DOI:10.12441/spyswjs.20231027003 [文章编号] 1673-1689(2025)05-0095-10

植物乳植杆菌发酵对芒果汁中黄酮类物质及有机酸的影响

杨 莹[1,2] 杨冬冬[1,2] 李 丽[1,2] 何雪梅[1,2] 叶冬青[1,2*]

(1. 广西农科院农产品加工研究所,广西 南宁 530007; 2. 广西果蔬贮藏与加工新技术重点实验室,广西 南宁 530007)

摘要:【目的】探讨植物乳植杆菌(*Lactobacillus plantarum*,*L. plantarum*)发酵对芒果汁中黄酮类物质和有机酸物质代谢的影响。**【方法】**选用6株植物乳植杆菌对'台农'芒果汁和'桂七'芒果汁进行发酵,通过超高效液相色谱串联质谱法(UPLC-MS/MS)测定芒果汁中有机酸、黄酮类物质的质量浓度,用正交偏最小二乘判别分析比较不同菌株发酵的芒果汁中的代谢产物差异。**【结果】**植物乳植杆菌发酵显著提高了芒果汁的总抗氧化能力(total antioxidant capacity,T-AOC),且有机酸的组成发生了显著变化:乳酸质量浓度显著增加,苹果酸质量浓度降低了99%以上,柠檬酸质量浓度降低了10%以上。此外,芒果原汁及发酵汁中共检测到142种黄酮类物质,其中发酵前后差异显著的代谢物有42种。KEGG富集分析结果表明,植物乳植杆菌发酵促进了类黄酮生物合成途径与花青素生物合成途径相关产物的富集。与芒果原汁相比,芒果发酵汁中的根皮苷、3,4,2',4',6'-五羟基查耳酮、芹菜素、山柰酚-3-*O*-槐三糖苷、矢车菊素-3,5-二-*O*-葡萄糖苷、天竺葵素-3-*O*-葡萄糖苷的质量分数均显著升高,而圣草酚、木犀草素、乔松素、短叶松素、根皮素、槲皮素、3,4,2',4',6'-五羟基查尔酮-4'-*O*-葡萄糖苷的质量分数显著下降。**【结论】**植物乳植杆菌发酵能显著影响芒果汁中有机酸、花青素以及黄酮类物质的水平,能够提高芒果汁中活性成分的质量浓度。

关键词:植物乳植杆菌;芒果;发酵;有机酸;黄酮类物质

Effects of *Lactobacillus plantarum* Fermentation on Flavonoids and Organic Acids in Mango Juice

YANG Ying[1,2] *YANG Dongdong*[1,2] *LI Li*[1,2] *HE Xuemei*[1,2] *YE Dongqing*[1,2*]

(1. Institute of Agro-products Processing Science and Technology, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Fruits and Vegetables Storage-processing Technology, Nanning 530007, China)

Abstract: [**Objective**] This study aimed to investigate the effects of *Lactobacillus plantarum* (*L. plantarum*) fermentation on the metabolism of flavonoids and organic acids in mango juice. [**Method**] Six strains of *L. plantarum* were selected for fermentation of the juice samples from two mango varieties 'Tainong' and 'Guiqi'. The mass concentrations of organic acids and flavonoids in the juice samples were determined by ultra high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS). Orthogonal partial least squares discriminant analysis was employed to compare the metabolites in the mango juice samples fermented

基金项目:国家"十四五"重点研发计划专项项目(2021YFD1600105);广西重点研发计划项目(桂科AB23075095,桂科AB21220013);国家现代农业香蕉产业技术体系(CARS-31)。

通信作者:叶冬青(1986—),女,博士,副研究员,主要从事酿酒微生物代谢与果酒感官质量控制研究。E-mail:yedongqing@gxaas.net

收稿日期:2023-10-27 **修回日期:**2024-01-01

with different strains. [**Result**] *L. plantarum* fermentation significantly enhanced the total antioxidant capacity (T-AOC) of mango juice. Furthermore, the composition of organic acids changed significantly, with a significant increase in the mass concentration of lactic acid and decreases of over 99% in the mass concentration of malic acid and over 10% in the mass concentration of citric acid. In addition, a total of 142 flavonoids were detected in both unfermented mango juice and fermented mango juice, with 42 significantly differential metabolites identified after fermentation. The KEGG pathway enrichment analysis of differential metabolites showed that *L. plantarum* fermentation promoted the enrichment of products related to flavonoid biosynthesis and anthocyanin biosynthesis pathways. Compared with unfermented juice, the fermented juice samples of both mango varieties showed significantly increased mass concentrations of phlorizin, 3, 4, 2', 4', 6'-pentahydroxychalcone, apigenin, cyanidin-3,5-*O*-diglucoside, and pelargonidin-3-*O*-glucoside and significantly decreased mass concentrations of eriodictyol, luteolin, pinocembrin, pinobanksin, phloretin, quercetin, and 3,4,2',4',6'-pentahydroxychalcone-4'-*O*-glucoside. [**Conclusion**] *L. plantarum* fermentation significantly affects the levels of organic acids, anthocyanins, and flavonoids in mango juice, enhancing the mass concentrations of bioactive components in fermented mango juice.
Keywords: *Lactobacillus plantarum*; mango; fermentation; organic acids; flavonoids

芒果主要生产于亚洲，其营养丰富且含有较多活性物质，有一定的药用价值。芒果中的黄酮类物质是主要的活性成分，具有C6—C3—C6的结构特点，在植物的生长、发育、开花、结果以及抗菌防病等方面发挥重要作用[1-2]。芒果中的黄酮类物质包括芒果苷、高芒果苷、异芒果苷等[3]，具有抗氧化、降血糖、降血脂、保护肝脏、保护胃肠道以及抗菌作用[4-5]。芒果苷及其衍生物能够提高胰岛素敏感性和糖苷酶活性，从而降低血糖[6]。此外，芒果苷还能通过抑制特定的蛋白激酶来降低炎症水平，从而改善心脏健康[7]。

利用乳酸菌对植物进行生物加工能够提高其生物活性，增强抗氧化与免疫调节特性。研究表明，用乳酸菌发酵的荞麦面粉制备的饼干中，香草酸质量浓度增加了23倍，原儿茶酸质量浓度增加了3倍，表儿茶素、牡荆黄素、荭草素、芹菜素、山柰酚和木犀草素的生物可及性（BI值）均有提高[8]。植物乳植杆菌和短乳杆菌可将橙皮素-7-*O*-芦丁苷降解为橙皮素，可将柚皮素-7-*O*-芦丁苷降解为柚皮素[9]。此外，相比于酒类酒球菌参与的葡萄酒苹果酸乳酸发酵（MLF），植物乳植杆菌参与的MLF能更显著地提高聚合花青素的合成率，增加吡喃花青素的质量浓度，从而改善葡萄酒的色泽[10]。

用植物乳植杆菌进行果汁发酵有多种益处。植物乳植杆菌发酵可以显著增加红枣汁的总酚质量浓度以及提升其抗氧化活性[11]。在百香果汁中，植物乳植杆菌CCMA0743的活菌数量可达到1×10^9 CFU/mL，且大豆卵磷脂质量浓度可达到0.3 μg/mL[12]。桑葚浆经植物乳植杆菌NCU137发酵后，其抑菌性得到显著提高[13]。荔枝果汁经植物乳植杆菌HU-C2W发酵后，其γ-氨基丁酸（GABA）质量浓度可增加至3.92 g/L[14]。此外，桑葚汁经植物乳植杆菌BC114与酿酒酵母SC125共同发酵后，其GABA质量浓度可提高至0.97 g/L[15]。使用植物乳植杆菌对樱桃酒进行发酵可以增加酯类香气成分和萜烯类香气成分[16]。

植物乳植杆菌发酵对果汁中活性成分也有一定影响，但目前对植物乳植杆菌发酵果汁中黄酮类物质代谢的研究相对较少。芒果富含黄酮类物质，且其富含的生物活性物质与抗氧化活性物质是影响芒果消费的重要因素[17-19]。作者以芒果为发酵基质，选取6株自主筛选的植物乳植杆菌为试验材料，采用广泛非靶向UPLC-MS/MS等分析方法，评估了植物乳植杆菌对‘台农’芒果汁和‘桂七’芒果汁的发酵特性以及有机酸和黄酮类物质代谢的影响，以期为芒果的深加工提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

‘台农’芒果和‘桂七’芒果购于百色市田东县中国芒果交易中心。6株植物乳植杆菌筛选自水果自然发酵过程，经16S rDNA鉴定为植物乳植杆菌。有机酸：日本TCI公司；甲醇、甲酸、乙腈：德国Meker公司；黄酮：美国Sigma公司；芦丁：上海源

叶生物科技有限公司；果胶酶、纤维素酶：南宁庞博生物工程有限公司；没食子酸、单宁酸：天津市大茂化学试剂厂；福林-丹尼斯试剂、福林-肖卡试剂：上海雅吉生物科技有限公司；T-AOC检测试剂盒：北京索莱宝科技有限公司。

1.2　仪器与设备

超高效液相色谱仪：Nexera X2型，日本岛津公司；质谱仪：ABSCIEX 4500 QTRAP型，美国SCIEX公司；高效液相色谱仪：ACQUITY UPLC® BEH型，配备ACQUITY UPLC® BEH C18色谱柱（2.1 mm×100 mm×1.7 μm），美国Waters公司；质谱仪：AB4000型，美国SCIEX公司。

1.3　方法

1.3.1　芒果汁发酵样品的制备

芒果去皮去核，将果肉打浆后加入质量分数0.05%纤维素酶和质量分数0.15%果胶酶，40 ℃酶解2 h，用纱布过滤获得芒果清汁。将芒果清汁预热至35 ℃，分别接种1×10^6 CFU/mL活化的植物乳植杆菌1~6号，进行芒果汁的恒温（35 ℃）发酵。发酵40 h后，于80 ℃下水浴巴氏杀菌15 min，并将样品于-20 ℃下保存。‘台农’芒果原汁编号为TMG1，‘台农’芒果发酵汁编号为TMG2、TMG3、TMG4、TMG5、TMG6、TMG7；‘桂七’芒果原汁编号为GMG1，‘桂七’芒果发酵汁编号为GMG2、GMG3、GMG4、GMG5、GMG6、GMG7。每个处理重复3次。

1.3.2　理化指标测定

用手持糖量计测定可溶性固形物质量分数；采用斐林试剂法测定还原糖质量浓度；采用GB/T 12456—2021中的碱滴定法（以乳酸计）测定可滴定酸质量浓度；用pH检测仪测定pH；用试剂盒检测T-AOC；采用福林-丹尼斯法测定单宁质量分数；采用分光光度计法（芦丁标准品）测定总黄酮质量分数。

1.3.3　有机酸的测定

参照文献[20]的方法，采用高效液相色谱-质谱联用方法测定26种有机酸的质量浓度，采用ACQUITY UPLC® BEH C18色谱柱，ESI负离子电离，多重反应监测（MRM）模式进行扫描。

1.3.4　黄酮类物质的测定

1）黄酮的提取：对从-80 ℃冰箱中取出的芒果汁样品进行解冻，涡旋混匀10 s。取1.5 mL样品进行冷冻干燥，加入0.3 mL体积分数70%的甲醇内标提取液，涡旋混匀3 min，于12 000 r/min、4 ℃离心10 min，收集上清液，经0.22 μm微孔滤膜过滤后用UPLC-MS/MS进行检测。

2）液相色谱条件：使用Agilent SB-C18色谱柱（2.1 mm×100 mm×1.8 μm）；流动相：体积分数0.1%甲酸-水溶液，体积分数0.1%甲酸-乙腈溶液；流量：0.35 mL/min；柱温：40 ℃；进样量：4 μL。

3）质谱条件：采用正负2种离子模式进行数据采集。ESI源操作参数如下：离子源，涡轮喷雾；离子源温度：550 ℃；离子喷雾电压（IS）：5 500 V（正离子模式）、-4 500 V（负离子模式）；离子源气体I（GSI）、气体II（GSII）和帘气（CUR）的气压分别设置为344.74、413.69、172.37 kPa，碰撞诱导电离参数设置为高。三重四极杆扫描使用MRM模式，并将碰撞气体（氮气）设置为中等。

4）黄酮类物质的定性定量检测：基于武汉迈维代谢生物科技股份有限公司的MVDB V2.0数据库和代谢物信息公共数据库的二级谱信息，对黄酮类物质进行定性检测；基于三重四级杆质谱的MRM进行黄酮类物质的定量检测，对所有物质质谱峰的峰面积进行积分，用Multia Quant软件进行色谱峰的积分和校正。

1.3.5　数据处理

使用SPSS 17.0软件对数据进行方差分析，P<0.05代表差异显著，采用Origin 8.5软件作图，使用R软件进行多元统计分析。

2　结果与讨论

2.1　不同芒果汁的理化指标

如表1所示，与芒果原汁相比，植物乳植杆菌发酵的‘台农’芒果汁和‘桂七’芒果汁的可溶性固形物质量分数和还原糖质量浓度均显著降低，可滴定酸质量浓度显著增加，表明植物乳植杆菌在芒果汁中具有良好的生长特性。与芒果原汁相比，植物乳植杆菌发酵对芒果汁的总酚、单宁和黄酮的质量浓度产生了影响，不同菌株之间存在差异。与其他菌株相比，植物乳植杆菌3号发酵的‘台农’芒果汁的黄酮质量浓度显著提高，具有应用潜力。

2.2　植物乳植杆菌发酵芒果汁的抗氧化能力

黄酮类物质能够提高机体的抗氧化能力和清

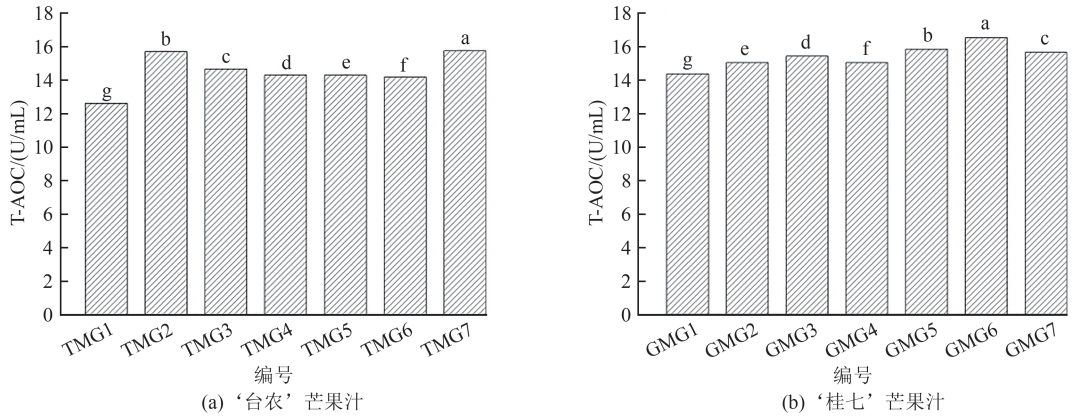
表 1 植物乳植杆菌发酵芒果汁的理化指标

Table 1 Physicochemical indexes of mango juice fermented with *L. plantarum*

品种	试验编号	可溶性固形物质量分数/%	还原糖质量浓度/(g/L)	可滴定酸质量浓度/(g/L)	pH	总酚质量浓度/(g/L)	单宁质量浓度/(g/L)	总黄酮质量浓度/(g/L)
‘台农’芒果	TMG1	17.4±0.00^{a}	172.50±0.00^{a}	5.78±0.50^{c}	4.37±0.05^{a}	8.39±0.22^{a}	3.68±0.08^{ab}	0.67±0.00^{a}
	TMG2	15.87±0.42^{b}	85.00±2.50^{de}	13.29±0.25^{b}	3.52±0.02^{b}	8.43±0.27^{a}	4.25±0.87^{a}	0.73±0.15^{a}
	TMG3	15.03±1.01^{c}	79.17±7.64^{e}	14.44±0.50^{a}	3.49±0.01^{b}	8.78±0.11^{a}	3.90±0.08^{ab}	0.42±0.06^{c}
	TMG4	16.00±0.00^{b}	95.00±2.50^{c}	11.84±0.50^{b}	3.53±0.03^{b}	8.29±0.53^{a}	4.20±0.24^{a}	0.75±0.12^{a}
	TMG5	16.60±0.00^{ab}	107.50±0.00^{b}	14.73±0.00^{a}	3.49±0.00^{b}	8.53±1.13^{a}	3.42±0.10^{b}	0.60±0.12^{ab}
	TMG6	15.97±0.40^{b}	87.50±5.00^{d}	12.71±0.50^{b}	3.49±0.01^{b}	8.15±0.00^{a}	3.69±0.02^{ab}	0.48±0.04^{bc}
	TMG7	16.70±0.00^{ab}	112.50±0.00^{b}	14.16±0.50^{a}	3.49±0.02^{b}	7.19±0.59^{b}	3.50±0.00^{b}	0.65±0.04^{a}
‘桂七’芒果	GMG1	18.63±0.23^{a}	192.50±5.00^{a}	5.47±0.23^{c}	4.05±0.01^{a}	9.06±0.71^{a}	3.19±0.12^{b}	0.68±0.01^{a}
	GMG2	16.60±0.10^{b}	175.00±2.50^{b}	16.46±0.75^{b}	3.42±0.01^{cd}	7.65±0.06^{c}	2.99±0.14^{c}	0.60±0.00^{ab}
	GMG3	18.27±0.25^{a}	187.50±5.00^{a}	17.62±0.50^{a}	3.40± 0.02^{d}	7.76±0.22^{bc}	3.29±0.05^{ab}	0.54±0.09^{abc}
	GMG4	16.53±0.06^{b}	175.00±5.00^{bc}	16.76±0.25^{ab}	3.45±0.02^{bc}	8.29±0.34^{b}	3.38±0.03^{a}	0.62±0.16^{ab}
	GMG5	16.63±0.15^{b}	172.50±5.00^{bc}	17.33±0.00^{a}	3.49±0.00^{b}	8.15±0.11^{bc}	3.32±0.10^{ab}	0.62±0.02^{ab}
	GMG6	16.17±0.29^{b}	165.00±7.50^{c}	17.04±0.50^{ab}	3.45±0.04^{bc}	8.00±0.22^{ab}	3.19±0.08^{b}	0.49±0.10^{bc}
	GMG7	16.57±0.12^{b}	127.50±5.00^{d}	16.76±0.50^{ab}	3.45±0.03^{bc}	7.83±0.00^{bc}	2.97±0.06^{c}	0.44±0.05^{c}

注：同一芒果品种间同列不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

除自由基能力[1]。T-AOC代表各种抗氧化物质构成的总抗氧化水平，可用于评估生物活性物质的抗氧化能力。由图1可知，植物乳植杆菌发酵芒果汁的T-AOC显著提高，与刘聪[21]的结果一致。‘台农’芒果原汁的T-AOC为12.62 U/mL，经植物乳植杆菌发酵后，其T-AOC可增加到15.74 U/mL；‘桂七’芒果原汁的T-AOC为14.37 U/mL，经植物乳植杆菌发酵后可增加到16.53 U/mL。在芒果原汁中，‘桂七’芒果的T-AOC高于‘台农’芒果，这与康超等[22]的结论一致。在芒果发酵汁中，‘台农’芒果的T-AOC提升更为明显。此外，不同菌株发酵的T-AOC也表现出了一定的差异性。在‘台农’芒果发酵汁中，植物乳植杆菌1号和植物乳植杆菌6号对芒果发酵汁中T-AOC的提升效果最显著；在‘桂七’芒果汁中，植物乳植杆菌5号对芒果发酵汁中T-AOC的提升效果最显著。



(a) ‘台农’芒果汁 (b) ‘桂七’芒果汁

图中不同小写字母表示组间差异显著（$P<0.05$）。

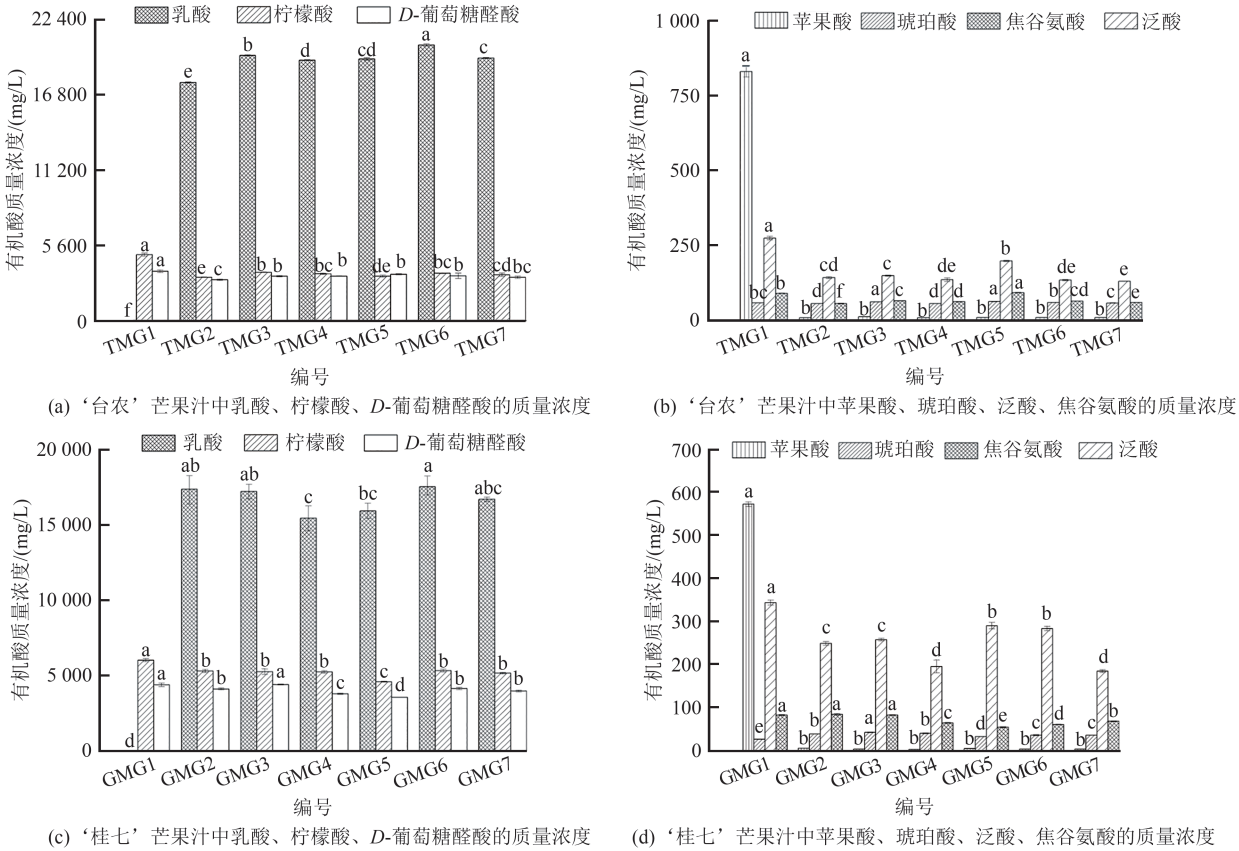
图 1 植物乳植杆菌发酵芒果汁的T-AOC

Fig. 1 T-AOC of mango juice fermented with *L. plantarum*

2.3 植物乳植杆菌发酵芒果汁的有机酸质量浓度的变化

植物乳植杆菌发酵会导致果汁中有机酸的质量浓度发生变化。芒果原汁中，有机酸的质量浓度由高到低依次为：柠檬酸、*D*-葡萄糖醛酸、苹果酸、泛酸、焦谷氨酸、琥珀酸。芒果发酵汁中，有机

酸质量浓度从高到低依次为：乳酸、柠檬酸、*D*-葡萄糖醛酸、泛酸、焦谷氨酸、琥珀酸、苹果酸。如图2所示，发酵汁中乳酸质量浓度显著增加，柠檬酸、苹果酸、泛酸的质量浓度显著下降；*D*-葡萄糖醛酸、琥珀酸、焦谷氨酸质量浓度变化不明显。在‘台农’芒果汁中，苹果酸质量浓度由发酵前的822.5 mg/L降低至7.5 mg/L，而乳酸质量浓度增加到20 550.0 mg/L。而在‘桂七’芒果汁中，苹果酸质量浓度由发酵前的572.5 mg/L降低至4.8 mg/L，而乳酸质量浓度增加到17 550.0 mg/L之上。在产乳酸方面，植物乳植杆菌5号表现出了较强的产乳酸能力。在降解苹果酸方面，不同植物乳植杆菌发酵均能将2种芒果汁中的苹果酸质量浓度降至10.0 mg/L以下。植物乳植杆菌通过苹果酸-乳酸代谢途径，将芒果汁中的苹果酸转化为乳酸[23]，导致苹果酸质量浓度显著降低。发酵后的芒果汁中，柠檬酸质量浓度略有降低，‘台农’芒果汁中，其质量浓度由4 950.0 mg/L降低至3 400.0 mg/L；‘桂七’芒果汁中，其质量浓度由6 200.0 mg/L降低至5 200.0 mg/L。相关研究表明，植物乳植杆菌可以通过葡萄糖-柠檬酸共表达途径降解柠檬酸，同时增加3-羟基-2-丁酮的质量浓度[24]，这有利于提升发酵果汁的口感和风味。



(a)‘台农’芒果汁中乳酸、柠檬酸、*D*-葡萄糖醛酸的质量浓度　(b)‘台农’芒果汁中苹果酸、琥珀酸、泛酸、焦谷氨酸的质量浓度

(c)‘桂七’芒果汁中乳酸、柠檬酸、*D*-葡萄糖醛酸的质量浓度　(d)‘桂七’芒果汁中苹果酸、琥珀酸、泛酸、焦谷氨酸的质量浓度

图中不同小写字母表示同种物质组间差异显著（$P<0.05$）。

图2　植物乳植杆菌发酵芒果汁的有机酸质量浓度

Fig. 2　Mass concentrations of organic acids in mango juice fermented with *L. plantarum*

2.4　植物乳植杆菌发酵对芒果汁中黄酮类物质的影响

芒果汁中共检测到142种黄酮类物质，其中39种黄酮醇、22种黄酮、17种二氢黄酮、17种单宁、14种花青素及原花青素、9种二氢黄酮醇、9种黄酮碳糖苷、7种查尔酮、2种黄烷醇、5种其他类黄酮和1种异黄酮。芒果汁中，各黄酮类物质在总黄酮类物质中的质量分数占比见表2。结果表明，‘台农’芒果汁与‘桂七’芒果汁在黄酮类物质组成上有明显差异。‘台农’芒果原汁中，单宁质量分数占比最高（87.38%），其次是黄酮醇（5.40%）。‘桂七’芒果原汁中，单宁质量分数占比最高（56.80%），其次是芒果苷及其衍生物（19.15%）、黄酮醇（11.31%）和黄酮（9.33%）。植物乳植杆菌发酵对芒果汁中单宁和黄酮的质量分数在总黄酮类

表 2 ‘台农’芒果汁与‘桂七’芒果汁中各黄酮类物质质量分数在总黄酮类物质质量分数中的占比

Table 2 Proportion of the mass fraction of each flavonoid in the mass fraction of total flavonoids in juice samples of the mango varieties ‘Tainong’ and ‘Guiqi’

单位：%

品种	试验编号	各黄酮类物质质量分数在总黄酮类物质质量分数中的占比										
		单宁	芒果苷及其衍生物	黄酮醇	黄酮	二氢黄酮	二氢黄酮醇	黄酮碳糖苷	查尔酮	黄烷醇	异黄酮	花青素及原花青素
‘台农’芒果	TMG1	87.38	0.59	5.40	2.78	1.42	1.30	0.24	0.10	0.23	0.11	0.44
	TMG2	55.55	1.99	18.87	11.40	4.28	4.08	0.73	0.86	0.23	0.36	1.64
	TMG3	73.45	1.15	10.90	6.91	2.62	2.48	0.42	0.50	0.20	0.33	1.03
	TMG4	71.30	1.23	12.03	7.46	2.85	2.56	0.48	0.47	0.20	0.33	1.09
	TMG5	58.34	1.76	18.35	10.98	3.56	3.46	0.63	0.70	0.28	0.47	1.49
	TMG6	70.21	1.18	12.54	8.38	2.62	2.44	0.46	0.38	0.18	0.44	1.19
	TMG7	71.53	1.13	11.97	6.94	2.91	2.78	0.47	0.57	0.23	0.32	1.14
‘桂七’芒果	GMG1	56.80	19.15	11.31	9.33	1.21	0.40	0.68	0.56	0.10	0.05	0.40
	GMG2	21.80	32.93	21.00	18.18	1.78	0.73	0.86	1.63	0.12	0.10	0.87
	GMG3	20.43	31.73	22.79	18.63	1.88	0.75	0.84	1.77	0.14	0.09	0.96
	GMG4	21.01	33.56	20.79	18.26	1.93	0.76	0.87	1.65	0.16	0.11	0.90
	GMG5	19.23	32.79	21.47	20.11	1.89	0.74	0.83	1.71	0.14	0.10	0.99
	GMG6	20.16	32.02	21.93	19.47	1.85	0.73	1.03	1.66	0.19	0.08	0.89
	GMG7	19.51	33.38	22.34	18.19	2.02	0.76	1.00	1.59	0.14	0.10	0.95

物质质量分数中的占比有明显影响，发酵芒果汁中单宁的质量分数占比下降。‘台农’芒果汁中，单宁的质量分数占比最低可降至 55.55%；‘桂七’芒果汁中，单宁的质量分数占比最低可降至 19.23%。植物乳植杆菌中单宁酶的水解作用是导致芒果发酵汁中单宁质量分数占比降低的主要原因[25]。

芒果苷是芒果中重要的活性成分。芒果苷及其衍生物属于双苯吡酮类黄酮，包括芒果苷（mangiferin）、高芒果苷（homomangiferin）、异芒果苷（isomangiferin）、6-*O*-（phydroxybenzoyl）-mangiferin、6-*O*-galloyl-mangiferin、芒果苷酸酯（mangiferin gallate）和 dimethylmangiferin[3]。由表 2 可知，‘桂七’芒果原汁中，芒果苷及其衍生物的质量分数占比较高（19.15%）。经植物乳植杆菌发酵后，其芒果苷及其衍生物质量分数占比明显增加，其中植物乳植杆菌 3 号发酵的‘桂七’芒果汁的提升效果最明显，质量分数占比达 33.56%。‘台农’芒果原汁中，芒果苷及其衍生物的质量分数占比较低，仅为 0.59%，经过植物乳植杆菌 1 号发酵后，其质量分数占比最高增加至 1.99%。表明植物乳植杆菌发酵均能显著增加果汁中芒果苷及其衍生物的质量分数占比，表明该发酵方法在提升果汁的生物活性方面具有潜力。

黄酮是植物中主要的活性物质之一。植物乳植杆菌发酵能显著提高黄酮的质量分数占比，‘台农’芒果汁的黄酮质量分数占比由 2.78% 最高增加到 11.40%，该结果是由植物乳植杆菌 1 号发酵实现的；‘桂七’芒果汁的黄酮质量分数占比由 9.33% 最高增加到 20.11%，该结果是由植物乳植杆菌 4 号发酵实现的。这表明植物乳植杆菌发酵对黄酮质量分数占比的提高具有积极的影响。这些黄酮在果汁中的增加可能会提高果汁的生物活性，有益于人体健康。

经植物乳植杆菌发酵后，芒果汁中矢车菊素-3，5-二-*O*-葡萄糖苷、天竺葵素-3-*O*-葡萄糖苷的质量分数均显著提高，增幅超过 2 倍。同时，其他相关产物也富集到花青素生物合成途径上，表明植物乳植杆菌对花青素的代谢有显著影响。花青素是高等植物产生的色素，通过饮食摄取的花青素可以预防多种疾病[26]。植物乳植杆菌发酵显著提高了花青素及原花青素质量分数在总黄酮类物质质量分数中的占比。从菌株差异性来看，植物乳植杆菌 1 号对‘台农’芒果汁中的花青素及原花青素质量分数占比的影响最大，由 0.44% 增加至 1.64%；而植物乳植杆菌 4 号对‘桂七’芒果汁中花青素及原花青素的质量分数占比影响最大，由 0.40% 增加至 0.99%。Wang 等[10]研究表明，植物乳植杆菌在 MLF 过程释放乙醛，乙醛质量浓度的增加可显著提高吡喃花青素的质量浓度，对改善色泽具有重要意义。有研究者利用植物乳植杆菌

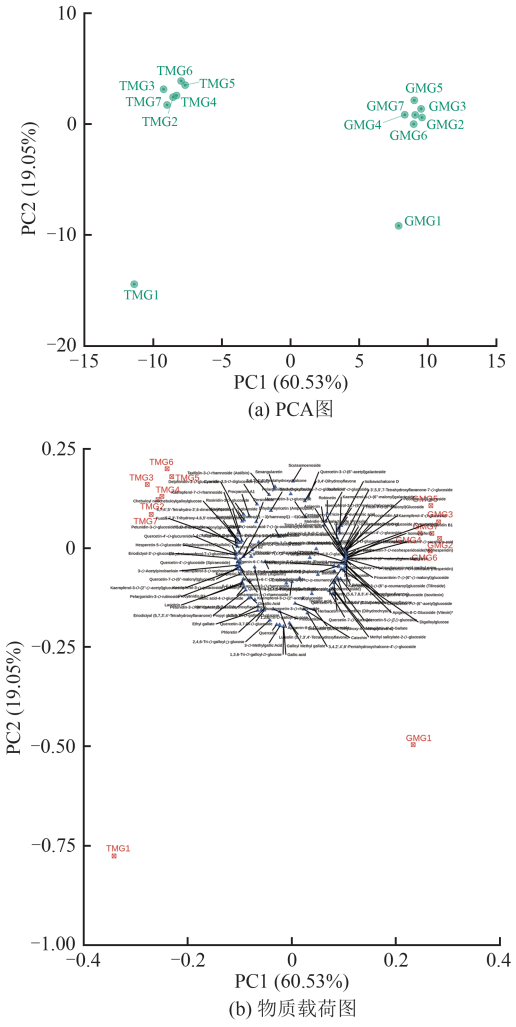
作为工程菌株，以绿茶为底物生产植物源性活性花青素，特别是橙色和黄色的吡喃花青素[27]。此外，植物乳植杆菌发酵可增加葡萄酒中吡喃花青素的积累，改善色泽[10]。还有研究结果表明，植物乳植杆菌发酵不仅对花青素类物质质量浓度的提高具有潜力，还可以增加荞麦面粉原香茶酸、丁香酚、咖啡、香豆酸以及5种黄酮素的生物可及性[8]，显著提高小叶苦丁枝条提取物中川皮苷、鹅肌肽等活性物质的质量分数[28]。这些研究表明，植物乳植杆菌发酵对于增强食品的营养价值和生物活性具有重要作用。

对芒果汁发酵前后黄酮类物质进行主成分分析（PCA）。如图3所示，第一主成分（PC1）解释了原始数据60.53%的特征，说明可以将样品按照芒果品种进行分类。第二主成分（PC2）解释了原始数据19.05%的特征，说明可以将芒果原汁与芒果发酵汁进行区分，表明发酵前后芒果汁中的黄酮类物质存在明显差异。

2.5　植物乳植杆菌发酵的芒果汁中黄酮类物质差异代谢物的筛选分析

为探讨植物乳植杆菌发酵对芒果汁中黄酮类物质的影响，对发酵前后的差异代谢物进行分析。根据变量重要性投影分析值（VIP≥1，P<0.05）和差异倍数值（Fold Change≥2和Fold Change≤0.5），筛选出‘台农’芒果汁发酵前后的差异显著代谢物有42种，发酵后质量分数提高的差异显著代谢物有16种，质量分数下降的差异显著代谢物有26种，见图4（a）；‘桂七’芒果汁中，发酵前后差异显著代谢物有42种，发酵后质量分数提高的差异显著代谢物有21种，质量分数下降的差异显著代谢物有21种，见图4（b）。

如图5所示，3,4,2’,4’,6’-五羟基查耳酮、落新妇苷、四羟基黄酮-7-*O*-葡萄糖醛酸苷、槲皮素-3-*O*-半乳糖苷在2种芒果发酵汁中相对含量比例均增加。黄酮、单宁和花青素具有抗氧化、抗炎和抗癌等潜在作用，因此发酵后的芒果汁可能具有更高的营养价值。没食子酰没食子酸甲酯、没食子酸、3-*O*-没食子酸甲酯、槲皮素、1,2,3-三-*O*-没食子酰-*D*-葡萄糖，这5种物质则表现出相对含量降低的规律。这些差异代谢物的变化可能与发酵过程中菌株的代谢活性和酶的作用有关[17,29]。



(a) PCA图

(b) 物质载荷图

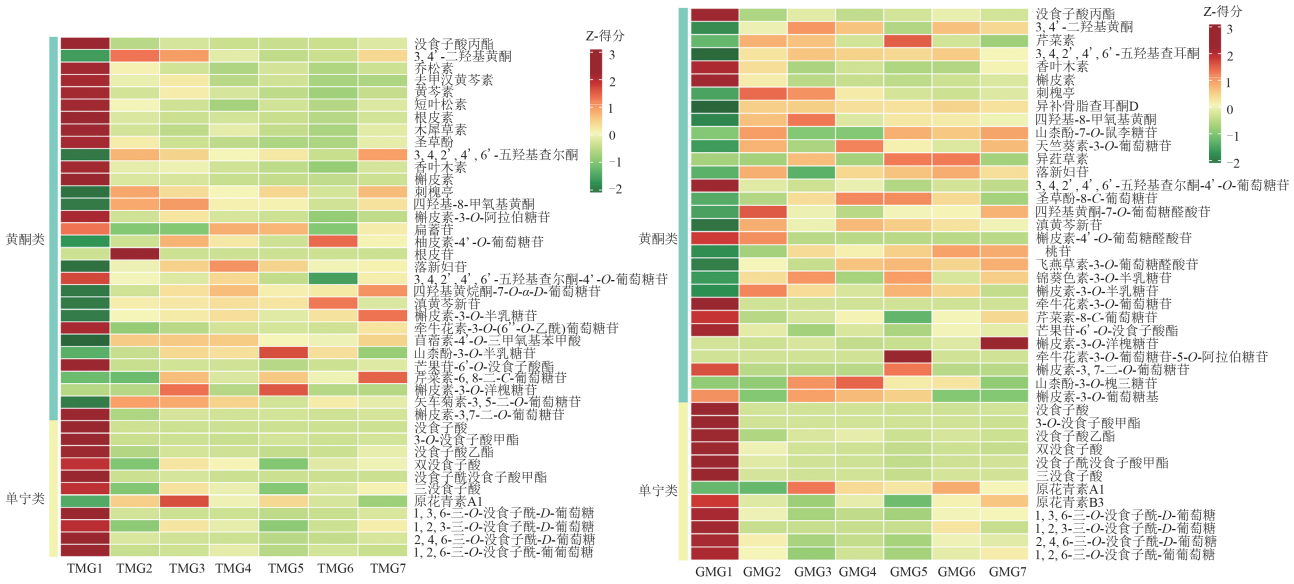
图3　芒果汁中黄酮类物质的PCA分析

Fig. 3　PCA of flavonoids in mango juice samples

2.6　差异代谢物KEGG功能注释及富集分析

通过KEGG对差异代谢物进行通路富集分析，发现‘台农’芒果发酵汁差异代谢物质富集到5个通路，见图6（a）。主要是类黄酮生物合成，其中10个差异代谢物质中有9个参与了此途径，分别是圣草酚、3,4,2’,4’,6’-五羟基查尔酮-4’-*O*-葡萄糖苷、木犀草素、乔松素、根皮苷、短叶松素、根皮素、3,4,2’,4’,6’-五羟基查耳酮、槲皮素。木犀草素、3,4,2’,4’,6’-五羟基查耳酮、槲皮素、根皮苷、圣草酚参与次级代谢物生物合成；木犀草素、3,4,2’,4’,6’-五羟基查耳酮、槲皮素、圣草酚参与代谢途径。槲皮素、木犀草素参与黄酮和黄酮醇的生物合成；矢车菊素-3,5-二-*O*-葡萄糖苷参与花青素生物合成。

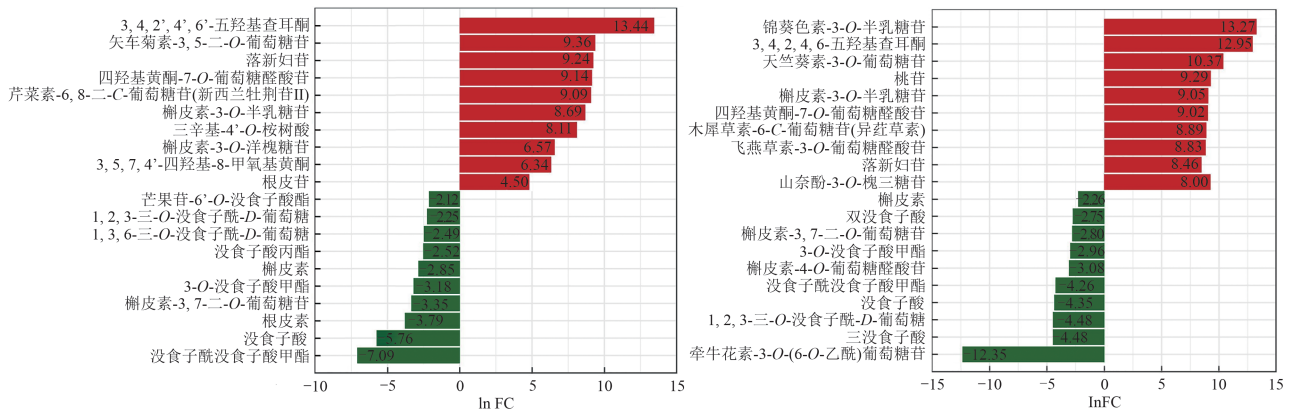
‘桂七’芒果发酵汁中，差异代谢产物主要富集在6个通路上，且在代谢途径和类黄酮生物合成



(a)‘台农’芒果汁 (b)‘桂七’芒果汁

图 4 芒果汁中差异代谢物质的聚类热图

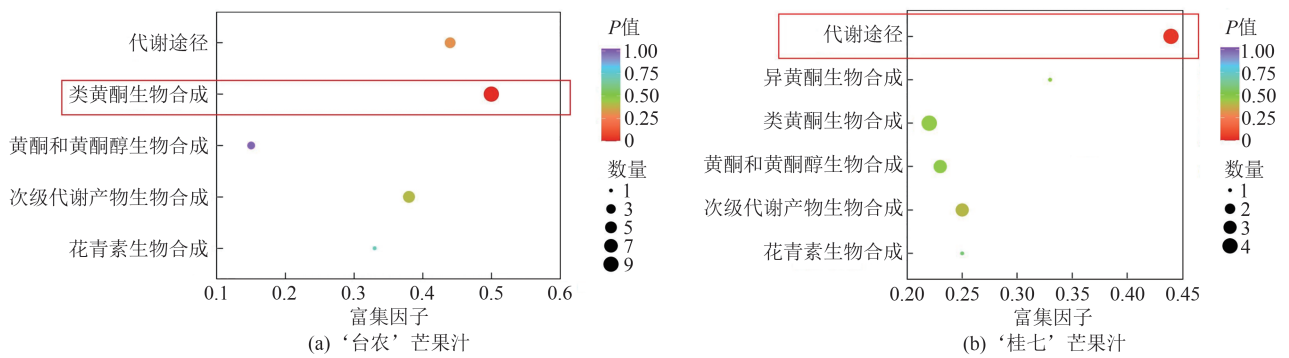
Fig. 4 Clustering heat map of differential metabolites in mango juice



(a)‘台农’芒果汁 (b)‘桂七’芒果汁

图 5 差异倍数变化最大的前 10 种代谢物

Fig. 5 Top 10 metabolites regarding fold changes



(a)‘台农’芒果汁 (b)‘桂七’芒果汁

图 6 差异代谢物 KEGG 富集通路

Fig. 6 KEGG pathway enrichment analysis of differential metabolites

通路上显著富集，其次是黄酮和黄酮醇生物合成、次级代谢产物的生物合成、异黄酮生物合成、花青素生物合成，见图6(b)。天竺葵素-3-*O*-葡萄糖苷、槲皮素、3,4,2',4',6'-五羟基查耳酮、芹菜素参与代谢途径；芹菜素、3,4,2',4',6'-五羟基查耳酮、3,4,2',4',6'-五羟基查尔酮-4'-*O*-葡萄糖苷、槲皮素参与类黄酮合成；槲皮素、山柰酚-3-*O*-槐三糖苷、芹菜素参与黄酮和黄酮醇生物合成；芹菜素、槲皮素、天竺葵素-3-*O*-葡萄糖苷参与次级代谢物生物合成；芹菜素参与异黄酮生物合成；天竺葵素-3-*O*-葡萄糖苷参与花青素生物合成。

3 结论

‘台农’芒果是鲜食及加工的主要品种，‘桂七’为新兴品种，研究表明，两者在黄酮类物质的组成上具有较大差异。‘台农’芒果汁中，单宁质量分数在总黄酮类物质质量分数中的占比最高，为87.34%；而‘桂七’芒果汁中，其质量分数占比为56.80%。此外，发酵芒果汁中，单宁类成分占比降低，而芒果苷及其衍生物、黄酮、黄酮醇、花青素及原花青素的质量分数占比明显升高。该结果对芒果的深加工及植物化学物质的提取具有重要指导意义。

此外，作者用6株植物乳植杆菌发酵了‘台农’芒果汁和‘桂七’芒果汁，通过UPLC-MS/MS等检测方法系统研究了植物乳植杆菌发酵对芒果汁中有机酸及活性物质成分的影响，筛选出发酵前后的差异代谢物并进行了代谢通路分析。结果表明，植物乳植杆菌发酵不仅改变了芒果汁中有机酸的组成，还明显影响了黄酮类物质等活性物质组成。植物乳植杆菌发酵促进了芒果汁中根皮苷、3,4,2',4',6'-五羟基查耳酮、芹菜素等物质在类黄酮生物合成途径中的富集，以及矢车菊素-3,5-二-*O*-葡萄糖苷、天竺葵素-3-*O*-葡萄糖苷等物质在花青素生物合成途径中的富集。植物乳植杆菌发酵芒果汁中，圣草酚、木犀草素、乔松素、短叶松素、根皮素、槲皮素、3,4,2',4',6'-五羟基查尔酮-4'-*O*-葡萄糖苷等物质的质量分数显著下降。这些变化对芒果汁的风味、营养价值和保健效果产生积极影响。

参考文献

[1] 匡海学，冯卫生. 中药化学[M]. 4版. 北京：中国中医药出版社，2021：71-82.

[2] 吴萌萌，刘怡，严馨，等. 苦荞麸皮黄酮提取物及有效成分的抑菌活性[J]. 食品与生物技术学报，2021，40(11)：77-83.
WU M M，LIU Y，YAN X，et al. Antibacterial activities of flavonoid extracts of tartary buckwheat bran and its effective components[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2021，40(11)：77-83.(in Chinese)

[3] 李丽，孙健. 芒果贮藏保鲜加工原理与技术[M]. 北京：中国轻工业出版社，2023.

[4] 关丽，杨翠倩，李瑞佳，等. 芒果苷的研究进展[J]. 当代化工，2021，50(2)：478-481，486.
GUAN L，YANG C Q，LI R J，et al. Research progress of mangiferin[J]. Contemporary Chemical Industry，2021，50(2)：478-481，486.(in Chinese)

[5] 孙晨瑜，谢国勇，秦民坚. 芒果苷在植物界的分布及药理活性研究进展[J]. 中国野生植物资源，2017，36(4)：39-45，49.
SUN C Y，XIE G Y，QIN M J. Distribution of mangiferin in plant kingdom and its pharmacological research progress[J]. Chinese Wild Plant Resources，2017，36(4)：39-45，49.(in Chinese)

[6] ZHOU L，PAN Y Q，CHONAN R，et al. Mitigation of insulin resistance by mangiferin in a rat model of fructose-induced metabolic syndrome is associated with modulation of CD36 redistribution in the skeletal muscle[J]. The Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics，2016，356(1)：74-84.

[7] ZHENG D Z，HOU J，XIAO Y B，et al. Cardioprotective effect of mangiferin on left ventricular remodeling in rats[J]. Pharmacology，2012，90(1/2)：78-87.

[8] ZIELIŃSKI H，WICZKOWSKI W，TOPOLSKA J，et al. Bioaccessibility of phenolic acids and flavonoids from buckwheat biscuits prepared from flours fermented by lactic acid bacteria[J]. Molecules，2022，27(19)：6628.

[9] GUO X，GUO A L，LI E H. Biotransformation of two *Citrus* flavanones by lactic acid bacteria in chemical defined medium[J]. Bioprocess and Biosystems Engineering，2021，44(2)：235-246.

[10] WANG S Y，LI S Y，ZHAO H F，et al. Acetaldehyde released by *Lactobacillus plantarum* enhances accumulation of pyranoanthocyanins in wine during malolactic fermentation[J]. Food Research International，2018，108：254-263.

[11] LI T L，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 Chemistry，2021，339：127859.

[12] FONSECA H C，MELO D S，RAMOS C L，et al. *Lactiplantibacillus plantarum* CCMA 0743 and

Lacticaseibacillus paracasei subsp. *paracasei* LBC-81 metabolism during the single and mixed fermentation of tropical fruit juices[J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2021,52(4):2307-2317.

[13] 苏能能,关倩倩,彭珍,等. 乳酸菌发酵对桑葚浆品质及抑菌性能的影响[J]. 食品与发酵工业,2018,44(9):117-124.
SU N N, GUAN Q Q, PENG Z, et al. Effects of lactic acid bacteria on quality and antibacterial properties of mulberry puree[J]. Food and Fermentation Industries, 2018,44(9):117-124.(in Chinese)

[14] WANG D W, WANG Y, LAN H B, et al. Enhanced production of γ-aminobutyric acid in litchi juice fermented by *Lactobacillus plantarum* HU-C2W[J]. Food Bioscience, 2021,42:101155.

[15] ZHANG Q, SUN Q, TAN X, et al. Characterization of γ-aminobutyric acid (GABA)-producing *Saccharomyces cerevisiae* and coculture with *Lactobacillus plantarum* for mulberry beverage brewing[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering,2020,129(4):447-453.

[16] SUN S Y, GONG H S, LIU W L, et al. Application and validation of autochthonous *Lactobacillus plantarum* starter cultures for controlled malolactic fermentation and its influence on the aromatic profile of cherry wines[J]. Food Microbiology,2016,55:16-24.

[17] DE SOUSA A S B, DA SILVA M C A, LIMA R P, et al. Phenolic compounds and antioxidant activity as discriminating markers and adding value of mango varieties[J]. Scientia Horticulturae,2021,287:110259.

[18] DAMSUD T, TEDPHUM T, SUKKRONG C. Alternative protein-enriched food matrices with concentrated ripe mango (*Mangifera indica* L.) bioflavonoids for topical applications[J]. Materials Today:Proceedings,2021,43:2525-2530.

[19] MARÇAL S, PINTADO M. Mango peels as food ingredient/additive: nutritional value, processing, safety and applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021,114:472-489.

[20] KLUPCZYNSKA A, PLEWA S, SYTEK N, et al. A study of low-molecular-weight organic acid urinary profiles in prostate cancer by a new liquid chromatography-tandem mass spectrometry method[J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis,2018,159:229-236.

[21] 刘聪. 芒果乳酸菌发酵饮料的研制与营养评价[D]. 天津:天津科技大学,2019.

[22] 康超,刘凤听,刘云芬,等. 不同品种芒果核多酚和黄酮含量及抗氧化活性评价[J]. 食品工业科技,2021,42(20):100-105.
KANG C, LIU F T, LIU Y F, et al. Contents of polyphenols and flavonoids and its antioxidant activity evalution in different kinds of mango kernel seeds[J]. Science and Technology of Food Industry,2021,42(20):100-105.(in Chinese)

[23] 康毅,刘树文. 苹果酸-乳酸发酵过程酒酒球菌碳源代谢分析研究进展[J]. 食品科学,2012,33(19):326-330.
KANG Y, LIU S W. Research progress on carbon metabolism in malolactic fermentation by *Oenococcus oeni*[J]. Food Science,2012,33(19):326-330.(in Chinese)

[24] 王金玲,晏雨辰,李巧月,等. 生物降解柠檬酸及其影响因素的研究进展[J]. 现代食品科技,2022,38(2):347-357,312.
WANG J L, YAN Y C, LI Q Y, et al. Research progress of biodegradable citric acid and its influencing factors[J]. Modern Food Science and Technology,2022,38(2):347-357,312.(in Chinese)

[25] KANNAN N, ARAVINDAN R, VIRUTHAGIRI T. Effect of culture conditions and kinetic studies on extracellular tannase production by *Lactobacillus plantarum* MTCC 1407[J]. Indian Journal of Biotechnology,2011,10(3):321-328.

[26] LI Y, CHEN Y, ZHOU L, et al. MicroTom metabolic network: rewiring tomato metabolic regulatory network throughout the growth cycle[J]. Molecular Plant,2020,13(8):1203-1218.

[27] SOLOPOVA A, VAN TILBURG A Y, FOITO A, et al. Engineering *Lactococcus lactis* for the production of unusual anthocyanins using tea as substrate [J]. Metabolic Engineering,2019,54:160-169.

[28] 吴雨炯,周礼红,方月月,等. 小叶苦丁枝条提取物的植物乳杆菌发酵代谢组分析[J]. 食品与生物技术学报,2023,42(6):104-111.
WU Y T, ZHOU L H, FANG Y Y, et al. Analysis of extracts of *Ligustrum robustum* (Rxob.) blume twigs fermented by *Lactobacillus plantarum* based on metabolomics [J]. Journal of Food Science and Biotechnology,2023,42(6):104-111.(in Chinese)

[29] FILANNINO P, CAVOSKI I, THLIGENE N, et al. Lactic acid fermentation of cactus cladodes (*Opuntia ficus-indica* L.) generates flavonoid derivatives with antioxidant and anti-inflammatory properties[J]. PLoS One,2016,11(5):e0155156.

（责任编辑:闫林红）