

单一及混合乳酸菌发酵对番木瓜汁品质的影响

Lactic acid fermentation of papaya juice using single and mixed Lactic acid bacteria

周 瑶 李 娟 贾凤霞 黄婧禹 苏智敏 陈 岗

ZHOU Yao LI Juan JIA Fengxia HUANG Jingyu SU Zhimin CHEN Gang

(重庆市中药研究院, 重庆 400065)

(Chongqing Academy of Chinese Materia Medica, Chongqing 400065, China)

摘要:目的: 探讨植物乳杆菌 *Lactobacillus plantarum* (Lp)、鼠李糖杆菌 *Lactobacillus rhamnosus* (Lr)、嗜酸乳杆菌 *Lactobacillus acidophilus* (La) 及两两混合菌 (Lp+Lr、Lp+La、Lr+La) 对番木瓜汁发酵后植物化学、微生物学、风味特性和功能特性的影响, 并开发出一种具有改善功能和促进健康特性的番木瓜益生菌发酵饮料。方法: 通过测定发酵过程中 pH 值、可溶性固形物、可滴定酸、活菌数、葡萄糖、果糖、蔗糖、有机酸和挥发性化合物的变化, 考察各菌发酵过程中总酚、总黄酮含量和抗 α -葡萄糖苷酶、抗酪氨酸酶的能力。结果: 在 72 h 的发酵过程中, 单一菌株培养和混合菌株培养的变化相似, pH 值显著降低, 酸度显著提高; 乳酸和琥珀酸含量均显著提高, 柠檬酸和苹果酸含量显著降低。发酵后, 木瓜汁中总酚类物质和总黄酮含量均有所增加。Pearson 相关分析表明, 酚类物质的代谢可能有助于增强 α -葡萄糖苷酶和酪氨酸酶的抑制作用。所有发酵组中, 由植物乳杆菌单菌发酵的番木瓜汁乳酸、总酚、总黄酮含量最高, 对 α -葡萄糖苷酶和酪氨酸酶的抑制作用最强。未经发酵的番木瓜原汁中主要检出 6 种挥发性化合物, 丁酸含量最大为 89.742%, 其次为芳樟醇。发酵后, 从 6 组发酵果汁中共鉴定出 25 种主要挥发性成分, 其中丁酸含量显著降低, 减少了番木瓜不愉快气味的产生。所有发酵中, Lp 单菌产生的挥发性成分最多 (18 种), 混合菌 Lp+Lr 的较少 (5 种)。虽然混合菌 Lp+Lr 存在的活菌数最多 [7.61 lg(CFU/mL)], 但总体看来, 单一菌种 Lp 可能更可取。结论: 单菌种植物乳杆菌发酵可以改善番木瓜汁的感官特性, 并增强其

潜在的功能特性。

关键词: 番木瓜; 发酵; 嗜酸乳杆菌; 植物乳杆菌; 鼠李糖杆菌

Abstract: **Objective:** Phytochemistry, microbiology, flavor and functional properties of fermented papaya juice were examined in relation to *Lactobacillus plantarum* (Lp), *Lactobacillus rhamnosus* (Lr), *Lactobacillus acidophilus* (La) and their mixed strains (Lp+Lr, Lp+La, Lr+La), in order to develop a probiotic papaya beverage with improved functionality and health-promoting properties. **Methods:** In this study, changes in pH, total soluble solids, titratable acid, viable cells, glucose, fructose, sucrose, organic acids and volatile compounds were determined. The contents of total phenolics and total flavonoids, as well as the inhibitory activity against α -glucosidase and tyrosinase enzymes during the fermentation process, were also investigated. **Results:** The single and mixed strain cultures showed similar changes during the 72 h fermentation period, exhibiting significantly decreased pH and increased acidity. The contents of lactic acid and succinic acid greatly increased, whereas that of citric acid and malic acid decreased significantly. After fermentation, the content of total phenolics and flavonoids increased in papaya juice. Pearson's correlation analysis revealed that the metabolism of phenolics likely contributed to enhancing the inhibitory activity against α -glucosidase and tyrosinase enzymes. Among all fermentation groups, the papaya juice fermented by Lp exhibited the highest contents of lactic acid, total phenolics, and flavonoids, showing the strongest inhibitory effect against α -glucosidase and tyrosinase enzyme. Additionally, six types of aromatic compounds were primarily detected in unfermented papaya juice, with butyric acid content being the highest (89.742%), followed by linalool. After fermentation, a total of 25 aromatic compounds were identified in the six fermented juice samples, and the content of butyric acid declined significantly, which reduced the unpleasant odor of papaya. In all

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目 (编号: CSTB2022TIAD-LUX0002)

作者简介: 周瑶, 女, 重庆市中药研究院助理研究员, 硕士。

通信作者: 陈岗 (1978—), 男, 重庆市中药研究院副研究员, 硕士。

E-mail: 387722973@qq.com

收稿日期: 2023-06-07 **改回日期:** 2023-11-14

fermentation groups, the Lp single-strain culture generated the most volatile components (18 types), while the Lp+Lr mixed culture achieved the lowest (5 types). Although the Lp+Lr mixed-strain culture had the highest number of viable bacteria [7.61 lg (CFU/mL)], the Lp single-strain culture may be preferable overall. **Conclusion:** The Lp single culture could improve the sensory characteristics of papaya juice and enhance its beneficial properties.

Keywords: *Carica papaya* L.; fermentation; *Lactobacillus acidophilus*; *Lactobacillus plantarum*; *Lactobacillus rhamnosus*

发酵不仅能延长食品保质期,还可以增强食品的感官特性,增加生物利用度和改善食品的营养价值等。例如,植物乳杆菌发酵提高了番石榴果提取物的植物化学和理化特性^[1]。乳酸菌发酵的一个重要方面是利用碳水化合物、蛋白质、微量元素、矿物质及次生代谢产物多酚等进行代谢,产生有机酸、糖、芳香族化合物及新的功能成分^[2]。

番木瓜(*Carica papaya* L.)自 17 世纪传入中国后在中国各省被广泛栽培。成熟的番木瓜果实除富含碳水化合物(6.50%~9.51%)外^[3],还含有其他多种营养元素,包括蛋白质(0.40%~1.17%)、胡萝卜素(约 1 mg/100 g)、维生素 C(40~60 mg/100 g)和维生素 A(18.50~56.50 mg/100 g)等。有研究^[4-5]表明,根据品种和成熟度的不同,吃半个木瓜(100 g)就能提供普通成年人所需维生素 A 的 2%~10%,而维生素 A 对人体非常有益,不仅具有抗氧化特性,还能通过视黄醇结合蛋白信号传导调节胰岛素敏感性和维持脂肪的稳态。此外,野生木瓜果肉中总酚含量为 9.16 μmol 没食子酸当量/g 果肉,与番荔枝科的其他水果相当,包括番荔枝、石榴、蔓越莓等。木瓜中还富含原花青素(浓缩单宁),为一种极好的健康抗氧化剂^[6]。此外,番木瓜还具有多种生理功能,包括抗菌、抗肿瘤、抗氧化、抗炎等特性。特别是在降糖方面,口服木瓜叶提取物可显著降低糖尿病大鼠的血糖水平、转氨酶和甘油三酯^[7]。还有一种已商品化的木瓜制剂,证明其可以改善糖尿病前期和糖尿病患者血小板^[8]。

番木瓜有不愉快气味,且是一种极易腐烂的水果,不易保存^[9-10]。而通过乳酸菌发酵处理不仅能延长其保质期还能改善其风味。目前,大多数乳酸菌的研究仅限于单菌或混合菌对某种基质的独立研究,对同一种基质的单菌和混合菌在同一条条件下的对比研究较少。虽然有充分的证据表明益生菌混合物对多种疾病有益作用,然而混合物比其组成菌种更有效的证据较为有限。此外,在一个证明益生菌混合物更有效的 12 项研究中,有 4 项研究表明混合物不是更有效的,说明混合物比单独使用的成分菌种更有效或更无效,取决于不同的菌种^[11]。

研究拟探讨 3 种不同的乳酸菌(植物乳杆菌、鼠李糖杆菌和嗜酸乳杆菌)单菌和两两混合菌对番木瓜汁发酵后植物化学、微生物学和风味特性的影响,并分析番木瓜汁总酚、总黄酮成分与降血糖和抗黑色素的相关性,期为寻找合适的发酵剂,开发出一种具有改善功能和促进健康特性的番木瓜益生菌发酵饮料提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

番木瓜:别名红心冰糖牛奶木瓜,甜度比一般的番木瓜高,选用单果在 500 g 左右,果肉饱满成熟,无病虫害,采自云南西双版纳;

植物总酚测试盒、植物类黄酮测试盒、 α -葡萄糖苷酶测试盒:苏州科铭生物技术有限公司;

酪氨酸酶活性检测试剂盒:北京索莱宝科技有限公司;

甲醇:色谱纯,赛默飞世尔科技有限公司;

其他试剂均为国产分析纯;

植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*)、嗜酸乳杆菌(*Lactobacillus acidophilus*)、鼠李糖乳杆菌(*Lactobacillus rhamnosus*):广州汇健生物科技有限公司。

1.1.2 仪器与设备

洁净工作台:ZHJH-C1118C 型,上海智城分析仪器制造有限公司;

立式压力蒸汽灭菌器:LDZM-80KCS 型,上海申安医疗器械厂;

电热恒温培养箱:DHP-9162B 型,上海一恒科学仪器有限公司;

高效液相色谱仪:LC-20A-DAD 型,日本岛津公司;

三重四极杆气相色谱-质谱联用仪:TSQ8000EVO 型,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;

全自动酶标仪:P-800 型,杭州遂真生物技术有限公司;

台式高速冷冻离心机:3-18KS 型,德国西格玛离心机公司;

紫外可见分光光度计:752 型,上海舜宇恒平科学仪器有限公司;

pH 计:PHS-25 型,上海仪电科学仪器股份有限公司;

阿贝折光仪:WAY-2W 型,上海仪电物理光学仪器有限公司;

超低温冰箱:DW-86L390 型,澳柯玛股份有限公司。

1.2 方法

1.2.1 番木瓜汁发酵果汁的制备 选择新鲜无腐烂、成熟度合适的番木瓜,清洗,去皮去籽,切块打浆后得到木

瓜原浆,加入 1 倍质量的蒸馏水,65 ℃ 杀菌 30 min,于洁净工作台按 10⁶ CFU/mL 接种量分别接种植物乳杆菌(Lp)、鼠李糖杆菌(Lr)、嗜酸乳杆菌(La)以及 3 种乳杆菌按 1:1 两两复配的菌悬液:植物乳杆菌+鼠李糖杆菌(Lp+ Lr),植物乳杆菌+嗜酸乳杆菌(Lp+ La),鼠李糖杆菌+嗜酸乳杆菌(Lr+La),37 ℃ 恒温培养 72 h。未发酵和发酵样品经过滤后,滤液于-80 ℃ 冷冻备用。

1.2.2 理化指标测定

- (1) pH 值:采用 pH 计法。
- (2) 可溶性固形物含量:参照 NY/T 2637—2014。
- (3) 总酸:参照 GB/T 12456—2008。
- (4) 活菌数:参照 GB 4789.35—2010。

1.2.3 总酚、总黄酮含量测定 通过植物总酚测试盒、植物类黄酮测试盒测定。

1.2.4 有机酸含量测定 参照 GB 5009.157—2016。

1.2.5 单糖含量测定 参照 GB 5009.8—2016。

1.2.6 α-葡萄糖苷酶和酪氨酸酶活性测定 通过 α-葡萄

糖苷酶测试盒和酪氨酸酶活性检测试剂盒测定。

1.2.7 挥发性物质测定 根据 Gomes 等^[12]的方法适当修改,采用三重四极杆气相色谱—质谱联用仪测定番木瓜汁中挥发性物质,色谱柱为 Supelcowax (30 m × 0.25 mm,0.25 μm)。色谱条件:进样温度 200 ℃;不分流模式;升温程序为以 2 ℃/min 从 50 ℃ 升至 150 ℃,保持 5 min;载气(He)流速 1 mL/min。质谱条件:EI 源;电子能量 70 eV;传输线温度 250 ℃;离子源温度 230 ℃;扫描方式为全扫描;质量范围(*m/z*)为 20~350。

2 结果与分析

2.1 番木瓜汁发酵过程中理化性质的变化

由表 1 可知,木瓜汁发酵 72 h 后,各组可溶性固形物含量均从 9.5 °Brix 降至 8.0~8.5 °Brix。木瓜果实的 pH 值为 5 左右,符合 3 种乳酸菌生长的最适 pH 值,发酵 72 h 后,各组 pH 值均降低为 3.3 左右。各组可滴定酸含量均显著增加。

表 1 番木瓜汁发酵过程中理化性质的变化[†]

Table 1 Changes in the physicochemical properties of the fermented papaya juices

组别	发酵时间/ h	pH	可溶性固形物/ °Brix	可滴定酸/ (g · L ⁻¹)	活菌数/ lg (CFU · mL ⁻¹)
Lp	0	5.07±0.02 ^a	9.50±0.01 ^a	1.46±0.02 ^d	6.00±0.00 ^a
	24	3.59±0.01 ^b	6.50±0.02 ^d	2.91±0.31 ^c	8.31±0.06 ^b
	36	3.34±0.01 ^c	8.00±0.01 ^c	5.90±0.07 ^b	8.43±0.10 ^c
	72	3.25±0.03 ^d	8.50±0.02 ^b	8.51±0.04 ^a	7.41±0.10 ^d
Lr	0	5.07±0.01 ^a	9.50±0.02 ^a	1.46±0.21 ^d	6.00±0.15 ^a
	24	3.58±0.02 ^b	6.00±0.03 ^c	3.18±0.32 ^c	8.59±0.02 ^b
	36	3.36±0.01 ^c	8.00±0.02 ^b	5.85±0.11 ^b	8.62±0.05 ^c
	72	3.27±0.02 ^d	8.00±0.04 ^b	7.37±0.10 ^a	7.52±0.10 ^d
La	0	5.07±0.03 ^a	9.50±0.03 ^a	1.46±0.05 ^d	6.00±0.03 ^a
	24	3.65±0.02 ^b	6.00±0.05 ^d	2.80±0.33 ^c	8.31±0.09 ^b
	36	3.39±0.00 ^c	8.25±0.01 ^b	5.73±0.35 ^b	7.60±0.10 ^c
	72	3.34±0.02 ^d	8.00±0.02 ^c	7.29±0.56 ^a	7.26±0.01 ^d
Lp+Lr	0	5.07±0.05 ^a	9.50±0.03 ^a	1.46±0.50 ^d	6.00±0.21 ^a
	24	3.50±0.10 ^b	8.40±0.02 ^c	4.64±0.10 ^c	8.51±0.02 ^b
	36	3.36±0.20 ^c	7.00±0.04 ^d	5.96±0.20 ^b	8.40±0.03 ^c
	72	3.24±0.05 ^d	8.00±0.03 ^b	7.74±0.21 ^a	7.61±0.10 ^d
Lp+La	0	5.07±0.05 ^a	9.50±0.04 ^a	1.46±0.22 ^d	6.00±0.02 ^a
	24	3.55±0.10 ^b	7.00±0.01 ^d	2.86±0.33 ^c	8.36±0.09 ^b
	36	3.36±0.06 ^c	8.00±0.02 ^c	6.27±0.35 ^b	8.26±0.05 ^c
	72	3.30±0.00 ^d	8.50±0.05 ^b	7.74±0.24 ^a	7.00±0.22 ^d
Lr+La	0	5.07±0.03 ^a	9.50±0.00 ^a	1.46±0.31 ^d	6.00±0.31 ^a
	24	3.53±0.20 ^b	8.00±0.01 ^c	4.51±1.20 ^c	8.52±0.26 ^b
	36	3.34±0.05 ^c	8.50±0.03 ^b	6.88±0.05 ^b	8.49±0.07 ^c
	72	3.27±0.01 ^d	8.50±0.03 ^b	7.11±0.10 ^a	7.41±1.21 ^d

[†] 同列字母不同表示差异显著(*P*<0.05)。

单菌发酵中,虽然 3 种乳酸菌以相似的细胞数 [6.00 lg(CFU/mL)]接种,但发酵 72 h 后,Lr 活菌数最高为 7.52 lg(CFU/mL);La 最低为 7.26 lg(CFU/mL),与 Malik 等^[12]的结果类似,其活菌数下降的最可能原因是果汁酸度迅速增加。混合菌发酵组中,Lp+Lr 的活菌数最高为 7.61 lg(CFU/mL),同时也是所有发酵组中(单菌和混菌)活菌数最高的组,而 Lp+La 的最低 [7.00 lg(CFU/mL)]。综上,单一菌种也可以满足番木瓜的发酵要求。同时,混合发酵组中的活菌数与菌种的相互作用有很大关系。即使是同一种发酵剂,由于菌种产酸能力、耐酸能力、营养物质竞争等,可能导致比单一菌种好或不好的发酵效果^[13]。

2.2 番木瓜汁发酵后糖类的变化

由表 2 可知,发酵和未发酵的木瓜汁中均未检出蔗糖,可能是其值低于仪器检出限而未被检出,由此说明木瓜为蔗糖含量少的低热量水果,与于璐等^[14]的结果一致。单一菌种发酵中,3 种乳酸菌均能消耗葡萄糖,其中植物乳杆菌的消耗能力最强。所有菌对果糖的消耗能力均低于葡萄糖的,特别是嗜酸乳杆菌几乎未消耗果糖。混合菌发酵中也有类似结果,各组主要以消耗葡萄糖为主。据报道^[15],嗜酸乳杆菌在单糖中只能利用葡萄糖作碳源。

表 2 番木瓜汁发酵 72 h 后糖类的变化[†]

Table 2 Changes in sugar content of the fermented papaya juices (72 h) %

组别	葡萄糖	果糖	蔗糖
未发酵	3.24±0.03 ^a	3.22±0.07 ^a	—
Lp	1.03±0.06 ^g	2.14±0.02 ^g	—
Lr	1.33±0.02 ^e	2.87±0.04 ^c	—
La	1.19±0.10 ^f	3.20±0.11 ^b	—
Lp+Lr	1.46±0.02 ^d	2.50±0.09 ^f	—
Lp+La	1.53±0.05 ^c	2.63±0.03 ^e	—
Lr+La	1.64±0.06 ^b	2.73±0.02 ^d	—

† —表示未检出;同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

植物乳杆菌则能够同时代谢两种糖类,且在葡萄糖存在的情况下,果糖是其第二优选单糖^[16]。半乳糖和葡萄糖被证明是鼠李糖最有效的碳源^[17]。综上,番木瓜汁经植物乳杆菌单菌发酵后可能会产生更佳的风味。

2.3 番木瓜汁发酵后有机酸含量的变化

由表 3 可知,番木瓜原汁中 5 种有机酸含量差异较大,其中柠檬酸含量最高为 3.47 g/L;苹果酸含量次之,为 2.98 g/L。番木瓜汁经各种乳酸菌发酵后,有机酸组成发生了显著而不同的变化。发酵 72 h 后,乳酸和琥珀酸含量显著增加,柠檬酸和苹果酸含量显著降低,酒石酸含量变化不大。其中,乳酸是番木瓜汁发酵后形成的主要有机酸,Lp 在所有发酵组中产生乳酸量最高为 14.41 g/L,Lr+La 产量较低(10.89 g/L),其他发酵组结果相近。Chen 等^[18]研究发现,经嗜酸乳杆菌和植物乳杆菌发酵后,番木瓜汁中乳酸含量分别为 5.43,5.71 g/kg。事实上,大多数乳杆菌可以通过一种苹果乳酸酶将苹果酸脱羧直接转化为乳酸,还可以代谢柠檬酸产生乳酸、乙酰基、乙酰丙酮和乙酸^[19]。Mousavi 等^[16]发现植物乳杆菌能够利用苹果酸作为碳源,且苹果酸的代谢与糖代谢同时开始。因此,各组柠檬酸和苹果酸含量在发酵后均显著降低,而乳酸含量则显著增加。李维妮等^[20]研究表明,乳酸菌能够利用三羧酸循环产生的柠檬酸合成琥珀酸,故发酵后琥珀酸含量增加,而适当含量的琥珀酸有利于产品的口感,但由于其具有苦咸味,过量则可能会造成不利的口感,直接影响果汁的酸味。

综上,单菌种发酵和混合菌种发酵番木瓜汁过程中,5 种有机酸的代谢变化情况具有相似性。特别注意的是,单菌种 Lp 在产乳酸上更具有优势性,很大程度上可能归功于植物乳杆菌具有较强的产酸和利用碳水化合物能力。因为 Lp 属于同型发酵类型中的兼性异型发酵群,具有全面的糖代谢,有很强的发酵碳水化合物的能力,主要产生乳酸和少量乙酸^[21-22]。而 La 只有糖酵解途径,表现为同型乳酸发酵,只生成乳酸^[23-24]。此外,叶盼^[25]通过 6 种乳酸菌发酵苹果汁证实了 Lp 具有较强的产酸能

表 3 发酵 72 h 后番木瓜汁的有机酸含量变化[†]

Table 3 Changes in organic acid of the fermented papaya juices (72 h) g/L

组别	酒石酸	苹果酸	乳酸	柠檬酸	琥珀酸
未发酵	0.58±0.02 ^c	2.98±0.01 ^a	1.62±0.02 ^g	3.47±0.00 ^a	0.58±0.00 ^g
Lp	0.63±0.03 ^b	1.80±0.02 ^f	14.41±0.04 ^a	1.68±0.10 ^c	1.24±0.10 ^a
Lr	0.56±0.02 ^c	2.01±0.04 ^d	12.86±0.10 ^c	1.59±0.10 ^d	1.22±0.10 ^b
La	0.52±0.02 ^d	1.65±0.02 ^g	12.91±0.56 ^b	1.80±0.01 ^b	1.08±0.01 ^c
Lp+Lr	0.57±0.05 ^c	1.98±0.04 ^e	12.62±0.22 ^d	1.47±0.02 ^e	0.68±0.02 ^e
Lp+La	0.66±0.00 ^a	2.25±0.05 ^c	12.52±0.24 ^e	1.29±0.22 ^f	0.66±0.22 ^f
Lr+La	0.42±0.01 ^e	2.51±0.03 ^b	10.89±0.10 ^f	1.17±1.21 ^g	0.75±1.21 ^d

† 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

力(植物乳杆菌>瑞士乳杆菌>戊糖片球菌>副干酪乳杆菌>明串珠球菌>嗜酸乳杆菌)。

2.4 番木瓜汁发酵后总酚、总黄酮含量和部分功能特性的变化

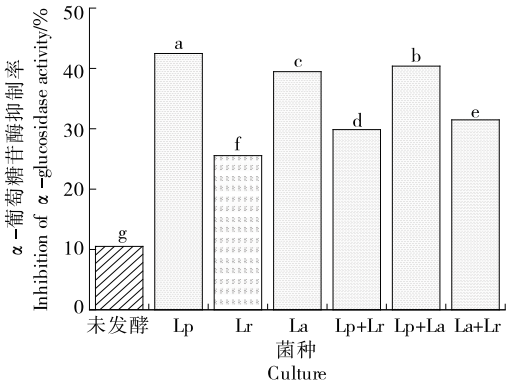
2.4.1 总酚、总黄酮含量 由表 4 可知,发酵明显提高了样品的总酚和总黄酮含量。发酵组的总酚和总黄酮含量分别为 1.17~2.93,0.81~1.38 mg/g 干基,显著高于未发酵组(1.15,0.52 mg/g 干基)。与其他乳酸菌相比,Lp 也使得果汁中具有更高的总酚和总黄酮含量,可能与乳酸菌合成水解酶的能力有关。此外,乳酸发酵果汁中多酚含量较高也可能是聚合物降解的结果,聚合物的降解是将复杂化合物转化为自由形式,由酚氧化酶调节,而酚氧化酶的合成则依赖于乳酸菌。研究^[26]表明,植物乳杆菌在代谢多酚方面表现出很高的酶活性,在乳杆菌属的所有物种中,负责合成酚脱羧酶和单宁酶的基因只有植物乳杆菌所特有,被认为具有最高的多酚代谢能力。Wang 等^[27]利用嗜酸乳杆菌、植物乳杆菌和鼠李糖杆菌发酵蓝莓汁,所有发酵组的总酚含量分别提高了 20.49%,37.6%,12.46%,总黄酮含量分别提高了 20.3%,37.5%,16.0%。

表 4 发酵 72 h 后番木瓜汁总酚和总黄酮含量的变化[†]
Table 4 Changes in total phytochemical and flavonoids content of the fermented papaya juices (72 h)

mg/g 干重		
组别	总酚	总黄酮
未发酵	1.15±0.26 ^g	0.52±0.12 ^g
Lp	2.93±0.11 ^a	1.38±0.09 ^a
Lr	1.19±0.15 ^e	0.92±0.10 ^e
La	1.64±0.13 ^d	0.97±0.07 ^d
Lp+Lr	1.17±0.21 ^f	1.03±0.15 ^c
Lp+La	2.10±0.17 ^b	1.11±0.12 ^b
Lr+La	2.05±0.09 ^c	0.81±0.21 ^f

† 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

2.4.2 功能特性变化 由图 1 可知,番木瓜汁对 α -葡萄糖苷酶的抑制率为 10.47%。发酵后 α -葡萄糖苷酶抑制率显著提高,Lp、Lr、La 的分别为 48.48%,36.55%,43.46%。Lp+Lr、Lp+La、Lr+La 发酵番木瓜汁后, α -葡萄糖苷酶抑制率分别为 39.86%,44.39%,39.47%。总体来看,Lp 单菌发酵后, α -葡萄糖苷酶的抑制作用略强,归因于酚酸和黄酮类活性物质的增加。多酚可以通过疏水相互作用与 α -葡萄糖苷酶的活性位点结合,竞争性抑制这些酶的催化活性。Ankolekar 等^[28]研究表明,各品种总酚含量与 α -葡萄糖苷酶含量呈负相关($r=-0.79\sim-0.99$)。也有研究^[29]表明, α -葡萄糖苷酶抑制活性与总黄酮含量显著相关。由表 5 可知, α -葡萄糖苷酶抑制率与总酚、总黄酮含量具有显著正相关性,相关性分



字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图 1 发酵 72 h 后番木瓜汁的抗 α -葡萄糖苷酶能力
Figure 1 α -glucosidase inhibitory activity of fermented papaya juices (72 h)

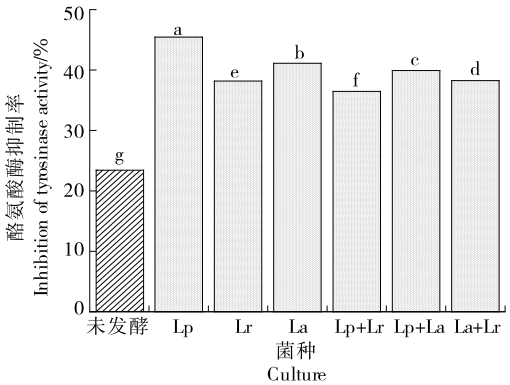
表 5 发酵番木瓜汁的功能特性和主要活性成分的相关系数[†]
Table 5 Correlation coefficient between functional performance and main active ingredients of fermented papaya juices

活性成分	降糖活性	抗黑色素活性
总酚含量	0.837 *	0.847 *
总黄酮含量	0.844 *	0.783

† * 表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关。

别为 0.837 和 0.844。高鹤^[30]研究表明,发酵过程中,植物乳杆菌分泌的酶可以通过水解苦瓜中皂甙的糖苷键释放苷元和多酚类物质,达到抑制 α -葡萄糖苷酶活性的作用。不同乳酸菌对 α -葡萄糖苷酶抑制能力的差异,可能是由于不同菌种对酚类物质的代谢不同所致^[27]。

酪氨酸酶是黑色素合成反应的限速酶,其异常表达过量和催化活性升高会引起黑色素生成过多,从而引发黄褐斑、老年斑等色素性疾病。由图 2 可知,各发酵番木



字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图 2 发酵 72 h 后番木瓜汁的抗酪氨酸酶能力
Figure 2 Tyrosinase inhibitory activity of fermented papaya juices (72 h)

瓜汁中酪氨酸酶抑制活性均显著增加,且单菌发酵组的抑制性比混合菌发酵组的更强。由表 5 可知,酪氨酸酶抑制率与总酚含量呈显著正相关($r=0.847$),但与总黄酮含量无显著相关性。田丝竹等^[31]研究发现,酚酸提取物对酪氨酸酶具有较高的抑制能力,该抑制能力与总酚含量高度相关($r=0.879$)。Lizardo 等^[32]研究表明,副干酪乳杆菌单菌发酵对酪氨酸酶抑制活性比植物乳杆菌单菌及两者混菌发酵的更强。

综上,乳酸菌发酵的活性成分和功能特性可能与多酚之间存在深层次的双向关联,酚类化合物含量与乳酸菌的代谢直接相关。而酚类化合物可以影响乳酸菌的生

长和代谢^[19]。相比混合菌发酵,单一菌可能更可取,混合菌的优势主要取决于菌种的相互作用。因此,正确选择发酵基质和相应的乳酸菌有可能生产出具有高功能性食品的潜力。

2.5 番木瓜汁发酵后挥发性成分的变化

Pino 等^[33]研究表明,番木瓜中主要挥发性成分以酯类为主(约占总挥发物的 40.8%~63.0%),而 Farina 等^[4]研究表明,芳樟醇(可达 90%以上)和异硫氰酸苄酯为挥发性气味的关键。由表 6 可知,丁酸和芳樟醇是木瓜原汁的主要成分,分别约占总成分的 89%和 7%。经乳杆菌发酵后的挥发性成分发生了显著性变化,各组丁酸含

表 6 发酵 72 h 后木瓜汁中主要挥发性成分
Table 6 Major volatile compounds in papaya juices after 72 h fermentation

种类	名称	保留时间/min	相对含量/%						
			原木瓜汁	Lp	Lr	La	Lp+Lr	Lp+La	Lr+La
酸类	丁酸	4.220	89.742	70.25	67.925	70.372	75.406	72.970	73.980
	乙酸	1.879	—	0.842	—	—	—	—	—
	己酸	4.278	—	—	—	0.005	—	—	—
醇类	芳樟醇	9.311	5.782	6.753	6.099	6.895	6.954	6.180	6.480
	氧化芳樟醇	9.131	1.645	—	—	—	—	1.716	1.890
	反式芳樟醇氧化物	9.130	—	—	2.013	—	—	—	—
	苯甲醇	9.129	—	0.230	—	—	—	—	—
酚类	2,4-二叔丁基苯酚	13.703	0.953	—	—	—	—	—	—
酯类	乙酸甲酯	1.710	—	1.915	2.128	—	1.497	—	0.488
	2-(5-甲基-5-乙烯基四氢呋喃-2-基)丙-2-基碳酸乙酯	9.127	—	1.825	—	1.782	2.079	—	—
	丙酸甲酯	16.873	—	0.078	—	—	—	—	—
酮类	丙酮	1.628	—	—	—	—	—	1.271	1.093
	2-丁酮	2.555	—	—	—	0.266	—	0.282	0.323
	3-羟基-2-丁酮	2.539	—	—	—	2.643	—	—	—
芳香类	甲苯	10.056	—	0.140	—	0.210	—	0.110	0.130
醛类	苯甲醛	10.927	—	0.089	—	0.154	—	0.931	0.103
烷烃类	2,6,11,15-四甲基十六烷	13.703	0.779	—	—	—	—	—	—
	2,6,10,15-四甲基十七烷	15.198	1.098	—	—	—	—	—	—
	十四烷	12.713	—	—	—	—	—	—	—
	十六烷	11.942	—	0.020	—	0.010	—	0.030	—
	二十烷	16.704	—	0.170	—	0.110	—	0.090	0.130
	二十四烷	13.885	—	0.132	—	—	—	0.095	0.238
	二十五烷	18.058	—	0.460	—	—	—	0.220	0.410
	二十八烷	15.526	—	0.310	—	—	—	0.54	—
	三十四烷	15.200	—	0.020	—	0.030	—	—	—
	四十四烷	14.875	—	0.890	—	0.770	0.670	0.830	—
	六甲基环三硅氧烷	26.329	—	0.880	—	0.710	—	1.100	—
	十甲基四硅氧烷	26.179	—	0.590	—	0.440	—	—	—
其他			0.000	14.406	21.835	15.603	12.837	13.591	14.735

量显著降低,芳樟醇则略微增加。一般认为,丁酸会产生干酪般甜腻的不愉快气味,引起部分消费者的不适感。芳樟醇及芳樟醇氧化衍生物是木瓜特有香气的主要贡献者之一,是一种带有浓青木青气息,似玫瑰木,属花香型的香气成分^[34]。

原木瓜汁中主要有 6 种挥发性成分,包括酸类、醇类、酚类和烷烃类化合物。Lp、Lr、La、Lp+Lr、Lp+La、Lr+La 发酵共产生了 25 种挥发性化合物,生成了许多新的化合物,包括酮类、酯类、芳香类和烷烃类化合物。所有发酵组中,Lp 产生的挥发性化合物最多为 18 种,其次为 La(14 种)及 Lp+La(14 种)。Lr 产生的主要成分最少,仅 4 种。Lp+Lr 产生的成分也较少(5 种)。一般认为,挥发性成分的差异与菌种种类以及菌种的胞内酶有关。在单菌种发酵中,Lp 产生的香气成分最多,La 产生的香气成分大部分与其类似,与 Chen 等^[18]的结果类似。这可能是因为乳杆菌属的所有物种中,Lp 具有合成部分酶的特有基因,比如酚脱羧酶、单宁酶等^[26]。在混合菌发酵中,Lp+Lr 产生的香气成分最少,可能是 Lp+Lr 共同发酵时互相产生拮抗^[13],而 Lr 在所有发酵中菌种存活率最高,因此其在与 Lp 混合发酵时可能占据优势地位,而 Lr 单菌发酵时产生的挥发性成分最少,所以混合发酵产生的芳香成分比其他两种混合菌的少。

6 个发酵组中,仅 Lp 产生几种特有的香气成分,包括苯甲醇、丙酸甲酯、甲苯和苯甲醛。据报道^[18,35],苯甲醇具有杏仁香气,苯甲醛具有杏仁、樱桃甜味,能给木瓜汁提供更丰富的香气成分。此外,大部分发酵组(Lp、La、Lp+La、Lr+La)中的木瓜汁新增了很多烷烃类物质,其主要来源于脂肪酸烷氧自由基的断裂及对氨基酸的降解代谢过程,由于香味阈值较高,其对木瓜汁的风味贡献较小^[25]。发酵后的果汁中均不同程度地增加了令人愉快的水果香气的苯甲醇。

总体来看,乳酸菌发酵可以增加水果汁中挥发性风味物质种类。接种乳酸菌后,木瓜汁中令人不愉快气味的丁酸含量显著降低,香气成分种类显著增加,赋予了木瓜发酵汁独特复杂的香气。使用单一菌种发酵剂 Lp 比混合发酵剂产生了更多的香气成分,说明 Lp 在木瓜汁中的适应性较广,单一发酵风味成分更佳。

3 结论

以番木瓜汁作为 3 种乳酸菌发酵底物,通过对不同发酵物化性质的比较,筛选出了一株更适合发酵的菌株。结果表明,发酵提高了番木瓜汁的总酚、总黄酮含量,对 α -葡萄糖苷酶和酪氨酸酶的抑制作用增强。3 种乳酸菌均能在番木瓜汁中存活,活菌数 $>7.00 \lg(\text{CFU/mL})$ 。虽然植物乳杆菌和鼠李糖杆菌混菌发酵的活菌数在所有发

酵组中最高,但在其他方面尤其是在产香气成分上最差。总的看来,植物乳杆菌在产乳酸,促进总酚、总黄酮含量,抑制葡萄糖苷酶和酪氨酸酶活性以及增加番木瓜风味物质上更具优势。因此,使用植物乳杆菌单一菌株发酵番木瓜汁是首选。后续可深入探究木瓜优势发酵剂发酵的功能机制,如减肥、降血糖等机制,有利于木瓜功能性饮料的实际应用。

参考文献

- [1] BUJNA E, FARKAS N A, TRAN A M, et al. Lactic acid fermentation of apricot juice by mono- and mixed cultures of probiotic *Lactobacillus* and *Bifidobacterium* strains [J]. Food Science and Biotechnology, 2018, 27(2): 547-554.
- [2] SHARMA R, DIWAN B, SINGH B P, et al. Probiotic fermentation of polyphenols: Potential sources of novel functional foods[J]. Food Production, Processing and Nutrition, 2022, 4(21): 1-16.
- [3] HURTADO C B, CASTILLO A J R, MARTINEZ Y, et al. Formulation and characterization of abiopreparation with *Lactobacillus plantarum* CAM-6, from the gastrointestinal tract of Colombian native pigs[J]. Cuban Journal of Agricultural Science, 2020, 54(3): 1-10.
- [4] FARINA V, TINEBRA I, PERRONE A, et al. Physicochemical, nutraceutical and sensory traits of six papaya (*Carica papaya* L.) cultivars grown in greenhouse conditions in the mediterranean climate[J]. Agronomy, 2020, 10(4): 501.
- [5] ALARA O R, ABDURAHMAN N H, ALARA J A. Carica papaya: Comprehensive overview of the nutritional values, phytochemicals and pharmacological activities [J]. Advances in Traditional Medicine, 2020(1): 1-31.
- [6] BRANNAN R G, PETERS T, TALCOTT S T. Phytochemical analysis of ten varieties of pawpaw (*Asimina triloba* [L.] Dunal) fruit pulp[J]. Food Chemistry, 2015, 168: 656-661.
- [7] JUAREZ-ROJOP I E, TOVILLA-ZARATE C A, AGUILAR-DOMINGUEZ D E, et al. Phytochemical screening and hypoglycemic activity of *Carica papaya* leaf in streptozotocin-induced diabetic rats[J]. Rev Bras Farmacogn, 2014, 24: 341-347.
- [8] SOMANAH J, PUTTEERAJ M, ARUOMA O I, et al. Discovering the health promoting potential of fermented papaya preparation: Its future perspectives for the dietary management of oxidative stress during diabetes[J]. Fermentation, 2018, 4(4): 83.
- [9] BRANNAN R G, SALABAK D E, HOLBEN D H. Sensory analysis of pawpaw (*Asimina triloba*) pulp puree: Consumer appraisal and descriptive lexicon [J]. Journal of Food Research, 2012, 1(1): 179-192.
- [10] LOVERA N N, RAMALLO L, SALVADORI V O. Effects of different freezing methods on calcium enriched papaya (*Carica papaya* L.) [J]. J Food Sci Technol, 2018, 55: 2 039-2 047.

- [11] CHAPMAN C M C, GIBSON G R, ROWLAND I. Health benefits of probiotics: Are mixtures more effective than single strains? [J]. Eur J Nutr, 2011, 50: 1-17.
- [12] MALIK M, BORA J, SHARMA V. Growth studies of potentially probiotic lactic acid bacteria (*Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus acidophilus*, and *Lactobacillus casei*) in carrot and beetroot juice substrates [J]. Food Processing and Preservation, 2019, 43(11): 1-8.
- [13] 刘学云, 于新, 何嘉敏, 等. 九种益生菌之间的相互作用及协同共生机理[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(13): 65-70.
- LIU X Y, YU X, HE J M, et al. Interactions between nine probiotics and mechanisms of cooperative symbiosis[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(13): 65-70.
- [14] 于璐, 周光明, 沈洁, 等. 离子交换色谱法测定 10 种热带水果中的葡萄糖、蔗糖和果糖[J]. 食品工业科技, 2016, 37(22): 94-107.
- YU L, ZHOU G M, SHEN J, et al. Determination of glucose, sucrose and fructose in 10 kinds of tropical fruits by ion chromatography[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(22): 94-107.
- [15] 赵丽娜, 李虹艳, 张青, 等. 响应面法优化嗜酸乳杆菌和植物乳杆菌制备燕麦芽益生菌饮料的条件[J]. 中国食品学报, 2017, 17(4): 104-115.
- ZHAO L N, LI H Y, ZHANG Q, et al. Optimization of oat malt based probiotic beverage fermented by mixture of *Lactobacillus acidophilus* and *Lactobacillus plantarum* by response surface methodology[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(4): 104-115.
- [16] MOUSAVI Z E, MOSAVI M. The effect of fermentation by *Lactobacillus plantarum* on the physicochemical and functional properties of liquorice root extract [J]. LWT-Food Science & Technology, 2019, 105: 164-168.
- [17] ALSULBI O S, SHORI A B. Viability of selected strains of probiotic *Lactobacillus* spp. and sensory evaluation of concentrated yogurt (labneh) made from cow, camel, and cashew milk[J]. Food Science and Technology, 2022, 42: 1-9.
- [18] CHEN R H, CHEN W X, CHEN H M, et al. Comparative evaluation of the antioxidant capacities, organic acids, and volatiles of papaya juices fermented by *Lactobacillus acidophilus* and *Lactobacillus plantarum* [J]. Journal of Food Quality, 2018, 2018: 1-12.
- [19] MINNAAR P P, DU PLESSIS H W, PAULSEN V, et al. *Saccharomyces cerevisiae*, non-saccharomyces yeasts and lactic acid bacteria in sequential fermentations: Effect on phenolics and sensory attributes of south african syrah wines[J]. South African Journ for Enology and Viticulture, 2017, 38(2): 237-244.
- [20] 李维妮, 张翔翔, 巍建平, 等. 益生菌发酵苹果汁工艺优化及有机酸的变化[J]. 食品科学, 2017, 38(22): 80-87.
- LI W N, ZHANG Y X, WEI J P, et al. Optimization of fermentation of apple juice by probiotics and organic acids evolution during fermentation[J]. Food Science, 2017, 38(22): 80-87.
- [21] CHARALAMPOPOULOS D, PANDIELLA S S, WEBB C. Growth studies of potentially probiotic lactic acid bacteria in cereal-based substrates [J]. Journal of Applied Microbiology, 2002, 92(5): 851-859.
- [22] 沈莲清, 苏光耀, 王向阳. 植物乳杆菌素研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2006, 25(5): 121-126.
- SHEN L Q, SU G Y, WANG X Y. Progress on plantaricin by *L. plantarum* [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2006, 25(5): 121-126.
- [23] CUI Y H, QU X J. Comparative analysis of two components signal transduction systems of the *Lactobacillus acidophilus* group [J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2011, 42: 147-157.
- [24] AZIZ T, SARWAR A, FAHIM M, et al. Conversion of linoleic acid to different fatty acid metabolites by *Lactobacillus plantarum* 13-3 and in silico characterization of the prominent reactions[J]. J Chil Chem Soc, 2020, 65(3): 4 879-4 884.
- [25] 叶盼. 植物乳杆菌发酵苹果汁的生理活性探究[D]. 上海: 华东理工大学, 2016: 18.
- YE P. Physiological functions of apple juice fermented by *Lactobacillus plantarum* [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2016: 18.
- [26] PIEKARSKA-RADZIK L, KLEWICKA E. Mutual influence of polyphenols and *Lactobacillus* spp. bacteria in food: A review[J]. European Food Research and Technology, 2021, 247: 9-24.
- [27] WANG J W, WEI B C, WEI B, et al. Evaluation of phenolics biotransformation and health promoting properties of blueberry juice following lactic acid bacteria fermentation[J]. Food Science and Technology, 2023, 43: 1-9.
- [28] ANKOLEKAR C, PINTO M, GREENE D. et al. In vitro bioassay based screening of antihyperglycemia and antihypertensive activities of *Lactobacillus acidophilus* fermented pear juice [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2012, 13: 221-230.
- [29] 郑璇. 不同产地皱皮木瓜主要化学成分及生物活性的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019: 21-22.
- ZHENG X. Chemical composition and biological activity of *Chaenomeles speciosa* in different producing areas [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2019: 21-22.
- [30] 高鹤. 植物乳杆菌发酵对苦瓜及其多糖组分的理化性质与降血糖功能的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2019: 26-28.
- GAO H. Effects of *Lactobacillus plantarum* fermentation on the physicochemical properties and anti-diabetic activities of *Momordica charantia* and its polysaccharides [D]. Nanchang: Nanchang University, 2019: 26-28.

(下转第 225 页)

- ZHENG L H, ZHANG H Q, CHEN R, et al. Determination of chloramphenicol, thiamphenicol, florfenicol and its metabolite florfenicol amine residues in animal tissues by UHPLC-MS/MS[J]. *Modern Food*, 2022, 28(20): 198-203.
- [31] 常波. QuEChERS-UPLC-MS/MS 法快速测定水产品中氯霉素[J]. *食品安全导刊*, 2023(3): 92-94.
- CHANG B. Using QuEChERS-UPLC-MS/MS for rapid determination of chloramphenicol in aquatic products[J]. *China Food Safety*, 2023(3): 92-94.
- [32] 辛晓晨, 卫瑾瑾, 鹿尘, 等. 通过式固相萃取/超高效液相色谱—串联质谱法测定鸡蛋中氯霉素、氟苯尼考和氟苯尼考胺残留[J]. *中国食品卫生杂志*, 2023, 35(9): 1 297-1 303.
- XIN X C, WEI J J, LU C, et al. Determination of chloramphenicol, florfenicol and florfenicol amine residues in hen eggs by ultra-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry with pass-through solid extraction[J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2023, 35(9): 1 297-1 303.
- [33] 程慧, 刘顺, 黎波, 等. 基于 DNA 酶催化反应建立适配体比色法检测鸡蛋中氯霉素[J]. *食品与机械*, 2021, 37(11): 61-66.
- CHEN H, LIU S, LI B, et al. An aptamer colorimetric method was established to detect chloramphenicol in eggs based on DNase-catalyzed reaction[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(11): 61-66.
- [34] 戴小辉. 基于镍—金属有机框纳米酶活性的氯霉素核酸适配体传感器构建和应用[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(13): 4 265-4 272.
- DAI X H. Construction and application of chloramphenicol aptasensor based on the nanozyme activity of nickel-metal-organic framework[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2022, 13(13): 4 265-4 272.
- [35] 熊威威, 汪鹏, 李文恒, 等. 基于染料标记的核酸适配体对氯霉素的比率定量检测[J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2022, 68(4): 405-412.
- XIONG W W, WANG P, LI W H, et al. Ratiometric quantitative detection of chloramphenicol based on dye-labeled aptamer[J]. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2022, 68(4): 405-412.
- [36] 王玲, 管笛, 周欣, 等. 磁性化学发光酶免疫法检测猪肉中的氯霉素[J]. *食品科学*, 2017, 38(10): 305-309.
- WANG L, GUAN D, ZHOU X, et al. Development of magnetic bead-based chemiluminescent enzyme immunoassay for chloramphenicol detection in swine muscle[J]. *Food Science*, 2017, 38(10): 305-309.
- [37] 艾晨昊, 吴叶宇, 谭学才, 等. 基于 CdS 量子点的电致化学发光—分子印迹传感器检测氯霉素[J]. *分析试验室*, 2019, 38(5): 513-518.
- AI C H, WU Y Y, TAN X C, et al. A molecularly imprinted polymer electrochemiluminescence sensor based on CdS quantum dots for detection of chloramphenicol [J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2019, 38(5): 513-518.
- [38] 王鑫, 刘河冰, 陶晓奇. 基于核酸适配体检测动物性食品中氯霉素残留的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(18): 254-262.
- WANG X, LIU H B, TAO X Q. Research progress on detection of chloramphenicol residues in animal food based on nucleic acid aptamer[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(18): 254-262.
- [39] 詹峰萍, 吴杨仪, 戴小辉, 等. 基于 Fe(III)-2-氨基对苯二甲酸金属有机框架的免标记氯霉素电化学传感器的构建及应用[J]. *分析化学*, 2023, 51(4): 539-548.
- ZHAN F P, WU Y Y, DAI X H, et al. Construction and application of Fe(III)-2-aminoterephthalic acid metal-organic framework-based label-free chloramphenicol electrochemical sensor [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2023, 51(4): 539-548.
- [40] 崔乃元, 赵义良, 马立才, 等. 水产品中氯霉素时间分辨荧光免疫层析定量检测方法[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(24): 241-245.
- CUI N Y, ZHAO Y L, MA L C, et al. Quantitative determination of chloramphenicol in aquatic products by time-resolved fluorescence immunochromatography [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(24): 241-245.
- (上接第 182 页)
- [31] 田丝竹, 李绪文, 藏爽, 等. 10 种野生植物果实对 α -淀粉酶和酪氨酸酶的抑制作用及其酚类化合物含量和抗氧化活性研究[J]. *分析化学*, 2021, 49(3): 449-459.
- TIAN S Z, LI X W, ZANG S, et al. Investigation of α -amylase and tyrosinase inhibitory activities, phenolic compounds, and antioxidant activity in ten kinds of wild fruits [J]. *Analytical Chemistry*, 2021, 49(3): 449-459.
- [32] LIZARDO R C M, CHO H D, WON Y S, et al. Fermentation with mono- and mixed cultures of *Lactobacillus plantarum* and *L. casei* enhances the phytochemical content and biological activities of cherry silverberry (*Elaeagnus multilora* Thunb.) fruit[J]. *J Sci Food Agric*, 2020, 100: 3 687-3 696.
- [33] PINO J A, ALMORA K, MARBOT R. Volatile components of papaya (*Carica papaya* L., Maradol variety) fruit[J]. *Flavour and Fragran Journal*, 2003, 18(6): 492-496.
- [34] GOMES B L, FABI J P, PURGATTO E. Cold storage affects the volatile profile and expression of a putative linalool synthase of papaya fruit[J]. *Food Research International*, 2016, 89(1): 654-660.
- [35] 孔祥瑞, 施瑞城, 张彦军, 等. 气相色谱质谱联用技术分析热处理前后番木瓜汁挥发性香气[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(1): 189-194.
- KONG X Q, SHI R CH, ZHANG Y J, et al. HS-SPME/GC-MS analysis of the aromatic components of papaya juice before and after the heat treatment[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2016, 42(1): 189-194.