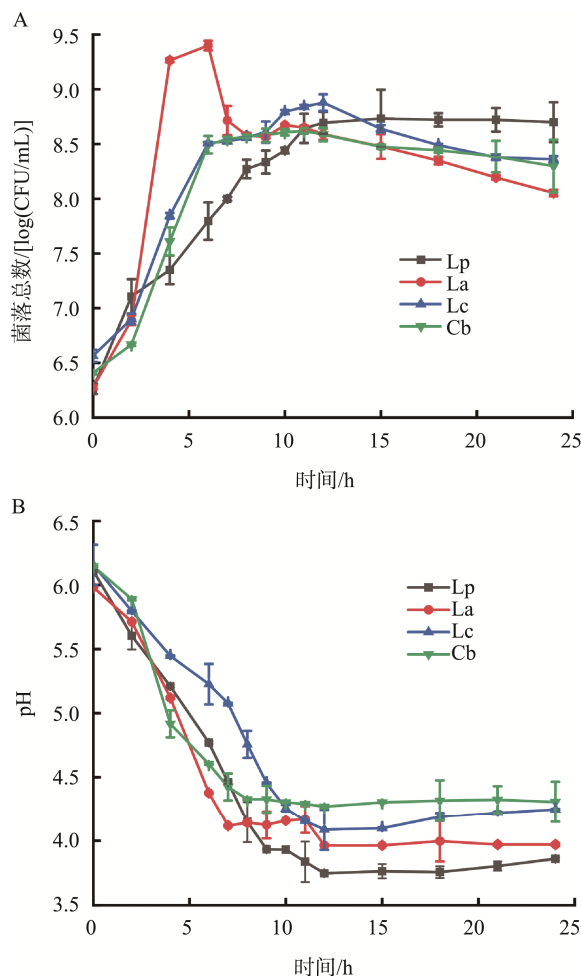


图1 莲藕全粉浆发酵过程中乳酸菌数量(A)和pH(B)的变化
Fig.1 Changes in the number of lactic acid bacteria (A) and pH (B) during the fermentation of lotus root whole powder slurry

2.2 不同乳酸菌发酵莲藕全粉浆的流变特性

如图 2A 所示,未发酵莲藕全粉浆的表观黏度初始值为 0.22 Pa·s,在测试的剪切速率范围内保持稳定,表现出牛顿流体的特征^[26]。通过不同乳酸菌发酵后,Lp、La、Lc 和 Cb 组的初始表观黏度(分别 1.32、0.95、0.61 和 0.99 Pa·s)明显增加,可能是由于乳酸菌发酵过程中产生酶或有机酸^[27],使莲藕全粉中的直链淀粉聚合度下降以及支链淀粉分支密度降低,有利于淀粉凝胶的形成,使其黏度增加^[28-29]。此外,发酵莲藕全粉浆的黏度随着剪切速率的增加逐渐下降后趋于稳定,呈现出非牛顿剪切稀化的流变学行为。剪切速率的增加会破坏莲藕全粉浆的网状结构,分子链间的纠缠被破坏,导致分子链的方向变得随机,相互链之间的作用力减小,从而导致表观黏度降低^[30-31]。

为了进一步探究核莲藕全粉浆的凝胶网络交联强度,分别测定了 5 种样品的黏弹性响应,如图 2B G' (储存模量)和图 2C G'' (损耗模量)分别代表样品内部结构的弹性特征和黏性特征。所有莲藕全粉浆的 G' 均大于 G'' ,说明浆液的弹性强

于黏性。在相同频率下,乳酸菌发酵后浆液的 G' 和 G'' 均高于未发酵浆液,其中,La 的黏弹性最高。可能的原因是乳酸菌发酵产酸,破坏莲藕全粉中的淀粉分子无定型区的结构,增加淀粉分子的水合能力以及淀粉分子间的相互作用,形成更加稳固和黏弹性更强的网状结构,表明乳酸菌发酵能改善莲藕全粉浆的黏弹性^[32]。

2.3 不同乳酸菌发酵对莲藕全粉浆色泽的影响

不同莲藕全粉浆的色泽如表 2 所示,未发酵浆液的 L^* 、 a^* 和 b^* 分别为 42.07、9.82 和 14.50。相比于未发酵莲藕全粉浆,发酵对浆液的 L^* 和 b^* 无显著影响;而除 Lc 外,其他 3 组乳酸菌发酵(Lp, La, Cb)均使浆液的 a^* 减少,即红色度降低。此外,不同乳酸菌组发酵前后浆液的色差值 ΔE 无显著差异,说明不同乳酸菌发酵对浆液色泽的影响无明显差异,这与陈大卫等^[33]研究一致。乳酸菌发酵利用莲藕全粉以及产生一系列代谢产物,使其颜色发生变化,但具体的原因还有待更深入的研究^[34]。

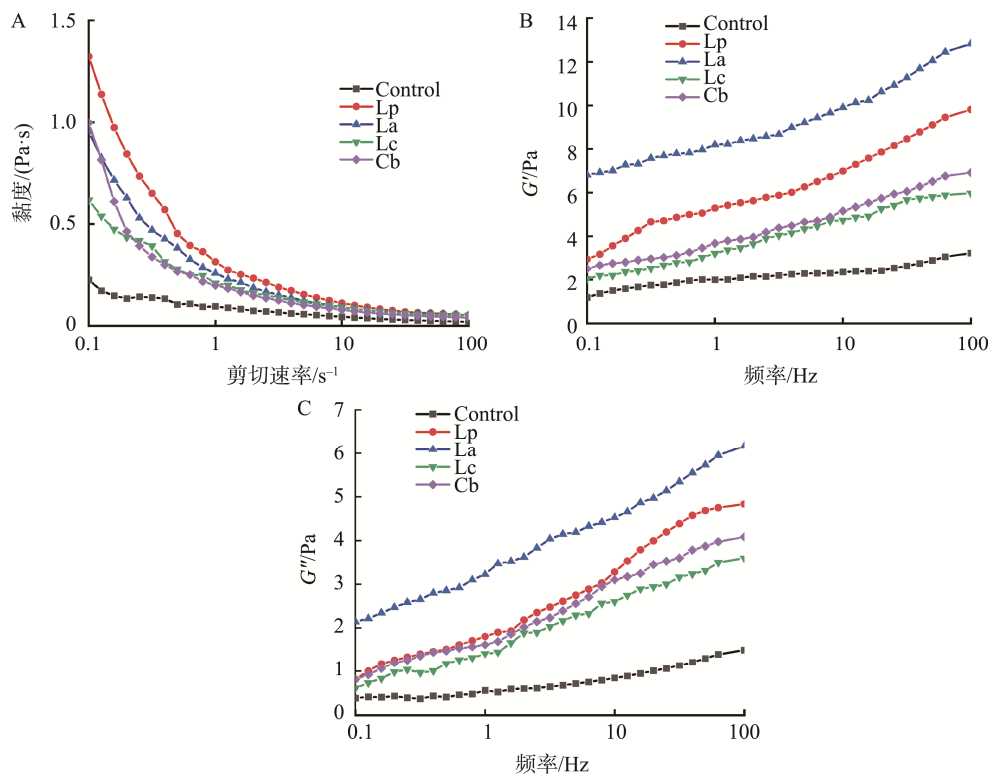


图2 不同乳酸菌发酵莲藕全粉浆的流变学特性

Fig.2 Rheological properties of lotus root whole powder slurry fermented by different lactic acid bacteria

表 2 不同乳酸菌发酵对莲藕全粉浆色泽的影响

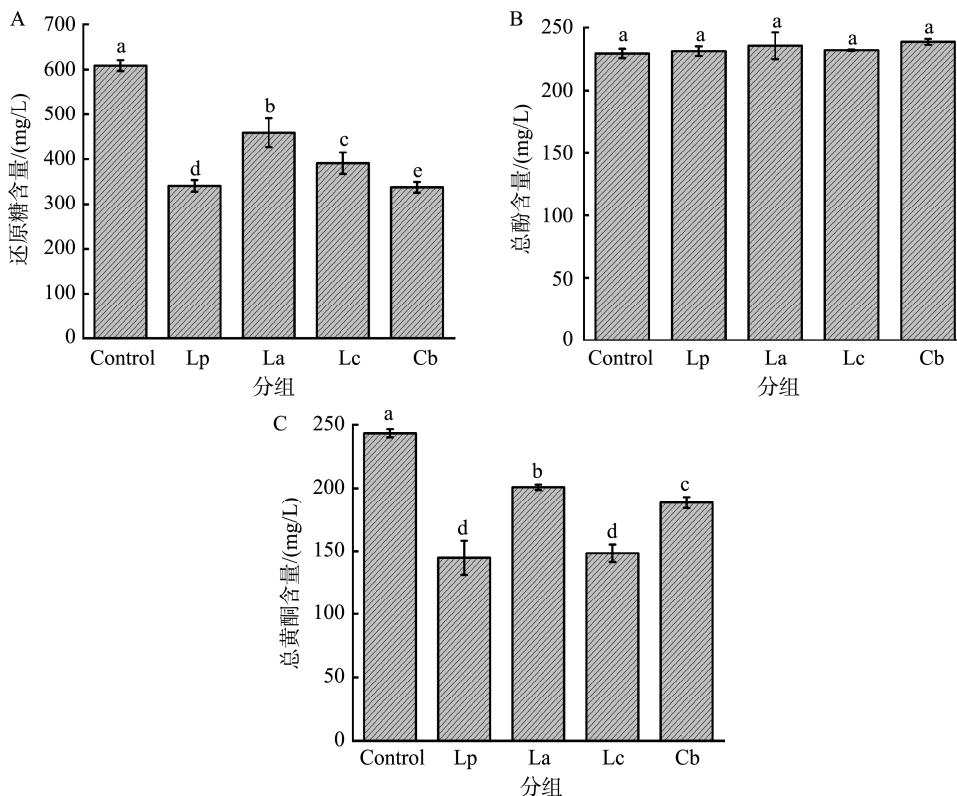
Table 2 Effects of fermentation of different lactic acid bacteria on the color of lotus root whole powder slurry

	Control	Lp	La	Lc	Cb
L^*	42.07±4.67 ^a	41.35±0.78 ^a	41.52±3.86 ^a	38.22±1.41 ^a	41.92±1.72 ^a
a^*	9.82±1.79 ^a	6.05±3.50 ^b	4.72±2.78 ^b	7.15±1.74 ^a	5.25±1.56 ^b
b^*	14.50±7.66 ^a	10.55±2.22 ^a	8.02±3.59 ^a	8.02±1.69 ^a	10.00±1.37 ^a
ΔE	/	10.01±7.18 ^a	12.92±6.85 ^a	9.85±7.28 ^a	9.17±4.63 ^a

注:不同小写字母表示同一组具有显著性差异($P < 0.05$),下表同。/表示无此数据。

2.4 不同乳酸菌发酵莲藕全粉浆中还原糖、总酚以及总黄酮含量分析

由图 3A 可知, 未发酵莲藕全粉浆中还原糖含量为 609.11 mg/L, 不同乳酸菌发酵后(Lp、La、Lc 和 Cb)还原糖含量均有所降低, 分别为 340.84、459.06、391.31 和 337.85 mg/L, 其中 Cb 发酵组发酵浆中还原糖降低最多为 44.53%。不同乳酸菌对还原糖的代谢能力有所不同, 且复合菌相比于单一菌种表现出更强的代谢能力, 可能的原因是复合菌的协同作用以及利用不同菌种的代谢途径可提高对还原糖的代谢能力^[35]。如图 3B 所示, 发酵组浆液中的总酚含量和未发酵组无明显差异, 约为 247.35 mg/L。这与文献中乳酸菌发酵的蜜桃果酱中总酚含量的变化研究结果一致^[36]。可能的原因是乳酸菌不能代谢莲藕浆中的酚类物质, 或一些酚类物质经过复杂的代谢途径转化为其他形式的酚类或非酚类物质^[37], 这些转化途径的复杂性和特异性导致总酚含量在发酵过程中保持不变。如图 3C 所示, 未发酵莲藕浆中总黄酮的含量为 243.33 mg/L, 通过不同菌种发酵后总黄酮含量均降低, 其中, Lp 和 Lc 总黄酮含量最低, 分别为 144.77 和 148.38 mg/L。可能是乳酸菌发酵过程酶类化合物发生生物转化, 破坏黄酮类化合物结构^[38], 从而导致总黄酮含量下降。ZHAO 等^[39]发现使用 Lp 发酵枣枸杞复合汁, 总黄酮含量降低 14.15%, 这与本研究总黄酮含量下降趋势一致。



注: 不同字母表示组间具有显著性差异, $P < 0.05$, 图4同。

图3 乳酸菌发酵对莲藕全粉浆还原糖、总酚和总黄酮的影响

Fig.3 Effects of lactic acid bacteria fermentation on reducing sugar, total phenols and total flavonoids of lotus root whole powder slurry

2.5 不同乳酸菌发酵莲藕全粉浆中有机酸的含量

如表 3 所示, 经不同乳酸菌发酵后, 莲藕全粉浆中的乳酸、丙酸和乙酸含量显著增加, 主要的原因是因为乳酸菌生长代谢过程中产生的酶类如淀粉酶、脂肪酶等能将糖类、脂类等物质转化成有机酸, 使乳酸、丙酸和乙酸含量显著增加^[40], 这与曹晶晶等^[41]研究的乳酸菌发酵甘薯淀粉结果相似。其中, 相比于未发酵组乳酸(未检测到)、丙酸(205.88 $\mu\text{g/mL}$)和乙酸(147.42 $\mu\text{g/mL}$)的含量, Lp 发酵莲藕全粉浆中乳酸含量最高, 为 2679.33 $\mu\text{g/mL}$; Cb 发酵莲藕全粉浆的丙酸含量最高, 为 283.17 $\mu\text{g/mL}$; La 发酵莲藕全粉浆中乙酸含量最高, 为 1188.88 $\mu\text{g/mL}$ 。乳酸可以提高发酵食品的防腐性和安全性^[42]。丙酸被结肠吸收后可以通过抑制 3-羟基-3-甲基戊二酰辅酶 A 还原酶活性, 降低胆固醇的合成, 对人体结肠健康产生积极作用^[43]。乙酸可被血液吸收后进入肝脏进行代谢, 用于合成脂质和胆固醇。说明不同乳酸菌发酵均可改善莲藕全粉浆的营养品质。乳酸菌发酵后, 浆液中的草酸、酒石酸、丙二酸和柠檬酸均显著下降, 与其他 3 株乳酸菌发酵相比, Lp 发酵莲藕浆中柠檬酸含量最高, 为 1228.49 $\mu\text{g/mL}$ 这与陈晓维等^[34]报道乳酸菌发酵对红枣浆中有机酸的影响结果相类似。发酵后酒石酸、柠檬酸含量降低可能是乳酸菌在发酵过程中分解酒石酸和柠檬酸产生乳酸和醋酸, 作为碳源被消耗, 导致含量降低。此外, 相比于未发酵莲藕全粉浆甲酸含量

(753.32 $\mu\text{g/mL}$), 不同乳酸菌发酵浆液中均有所降低, 其中, Cb 组中含量最低为 732.88 $\mu\text{g/mL}$ 。

2.6 不同乳酸菌发酵莲藕浆中游离氨基酸种类及含量

如表 4 所示, 莲藕全粉浆中共检出 16 种游离氨基酸, 包含 7 种必需氨基酸、2 种半必需氨基酸以及 7 种非必需氨基酸。相比于未发酵组, 不同乳酸菌发酵组中的必需氨基酸含量包括 Thr、Leu、Ile、Val、Met 和 Phe 的含量均下降。同时, Lp 和 Cb 发酵对莲藕全粉浆中的必需氨基酸 Lys 无显著影响, 而 La 发酵对莲藕全粉浆中的必需氨基酸总量显著增加($P<0.05$)。不同乳酸菌发酵浆液中的半必需氨基酸含量无显著影响, 其中, Arg 在发酵莲藕全粉浆中的含量最高。对于非必需氨基酸, 不同乳酸菌发酵均使浆液中 Gly、Tyr、Ala 和 Glu 含量减少, 而对其中的 Cys 无显著影

响; 此外, 不同浆液中的 Ser 和 Asp 也有所差异, Lc 发酵的莲藕全粉浆中 Ser 含量最高, 为 0.42 mg/mL ; Lc 和 Cb 发酵的莲藕全粉浆中的 Asp 含量较高, 为 3.76 mg/mL 。不同乳酸菌发酵对莲藕全粉浆中的氨基酸含量影响不同。一方面乳酸菌在发酵过程中产生的蛋白酶能分解大分子蛋白质, 生成多肽类物质和氨基酸, 促进氨基酸的增加^[44]。另一方面, 在发酵过程中乳酸菌将氨基酸转化成挥发性风味物质(低碳数的醇、醛、酸、酯)会使氨基酸含量下降^[45]。乳酸菌在发酵过程中能代谢转化氨基酸生成具有特征香味如果香、脂香等物质, 将氨基酸按呈味方式进行分类, 分为鲜味氨基酸(Glu、Asp、Lys)、甜味氨基酸(Thr、Ser、Gly、Ala、Leu、Val)和苦味氨基酸(Tyr、Ile、Leu、Phe、Arg、His)。经不同乳酸菌发酵后, 除 Lp 发酵莲藕浆中鲜味氨基酸总量显著下降外, La、Lc 和 Cb 发酵莲藕浆鲜味氨基酸

表 3 不同乳酸菌发酵莲藕全粉浆中有机酸的含量

Table 3 Content of organic acids in the lotus root whole powder slurry fermented by different lactic acid bacteria

有机酸种类	含量/ $(\mu\text{g/mL})$				
	Control	Lp	La	Lc	Cb
草酸	11.24 \pm 0.01 ^a	5.31 \pm 0.03 ^b	3.76 \pm 0.01 ^c	3.54 \pm 0.01 ^d	3.36 \pm 0.01 ^e
酒石酸	63.35 \pm 0.98 ^a	37.73 \pm 0.01 ^c	42.08 \pm 0.79 ^b	41.06 \pm 1.10 ^b	40.81 \pm 1.07 ^b
甲酸	753.32 \pm 2.92 ^a	742.57 \pm 8.30 ^{ab}	737.56 \pm 6.53 ^b	747.82 \pm 7.66 ^{ab}	732.88 \pm 5.39 ^b
丙二酸	275.73 \pm 0.71 ^a	68.44 \pm 0.00 ^b	ND	ND	ND
乳酸	ND	2679.33 \pm 7.97 ^a	1043.18 \pm 10.31 ^d	1748.91 \pm 9.79 ^b	1441.72 \pm 3.18 ^c
乙酸	147.42 \pm 0.91 ^c	412.18 \pm 9.19 ^d	1188.88 \pm 14.85 ^a	1043.08 \pm 17.80 ^b	1002.94 \pm 8.28 ^c
柠檬酸	1360.20 \pm 3.53 ^a	1228.49 \pm 8.83 ^b	880.75 \pm 1.47 ^c	857.95 \pm 1.00 ^d	827.54 \pm 0.83 ^c
丙酸	205.88 \pm 3.79 ^d	276.87 \pm 0.00 ^{ab}	267.90 \pm 2.00 ^b	256.80 \pm 5.83 ^c	283.17 \pm 3.86 ^a

注: ND 表示未检出。

表 4 不同乳酸菌发酵莲藕全粉浆中游离氨基酸含量

Table 4 Content of free amino acids in the lotus root whole powder slurry fermented by different lactic acid bacteria

游离氨基酸种类	含量/ (mg/mL)				
	Control	Lp	La	Lc	Cb
Lys (赖氨酸)	0.02 \pm 0.01 ^c	0.02 \pm 0.01 ^c	0.49 \pm 0.01 ^a	0.39 \pm 0.01 ^b	0.02 \pm 0.01 ^c
Thr (苏氨酸)	1.39 \pm 0.02 ^a	1.09 \pm 0.02 ^{bc}	1.17 \pm 0.02 ^b	1.01 \pm 0.06 ^b	1.16 \pm 0.01 ^b
Leu (亮氨酸)	0.63 \pm 0.06 ^a	0.22 \pm 0.03 ^c	0.46 \pm 0.01 ^b	0.38 \pm 0.01 ^b	0.37 \pm 0.09 ^b
Ile (异亮氨酸)	1.30 \pm 0.10 ^a	0.78 \pm 0.14 ^b	1.25 \pm 0.03 ^a	1.17 \pm 0.02 ^a	1.09 \pm 0.19 ^a
Val (缬氨酸)	1.10 \pm 0.01 ^a	0.76 \pm 0.06 ^c	0.96 \pm 0.02 ^b	0.87 \pm 0.02 ^b	0.90 \pm 0.05 ^b
Met (蛋氨酸)	0.20 \pm 0.04 ^a	0.10 \pm 0.04 ^b	0.19 \pm 0.01 ^a	0.10 \pm 0.01 ^a	0.14 \pm 0.04 ^a
Phe (苯丙氨酸)	0.78 \pm 0.10 ^a	0.12 \pm 0.05 ^b	0.66 \pm 0.01 ^a	0.63 \pm 0.01 ^a	0.71 \pm 0.08 ^a
必需氨基酸总量	5.42 \pm 0.33 ^a	3.09 \pm 0.35 ^c	5.18 \pm 0.11 ^{ab}	4.55 \pm 0.14 ^b	4.39 \pm 0.47 ^b
Arg (精氨酸)	10.39 \pm 0.40 ^a	10.56 \pm 0.17 ^a	10.47 \pm 0.38 ^a	10.32 \pm 0.28 ^a	10.39 \pm 0.23 ^a
His (组氨酸)	0.65 \pm 0.01 ^a	0.58 \pm 0.01 ^b	0.57 \pm 0.01 ^b	0.55 \pm 0.01 ^b	0.58 \pm 0.02 ^b
半必需氨基酸总量	11.04 \pm 0.41 ^a	11.14 \pm 0.18 ^a	11.04 \pm 0.39 ^a	10.87 \pm 0.29 ^a	10.97 \pm 0.25 ^a
Gly (甘氨酸)	0.07 \pm 0.01 ^a	0.01 \pm 0.01 ^c	0.02 \pm 0.01 ^c	0.06 \pm 0.01 ^b	0.02 \pm 0.01 ^c
Tyr (酪氨酸)	1.31 \pm 0.11 ^a	0.47 \pm 0.11 ^b	1.26 \pm 0.05 ^a	1.21 \pm 0.07 ^a	1.06 \pm 0.22 ^a
Cys (半胱氨酸)	0.40 \pm 0.05 ^a	0.42 \pm 0.09 ^a	0.46 \pm 0.01 ^a	0.48 \pm 0.01 ^a	0.40 \pm 0.08 ^a
Ala (丙氨酸)	2.27 \pm 0.04 ^a	1.79 \pm 0.02 ^b	1.81 \pm 0.05 ^b	1.83 \pm 0.06 ^b	1.75 \pm 0.06 ^b
Ser (丝氨酸)	0.33 \pm 0.01 ^b	0.33 \pm 0.01 ^b	0.31 \pm 0.01 ^b	0.42 \pm 0.07 ^a	0.30 \pm 0.01 ^b
Glu (谷氨酸)	2.28 \pm 0.06 ^a	1.44 \pm 0.01 ^c	2.01 \pm 0.05 ^b	1.95 \pm 0.09 ^b	1.98 \pm 0.02 ^b
Asp (天冬氨酸)	2.63 \pm 0.07 ^b	2.09 \pm 0.03 ^c	3.74 \pm 0.12 ^a	3.76 \pm 0.14 ^a	3.76 \pm 0.02 ^a
非必需氨基酸总量	9.29 \pm 0.35 ^a	6.55 \pm 0.28 ^b	9.61 \pm 0.3 ^a	9.71 \pm 0.45 ^a	9.27 \pm 0.42 ^a
游离氨基酸总量	25.75 \pm 0.76 ^a	20.78 \pm 0.46 ^a	25.83 \pm 0.69 ^a	25.13 \pm 0.74 ^a	24.63 \pm 0.67 ^a
鲜味氨基酸总量	4.95 \pm 0.03 ^c	3.58 \pm 0.04 ^d	6.19 \pm 0.06 ^a	6.15 \pm 0.07 ^a	5.81 \pm 0.07 ^b
甜味氨基酸总量	4.58 \pm 0.07 ^a	3.21 \pm 0.04 ^c	3.91 \pm 0.07 ^c	4.08 \pm 0.01 ^b	3.74 \pm 0.04 ^d
苦味氨基酸总量	13.53 \pm 0.12 ^a	12.40 \pm 0.02 ^d	13.29 \pm 0.01 ^b	12.85 \pm 0.02 ^c	12.90 \pm 0.01 ^c

总量显著增加($P<0.05$)。不同乳酸菌发酵莲藕全粉浆中的甜味氨基酸总量和苦味氨基酸总量相比于未发酵浆液均显著降低($P<0.05$)。有研究表明, 莲藕经乳酸菌发酵后, 风味物质种类较发酵前明显上升, 感官价值得到明显改善^[46]。

2.7 不同乳酸菌发酵莲藕全粉浆的抗氧化活性

本研究通过测定 DPPH 自由基清除率活性和 ABTS⁺ 自由基清除能力来进行莲藕全粉浆的抗氧化活性分析。由图 4A 可知, 未发酵莲藕浆的 DPPH 自由基清除率活性为 68.77%, 经 Lp、La、Lc 和 Cb 发酵后有显著增加($P<0.05$), 分别为 77.05%、77.15%、76.29% 和 79.81%。由图 4B 可知, 相比于未发酵莲藕全粉浆, 不同乳酸菌组发酵均明显增加其 ABTS⁺ 自由基清除能力。各组 ABTS⁺ 自由基清除能力高低分别为 Lp \geq Cb \geq La \geq Lc>control。不同乳酸菌发酵均显著提高了莲藕全粉浆的抗氧化活力, 这可能是乳酸菌含有一定抗氧化酶类成分^[47], 具有抗氧化能力, 从而促进了莲藕全粉浆抗氧化能力的提升。

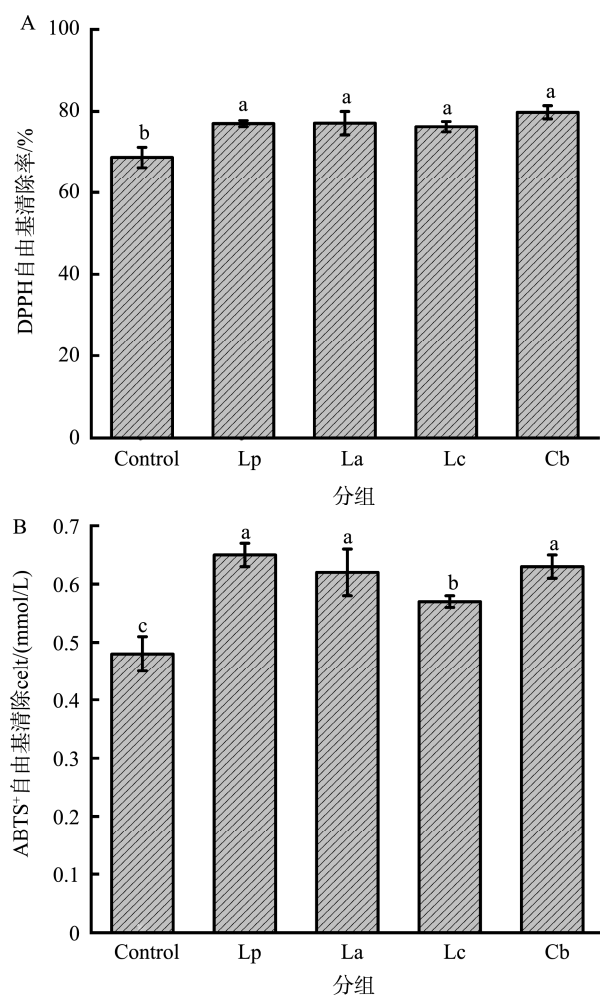


图4 乳酸菌发酵对莲藕全粉浆抗氧化活性的影响

Fig.4 Effects of lactic acid bacteria fermentation on antioxidant activity of lotus root whole powder slurry

2.8 感官评价

不同乳酸菌发酵莲藕全粉的感官评分雷达图如图 5 所示。由图可知, 未发酵和不同乳酸菌发酵液在香气方面具有相近的评分, 差异较小。在口感上, La 和 Cb 的感官评分相对较高, 分别为 15.80 和 16.00 分, 高于 Control 组(14 分)。在色泽方面, Lp、La、Lc 和 Cb 发酵莲藕浆的评分也远高于 Control, 可能的原因是莲藕全粉浆经高温灭菌处理后, 颜色较深, 进一步地, 乳酸菌发酵后浆液颜色变浅, 这与上文莲藕浆的色泽测量分析结果一致, 发酵后的莲藕浆红色度有所下降。在风味上, Lp、La、Lc 和 Cb 发酵均显著提升了莲藕全粉浆的风味, 可能与乳酸菌发酵过程中代谢或生成的有机酸有关。在整体可接受度上, 不同乳酸菌发酵(Lp、La、Lc 和 Cb)的莲藕全粉浆均显著高于未发酵组, 分别为 15.40、16.40、16.40、16.60 和 14.00 分。Lp、La、Lc 和 Cb 发酵均提升了莲藕全粉浆的风味, 可能与乳酸菌发酵过程中代谢或生成的氨基酸和有机酸有关。综上所述, 不同乳酸菌发酵后的莲藕全粉浆相较于未发酵具有更好的感官品质。

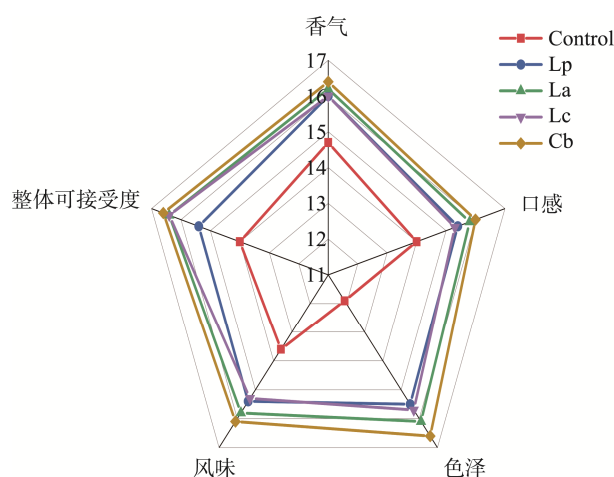


图5 乳酸菌发酵莲藕全粉浆的感官得分

Fig.5 Sensory score of lactic acid bacteria fermented lotus root whole powder slurry

3 结论

本研究采用 Lp、La、Lc 单一菌液以及其混合菌液发酵莲藕全粉浆, 4 组菌在浆液中具有较好的生长情况, 活菌数高达 8.00 log CFU/mL, 发酵后的浆液 pH 显著下降。不同乳酸菌发酵均能改善莲藕全粉浆的表观黏度以及黏弹性。除 Lc 发酵对浆液的色泽无明显的影响外, Lp、La 和 Cb 发酵均能使浆液的 a^* 红色度显著降低。不同乳酸菌发酵对浆液中的总酚含量无显著影响, 而使其总黄酮含量明显下降。乳酸菌发酵产酸, 使浆液中的乳酸、丙酸和乙酸含

量增加,但草酸、酒石酸、丙二酸、柠檬酸和甲酸含量有所减少。不同乳酸菌发酵对莲藕全粉浆中氨基酸含量的影响不同,在 5 组莲藕全粉浆中, Lp 发酵浆液中的半必需氨基酸总量最高, Lc 浆液的非必需氨基酸总量最高, La 发酵浆液中的鲜味氨基酸总量最高,而未发酵浆液中的必需氨基酸总量和甜味氨基酸总量最高。此外,不同乳酸菌发酵浆液的抗氧化活性和感官评分均高于未发酵浆液。综上,不同乳酸菌发酵能改善莲藕全粉浆的营养品质,本研究为莲藕全粉发酵产品的开发提供了理论参考。

参考文献

- 刘瑞山, 罗悦, 李雅楠, 等. 不同乳酸菌发酵燕麦浆的营养特性和风味品质分析[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(10): 205–212.
LIU RS, LUO Y, LI YN, *et al.* Analysis of nutritional characteristics and flavor quality of oat slurry fermented by different lactic acid bacteria [J]. Food Ferment Ind, 2024, 50(10): 205–212.
- AYYASH M, TARIQUE M, ALARYANI M, *et al.* Bioactive properties and untargeted metabolomics analysis of bioaccessible fractions of non-fermented and fermented date fruit pomace by novel yeast isolates [J]. Food Chem, 2022, 396(12–13): 133666.
- TIAN Y, ZHENG S, HE L, *et al.* The effects of *Trametes versicolor* fermented *Rosa roxburghii* tratt and coix seed quild on the nutrition, sensory characteristics and physical and chemical parameters of yogurt [J]. Food Chem X, 2023, 20(2): 100969.
- WANG Y, MEHMOOD S, MAINA NH, *et al.* Synthesis in situ of heteropolysaccharide by *Levilactobacillus brevis* AM7 during fermentation of oat and hemp and its effect on the techno-functional properties of oat yogurt type model [J]. Food Hydrocoll, 2024, 147(1): 109416.
- WANG X, XU X, ZHANG J, *et al.* Fermentation of *Luffa cylindrica* by *Lactiplantibacillus plantarum* P101 enhanced functional properties: Insights into immune modulation, intestinal barrier repair, and intestinal microbiota regulation [J]. Food Biosci, 2024, 60: 104528.
- CHEN W, XIE C, HE Q, *et al.* Improvement in color expression and antioxidant activity of strawberry juice fermented with lactic acid bacteria: A phenolic-based research [J]. Food Chem X, 2023, 17(22): 100535.
- WANG X, HAN M, ZHANG M, *et al.* In vitro evaluation of the hypoglycemic properties of lactic acid bacteria and its fermentation adaptability in apple juice [J]. LWT, 2021, 136(1): 110363.
- FANG K, HE W, JIANG Y, *et al.* Preparation, characterization and physicochemical properties of cassava starch-ferulic acid complexes by mechanical activation [J]. Int J Biol Macromol, 2020, 160: 482–488.
- SHEN Y, SUN H, ZENG H, *et al.* Increases in phenolic, fatty acid, and phytosterol contents and anticancer activities of sweet potato after fermentation by *Lactobacillus acidophilus* [J]. J Agric Food Chem, 2018, 66(11): 2735–2741.
- JAFAR NB, GHALEB ZT, FADHIL ZH. Production of fermented red beet juice using probiotic *Lactobacilli* bacteria [J]. Ann Trop Med Public Health, 2019, 22(7): 91–95.
- 吴宇昊, 戴芳, 丛欣, 等. 不同采收期不同品种莲藕的营养品质变化规律及评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(3): 9–17.
WU YH, DAI F, CONG X, *et al.* Changing law and evaluation of nutritional quality of lotus roots with different harvesting periods and varieties [J]. J Food Saf Qual, 2024, 15(3): 9–17.
- 李峰, 周雄祥, 柯卫东, 等. 湖北省莲产业发展调研报告[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(23): 101–106, 109.
LI F, ZHOU XX, KE WD, *et al.* Research report on lotus industry development in Hubei Province [J]. Hubei Agric Sci, 2020, 59(23): 101–106, 109.
- 吴茜, 刘智勇, 李国文, 等. 莲藕的功能特性及其产品开发前景分析[J]. 食品与发酵科技, 2020, 56(6): 108–112.
WU Q, LIU ZY, LI GW, *et al.* Functional characteristics of lotus root and analysis of its product development prospects [J]. Food Ferment Sci Technol, 2020, 56(6): 108–112.
- 李秋瑛, 胡铭文, 王宏勋, 等. 乙烯利处理对去皮莲藕酚类和活性氧代谢的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(8): 1–10.
LI QY, HU MW, WANG HX, *et al.* Effects of ethephon treatment on phenol and active oxygen etabolism of peeled lotus root [J]. J Food Saf Qual, 2024, 15(8): 1–10.
- 张军, 王建化. 莲藕果醋的工艺优化[J]. 中国调味品, 2019, 44(8): 118–121, 126.
ZHANG J, WANG JH. Optimization of lotus root vinegar process [J]. China Cond, 2019, 44(8): 118–121, 126.
- 莫明规, 梁伟君, 张岚菁, 等. 凝固型莲藕汁发酵酸奶的生产工艺研究[J]. 食品与发酵科技, 2017, 53(5): 116–121.
MO MG, LIANG WJ, ZHANG LQ, *et al.* Preparation of the solid lotus-root juice yoghourt [J]. Food Ferment Sci Technol, 2017, 53(5): 116–121.
- ZHANG L, YU X, YAGOUB AEA, *et al.* Effect of vacuum impregnation assisted probiotics fermentation suspension on shelf life quality of freshly cut lotus root [J]. Food Chem, 2022, 381(1): 132281.
- HUANG K, LIU Y, ZHANG Y, *et al.* Formulation of plant-based yoghurt from soybean and quinoa and evaluation of physicochemical, rheological, sensory and functional properties [J]. Food Biosci, 2022, 49(8): 101831.
- 李志霞, 聂继云, 闫震, 等. 响应面法对 3,5-二硝基水杨酸比色法测定水果中还原糖含量条件的优化[J]. 分析测试学报, 2016, 35(10): 1283–1288.
LI ZX, NIE JY, YAN Z, *et al.* Optimization of 3,5-dinitrosalicylic acid colorimetry determination conditions of reducing sugar in fruits by response surface method [J]. J Instrum Anal, 2016, 35(10): 1283–1288.
- TERIBIA N, BUVÉ C, BONERZ D, *et al.* The effect of thermal processing and storage on the color stability of strawberry puree originating from different cultivars [J]. LWT, 2021, 145: 111270.
- 杨阳, 郭帅, 武婷, 等. 益生菌在发酵乳中的氨基酸代谢特征、发酵特性和贮藏特性[J]. 中国食品学报, 2023, 23(7): 45–55.
YANG Y, GUO S, WU T, *et al.* Amino acid metabolism, fermentation and storage characteristics of probiotics in fermented milk [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2023, 23(7): 45–55.
- CHEN T, PIAO M, EHSANUR RAHMAN SM, *et al.* Influence of fermentation on antioxidant and hypolipidemic properties of maifanite mineral water-cultured common buckwheat sprouts [J]. Food Chem, 2020, 321(6): 126741.
- LETIZIA F, FRATIANNI A, COFELICE M, *et al.* Antioxidative properties of fermented soymilk using *Lactiplantibacillus plantarum* LP95 [J]. Antioxidants, 2023, 12(7): 1442.
- 杨艳君, 胡变芳, 陈林晶, 等. 益生菌发酵甘薯汁的工艺优化设计[J]. 邵阳学院学报(自然科学版), 2020, 17(4): 83–89.
YANG YJ, HU BF, CHEN LJ, *et al.* The process optimization design of sweet potato juice fermented by probiotics [J]. Shaoyang Univ (Nat Sci Ed), 2020, 17(4): 83–89.
- ANDERSEN S, MØLLER MS, POULSEN JCN, *et al.* An 1,4- α -glucosyltransferase defines a new maltodextrin catabolism scheme in *Lactobacillus acidophilus* [J]. Appl Environ Microb, 2020, 86(15): e00661–e006620.
- 郑欣茹, 刘琳琳, 吕铭守, 等. 不同乳酸菌发酵黄浆水对酸浆豆腐凝胶

- 特性及其品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(4): 274–282.
- ZHENG XR, LIU LL, LV MS, *et al.* Effects of different lactic acid bacteria fermented yellow serous water on gel properties and quality of fermented soybean whey tofu [J]. *J Food Saf Qual*, 2024, 15(4): 274–282.
- [27] 范洪臣, 茜琳, 丁警驰, 等. 3 种乳酸菌发酵米浆对发糕品质的影响比较研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(18): 260–268.
- FAN HC, QIAN L, DING JC, *et al.* Comparative study on the effects of 3 kinds of lactic acid bacteria fermented rice slurry on the quality of rice cake [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(18): 260–268.
- [28] 吴远琴, 黄娟, 郑兴汶, 等. 23 份莲资源直链淀粉和支链淀粉含量测定[J]. 长江蔬菜, 2014(6): 41–43.
- WU YQ, HUANG J, ZHENG XW, *et al.* Determination of amylose and amylopectin contents in 23 lotus (*Nelumbo mucifera*) accessions [J]. *Changjiang Veg*, 2014(6): 41–43.
- [29] 王登宇, 孔垂琴, 王冰, 等. 乳酸菌发酵对混合米粉理化特性及年糕品质的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(3): 229–239.
- WANG DY, KONG CQ, WANG B, *et al.* Effects of lactic acid bacteria fermentation on the physicochemical characteristics of mixed rice flour and the quality of rice cakes [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2023, 23(3): 229–239.
- [30] ANG CL, THA GOH KK, LIM K, *et al.* Rheological characterization of a physically-modified waxy potato starch: Investigation of its shear-thickening mechanism [J]. *Food Hydrocoll*, 2021, 120(6): 106908.
- [31] 万晶晶. 乳酸菌发酵影响燕麦面团面包烘焙特性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2011.
- WAN JJ. Study on the effects of lactic acid bacteria fermentation on the baking characteristics of oat sourdough bread [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011.
- [32] 廖雪勤, 汪楠, 胡荣, 等. 超声处理时间对莲藕淀粉理化及结构特性的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(6): 183–191.
- LIAO XQ, WANG N, HU R, *et al.* Effect of ultrasound treatment time on physicochemical and structural properties of lotus root starch [J]. *Food Sci*, 2024, 45(6): 183–191.
- [33] 陈大卫, 陈春萌, 程月, 等. 益生菌混合发酵条件及其对发酵胡萝卜汁色泽及风味的影响[J]. 中国微生态学杂志, 2022, 34(1): 29–38.
- CHEN DW, CHEN CM, CHEN Y, *et al.* The conditions of mixed fermentation by probiotics and their effects on color and flavor of fermented carrot juice [J]. *Chin J Microecol*, 2022, 34(1): 29–38.
- [34] 陈晓维, 温靖, 肖更生, 等. 乳酸菌混合发酵在红枣浆中的发酵特性研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(17): 174–179.
- CHEN XW, WEN J, XIAO GS, *et al.* Fermentation characteristics of jujube pulp by mixed fermentation of lactic acid bacteria [J]. *Food Ferment Ind*, 2023, 49(17): 174–179.
- [35] 史梅毒, 伍亚龙, 吕鹏军, 等. 不同乳酸菌接种发酵对泡白菜理化特征及风味的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(1): 80–88.
- SHI MM, WU YL, LV PJ, *et al.* Effect of different lactic acid bacteria inoculation fermentation on the physicochemical characteristics and flavor of Chinese cabbage pickles [J]. *Food Ferment Ind*, 2024, 50(1): 80–88.
- [36] 胡航伟, 高翠娟, 孙杰, 等. 乳酸菌发酵蜜桃果酱制作过程中理化性质和关键香气成分演化研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(9): 2745–2754.
- HU HW, GAO CJ, SUN J, *et al.* Study on evolution of physicochemical properties and key aroma components in honey peach jam with lactic acid bacteria fermentation [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(9): 2745–2754.
- [37] LI Z, TENG J, LYU Y, *et al.* Enhanced antioxidant activity for apple juice fermented with *Lactobacillus plantarum* ATCC14917 [J]. *Molecules*, 2018, 24(1): 51.
- [38] LI T, JIANG T, LIU N, *et al.* Biotransformation of phenolic profiles and improvement of antioxidant capacities in jujube juice by select lactic acid bacteria [J]. *Food Chem*, 2021, 339: 127859.
- [39] ZHAO X, TANG F, CAI W, *et al.* Effect of fermentation by lactic acid bacteria on the phenolic composition, antioxidant activity, and flavor substances of jujube–wolfberry composite juice [J]. *LWT*, 2023, 184(6): 114884.
- [40] 陈树俊, 石玥, 胡洁, 等. 响应面法优化萌发麦芽乳发酵工艺[J]. 食品科学, 2017, 38(16): 64–70.
- CHEN SJ, SHI Y, HU J, *et al.* Process optimization by response surface methodology for the development of a beverage based on lactic acid fermentation of quinoa malt [J]. *Food Sci*, 2017, 38(16): 64–70.
- [41] 曹晶晶, 木泰华, 马梦梅. 不同乳酸菌发酵对甘薯淀粉加工浆液营养成分及感官特性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(18): 134–142.
- CAO JJ, MU TH, MA MM. Effect of fermentation with different lactic acid bacteria starter cultures on nutritional and functional components and sensory characteristics of sweet potato slurry for starch production [J]. *Food Sci*, 2022, 43(18): 134–142.
- [42] YIN R, JIANG J, MA X, *et al.* Dynamic changes of physicochemical parameters, antioxidant activity, organic acids, polyphenols, and volatile components in prune vinegar during fermentation [J]. *Food Biosci*, 2024, 59(23): 104042.
- [43] AL-MADBOLY LA, YAGI A, KABBASH A, *et al.* Microbiota-derived short chain fatty acids in fermented Kidachi Aloe promote antimicrobial, anticancer, and immunomodulatory activities [J]. *Bmc Microbiol*, 2023, 23(1): 240.
- [44] REN Y, LI L. The influence of protease hydrolysis of lactic acid bacteria on the fermentation induced soybean protein gel: Protein molecule, peptides and amino acids [J]. *Food Res Int*, 2022, 156(6): 111284.
- [45] LIU D, QI Y, ZHAO N, *et al.* Multivariate analysis reveals effect of glutathione-enriched inactive dry yeast on amino acids and volatile components of kiwi wine [J]. *Food Chem*, 2020, 329(18): 127086.
- [46] 何登基. 乳酸菌发酵莲藕汁饮料工艺的研发[D]. 扬州: 扬州大学, 2018.
- HE DJ. Research and development of lactic acid bacteria fermentation lotus root juice beverage technology [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018.
- [47] VOUGIOUKLAKI D, TSIRONI T, TSANTES AG, *et al.* Probiotic properties and antioxidant activity *in vitro* of lactic acid bacteria [J]. *Microorganisms*, 2023, 11(5): 1264.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)

作者简介



李梦紫, 硕士研究生, 主要研究方向为果蔬发酵。

E-mail: 1015154667@qq.com



彭凯迪, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品组分间相互作用和功能性食品的创制。

E-mail: kaidi19930218@outlook.com