

低聚果糖对植物乳杆菌A33发酵酸角汁的影响

吴领凤¹, 韦 双¹, 陈 莹¹, 杜敏杰¹, 刘四新^{2,3}, 王 露^{1,3}, 李从发^{1,3,*}

(1.海南大学食品科学与工程学院, 海南 海口 570228; 2.海南大学理学院, 海南 海口 570228;

3.海南省食品营养与功能食品重点实验室, 海南 海口 570228)

摘 要: 使用植物乳杆菌A33对酸角汁进行发酵, 研究添加低聚果糖(fructooligosaccharides, FOS)对其发酵过程和贮藏期品质的影响。发酵过程中, 添加FOS显著提高了植物乳杆菌A33的产酸能力, 其中乳酸和乙酸的最大产量为3.12 g/L和0.34 g/L, 分别为空白组的2.5倍和9倍; 同时, 添加FOS显著提高了酸角汁中活菌数, 最高达到9.59 (lg(CFU/mL)), 比空白组高约4.3倍; FOS显著提高了酸角汁的总多酚含量和抗氧化能力, 分别提升至156.75 mg/100 mL和37.96 μ mol/100 mL。冷藏期间, 酸角发酵汁中活菌数显著下降, 但FOS组活菌数在28 d后仍维持在 10^6 CFU/mL以上; FOS显著提高了冷藏时发酵汁的抗氧化能力, 在14 d增长到最高的44 μ mol/100 mL。研究发现酸角汁中有90种挥发性成分, 发酵36 h后, 产生了10种新的挥发性物质, 冷藏21 d后, 大多数挥发性成分含量下降, 而酸角特征物质含量较为稳定, 为酸角汁持续提供了独特的风味, 乙酸乙酯含量持续上升, 使酸角发酵汁的风味更清爽。添加FOS进行乳酸发酵可以提升酸角汁的风味、活菌数和抗氧化能力。

关键词: 低聚果糖; 植物乳杆菌; 酸角汁; 发酵; 贮藏期

Effects of Fructooligosaccharides on the Chemical, Microbiological and Antioxidant Properties of Tamarind (*Tamarindus indica* L.) Juice Fermented by *Lactobacillus plantarum* A33

WU Lingfeng¹, WEI Shuang¹, CHEN Ying¹, DU Minjie¹, LIU Sixin^{2,3}, WANG Lu^{1,3}, LI Congfa^{1,3,*}

(1. College of Food Science and Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China;

2. College of Sciences, Hainan University, Haikou 570228, China;

3. Key Laboratory of Food Nutrition and Functional Food of Hainan Province, Haikou 570228, China)

Abstract: In this study, the effects of fructooligosaccharides (FOS) on the chemical, microbiological and antioxidant properties of tamarind juice fermented by *Lactobacillus plantarum* A33 during fermentation and storage were investigated. FOS significantly increased the production of lactic acid and acetic acid during fermentation, with maximum yields of 3.12 and 0.34 g/L, which were 2.5 and 9 times higher than that of the blank group, respectively. FOS significantly increased the viable bacterial count up to 9.59 (lg(CFU/mL)), about 5.3 times higher than those of the blank group, and the total polyphenol content and 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging capacity to 156.75 μ mol/100 mL and 37.96 μ mol Trolox equivalent (TE)/100 mL, respectively. During storage, the viable cell count decreased significantly in the control group, while it remained above 10^6 CFU/mL in the FOS group after 28 d of storage. FOS significantly improved the DPPH radical scavenging capacity of fermented tamarind juice during cold storage, resulting in the highest DPPH radical scavenging capacity of 44 μ mol TE/100 mL on day 14. A total of 90 kinds of volatile components were found in the fruit juice, and 10 kinds of new volatile components were produced after 36 h of fermentation. The contents of most of the volatile components were decreased after 21 days of cold storage, while the content of characteristic substances in the juice was relatively stable, imparting a unique flavor to tamarind juice. The content of ethyl acetate continued to rise, making the flavor more refreshing. Our findings suggested that the flavor, viable cell count and antioxidant capacity of fermented tamarind juice could be improved by adding FOS before inoculation.

Keywords: fructooligosaccharides; *Lactobacillus plantarum*; fermentation; tamarind juice; cold storage

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200601-015

中图分类号: TS201.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2021)04-0122-08

收稿日期: 2020-06-01

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目(31660495; 31760456); 海南省研究生创新科研课题(Hys2018-195)

第一作者简介: 吴领凤(1994—)(ORCID: 0000-0001-9040-7477), 男, 硕士研究生, 研究方向为热带农产品加工。

E-mail: 839225928@qq.com

*通信作者简介: 李从发(1967—)(ORCID: 0000-0002-1034-3133), 男, 教授, 博士, 研究方向为农产品加工及应用微生物技术。E-mail: congfa@hainanu.edu.cn

引文格式:

吴领风, 韦双, 陈莹, 等. 低聚果糖对植物乳杆菌A33发酵酸角汁的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(4): 122-129.
DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200601-015. <http://www.spkx.net.cn>

WU Lingfeng, WEI Shuang, CHEN Ying, et al. Effects of fructooligosaccharides on the chemical, microbiological and antioxidant properties of tamarind (*Tamarindus indica* L.) juice fermented by *Lactobacillus plantarum* A33[J]. Food Science, 2021, 42(4): 122-129. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200601-015. <http://www.spkx.net.cn>

酸角 (*Tamarindus indica* L.) 是原产自热带非洲, 如今在热带、亚热带地区广泛种植的一种常绿乔木^[1]。在中国, 酸角主产于四川、云南、福建、广西和海南等地^[2], 在海南酸角更是三亚市市树, 种植广泛, 产量较大。酸角果肉有多种功效, 如抗痢疾^[3]、抑菌^[4]、抗氧化^[5]等。作为天然高糖高酸的果实, 酸角果肉中酒石酸含量较高, 约为8%~18%^[6], 占总酸量的95%^[7]。在非洲, 酸角果肉被加入草木灰制作成饮料, 广受欢迎^[1]。在我国, 多被作为原料生产混合饮料^[8]和糕点^[9]等。

功能性食品在世界范围内广受关注。中国的功能性食品市场在2012年就被估值246亿元, 其中功能性饮料市场增速最快, 预计在2025年, 功能性饮料将满足40%的总消费需求^[10]。植物基益生菌发酵饮料除了营养成分外, 还含有生物活性化合物, 包括维生素、酚类物质等, 而益生菌 (大多是乳酸菌和双歧杆菌) 可以在人体肠道中定植, 抑制有害微生物的生长, 有利于人体健康^[11]。同时, 益生菌的活菌数对于益生菌饮料非常关键, 根据联合国粮农组织及世界卫生组织的推荐, 只有超过 $10^6 \sim 10^7$ (CFU/mL或CFU/g)^[12], 益生菌才能在人体肠道中发挥积极作用, 保护人体健康。低聚果糖 (fructooligosaccharides, FOS) 作为常见的益生元, 可以有效提高益生菌活力, 并具有难以被人体肠道吸收利用、热量低等特点^[13], 而且甜度与蔗糖相当, 可以用来替换果汁中添加的蔗糖, 而不影响其品质^[14]。将益生菌和益生元结合形成一种合生元产品可以促进益生菌的存活, 并有利于宿主健康^[13]。

本实验以海南酸角汁为原料, 研究FOS对植物乳杆菌在酸角汁发酵和冷藏过程中的影响, 以期对酸角益生菌饮料的生产和酸角的高值化利用提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

植物乳杆菌 (*Lactobacillus plantarum*) A33, 筛选自诺丽自然发酵液, 具有益生菌潜力, 保存于海南大学食品生物技术实验室。

酸角果实 东方黎酸果园林生态有限公司; FOS (>95.0%) 江门市德昂生物科技有限公司; 碳酸钠 (食品级) 河南中源化学有限公司; 氢氧化钠、

浓硫酸、苯酚、碳酸钠、氯化铝、甲醇 (均为分析纯) 广州化学试剂厂; 葡萄糖、福林-酚试剂 (均为分析纯) 北京索莱宝科技有限公司; 水溶性VE (Trolox)、1,1-二苯基-2-三硝基苯胍 (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH) 标准品 美国Sigma公司。

1.2 仪器与设备

PB303-N天平 梅特勒-托利多仪器有限公司; HSS水浴锅 上海博讯实业有限公司; FST-UV-10普力菲尔超纯水机 上海富诗特仪器设备有限公司; HWS-430恒温恒湿培养箱 宁波江南仪器厂; PB-10 pH计 广州市授科仪器科技有限公司; SpectraMAX 190酶标仪 美国Molecular Devices公司; C2030高效液相色谱仪 日本岛津公司; 7890B-5977B气相色谱-质谱联用仪 美国安捷伦公司。

1.3 方法

1.3.1 酸角汁制备

选取未变质的、完整的酸角果实, 去壳去须, 以1:5的比例加入果肉和超纯水, 在80℃浸提2.5 h, 过200目滤布, 然后加入3 mg/mL碳酸钠, 混合均匀, 得到酸角汁。

1.3.2 植物乳杆菌A33发酵酸角汁

将活化的植物乳杆菌A33用灭菌的8.5 mg/mL生理盐水洗涤, 离心后再用生理盐水加至原体积混匀, 过程重复3次得到植物乳杆菌A33的菌悬液。

将制备的酸角汁在80℃水浴加热20 min, 然后冷却至室温, 在无氧条件下加入110 mg/mL FOS, 接种体积分数2%菌悬液 (约为 6×10^7 CFU/mL), 在37℃静置培养。分别在0、12、24、36、48、60、72 h和84 h取样, 待测; 使用不添加FOS的酸角汁作为空白对照。

1.3.3 发酵酸角汁的贮藏实验

将上述发酵36 h的酸角汁放入4℃冷藏, 在0、7、14、21 d和28 d取样, 待测。

1.3.4 活菌数测定

参照GB 4789.35—2016《食品微生物学检验 乳酸菌检验》^[15]。

1.3.5 理化指标的测定

1.3.5.1 总酸

参照GB/T 12456—2008《食品中总酸的测定》^[16]。

1.3.5.2 有机酸

参照魏永赞等^[17]的方法有所修改。标准品溶于水

或提取后的样品直接过0.45 μm 水性滤膜后待测。使用C2030高效液相色谱仪, 配备VWD检测器, 安捷伦C₁₈色谱柱(4.6 mm $\times$ 250 mm, 5 μm)。用磷酸调节二次蒸馏水至pH 2.5, 过0.45 μm 水性滤膜后为流动相A相, 流动相B相为色谱级甲醇。流动相比比例为3%A相, 97%B相, 控制流速0.6 mL/min, 柱温30 $^{\circ}\text{C}$, 进样量10 μL , 检测波长210 nm, 每个样品检测时间为20 min。

1.3.5.3 总糖

使用苯酚-硫酸法^[18]测定。

1.3.5.4 还原糖

使用3,5-二硝基水杨酸比色法^[19]测定。

1.3.5.5 总多酚

使用福林-酚法测定^[20]。以没食子酸为标准品, 结果以没食子酸当量表示。

1.3.5.6 DPPH自由基清除能力

参照Bei Qi等^[21]的方法测定, 表征抗氧化能力, 结果以Trolox当量表示。

1.3.6 挥发性成分测定

使用7890B-5977B气相色谱-质谱联用仪进行测定。

色谱条件: 色谱柱: DB-wax (30 m $\times$ 0.25 mm, 0.25 μm); 进样量: 取2 mL样本分别置于顶空瓶中, 加入300 ng内标(2-甲基-3-庚酮); 进样温度260 $^{\circ}\text{C}$; 分流比5:1; 载气: 氦气(99.999%); 流量1 mL/min; 柱温40 $^{\circ}\text{C}$ 保持5 min, 以5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至220 $^{\circ}\text{C}$, 以20 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至250 $^{\circ}\text{C}$, 保持2.5 min; 接口温度260 $^{\circ}\text{C}$ 。

质谱条件: 离子源温度230 $^{\circ}\text{C}$; 四极杆温度150 $^{\circ}\text{C}$; 电离方式: 电子电离, 正离子模式, 70 eV; 扫描方式为全扫描; 质量范围20~400; NIST 2011谱库。

固相微萃取条件: CTC三位一体自动进样器; 萃取头: 65 μm PDMS/DVB, 1 cm; 温度50 $^{\circ}\text{C}$; 振荡时间15 min; 萃取时间30 min; 振荡速率250 r/min; 解吸时间5 min; GC循环时间50 min。

1.4 数据处理和统计分析

每个实验设置3个重复。使用Office Excel 2019进行数据处理, 使用SPSS 25进行单因素方差分析(ANOVA), 方法为Duncan多重范围检验, 作图使用Origin 9.1。

2 结果与分析

2.1 酸角汁发酵过程中主要成分和乳酸菌的变化

2.1.1 酸角汁发酵过程中糖分的变化

如表1所示, 发酵84 h后, 总糖含量下降, 与空白组相比, FOS组在发酵中消耗了更多的糖。但还原糖的变化呈现很大的差异。从发酵开始至第24小时, FOS组中还原糖的质量浓度有少许下降, 但之后至发酵结束, 则

一直呈现上升趋势。这可能是因为酸角汁本身含约50 g/L葡萄糖和果糖, 植物乳杆菌A33在发酵初期以消耗酸角汁中所含的葡萄糖和果糖为主, 而在发酵24 h后FOS分解所产生的果糖质量浓度大于被消耗的还原糖质量浓度, 直至发酵结束。而对于空白组, 发酵过程中还原糖和总糖的下降趋势相似, 分别下降了13.36、15.36 g/L, 二者比较接近, 说明空白组还原糖是植物乳杆菌A33的主要糖源。

表1 酸角汁发酵过程中糖质量浓度的变化

Table 1 Changes in sugar concentrations during tamarind juice fermentation by *L. plantarum* A33

发酵时间/h	FOS组糖质量浓度/(g/L)		空白组糖质量浓度/(g/L)	
	总糖	还原糖	总糖	还原糖
0	209.30 $\pm$ 10.19 ^d	52.26 $\pm$ 2.53 ^{ab}	61.07 $\pm$ 7.91 ^c	49.75 $\pm$ 0.78 ^c
12	204.54 $\pm$ 2.65 ^d	50.35 $\pm$ 1.62 ^{ab}	55.86 $\pm$ 3.58 ^{bc}	45.86 $\pm$ 1.57 ^d
24	170.00 $\pm$ 19.70 ^c	48.59 $\pm$ 1.48 ^a	52.39 $\pm$ 2.69 ^{ab}	42.08 $\pm$ 0.73 ^c
36	166.14 $\pm$ 16.58 ^{bc}	54.54 $\pm$ 1.67 ^b	50.65 $\pm$ 0.95 ^{ab}	40.65 $\pm$ 0.63 ^c
48	148.22 $\pm$ 9.79 ^{ab}	53.06 $\pm$ 5.84 ^{ab}	50.97 $\pm$ 0.99 ^{ab}	38.49 $\pm$ 0.58 ^b
60	150.21 $\pm$ 8.24 ^{abc}	50.62 $\pm$ 1.25 ^{ab}	49.55 $\pm$ 2.69 ^{ab}	37.47 $\pm$ 0.68 ^{ab}
72	153.63 $\pm$ 1.85 ^{abc}	60.71 $\pm$ 2.29 ^c	47.81 $\pm$ 1.25 ^a	36.63 $\pm$ 0.78 ^a
84	144.69 $\pm$ 8.03 ^a	64.12 $\pm$ 4.57 ^c	46.71 $\pm$ 0.72 ^a	36.39 $\pm$ 0.63 ^a

注: 同列不同肩标字母表示差异显著($P<0.05$), 下同。

2.1.2 酸角汁发酵过程中有机酸的变化

表2 酸角汁发酵过程中有机酸质量浓度的变化

Table 2 Changes in organic acid concentrations during tamarind juice fermentation by *L. plantarum* A33

时间/h	FOS组有机酸质量浓度/(g/L)				空白组有机酸质量浓度/(g/L)			
	酒石酸	草酸	乳酸	乙酸	酒石酸	草酸	乳酸	乙酸
0	16.32 $\pm$ 0.85 ^d	2.90 $\pm$ 0.14 ^{cd}	0.00 $\pm$ 0.00 ^a	0.15 $\pm$ 0.03 ^a	15.01 $\pm$ 1.67 ^c	2.97 $\pm$ 0.12 ^a	0.00 $\pm$ 0.00 ^a	0.13 $\pm$ 0.01 ^a
12	14.17 $\pm$ 0.38 ^{ab}	2.84 $\pm$ 0.28 ^d	2.16 $\pm$ 0.18 ^b	0.33 $\pm$ 0.08 ^b	13.80 $\pm$ 0.95 ^c	3.02 $\pm$ 0.44 ^a	0.60 $\pm$ 0.06 ^b	0.15 $\pm$ 0.01 ^b
24	13.87 $\pm$ 0.72 ^b	3.06 $\pm$ 0.22 ^{cd}	2.23 $\pm$ 0.35 ^b	0.45 $\pm$ 0.03 ^{bc}	14.71 $\pm$ 1.44 ^c	3.39 $\pm$ 0.53 ^a	0.83 $\pm$ 0.20 ^c	0.17 $\pm$ 0.01 ^c
36	13.55 $\pm$ 0.80 ^b	3.00 $\pm$ 0.14 ^{cd}	2.46 $\pm$ 0.17 ^b	0.44 $\pm$ 0.00 ^{bc}	15.24 $\pm$ 1.52 ^c	2.92 $\pm$ 0.16 ^a	1.01 $\pm$ 0.18 ^{cd}	0.17 $\pm$ 0.01 ^c
48	13.55 $\pm$ 2.27 ^b	3.11 $\pm$ 0.40 ^{cd}	2.65 $\pm$ 0.42 ^{bc}	0.47 $\pm$ 0.06 ^c	14.37 $\pm$ 0.88 ^c	3.15 $\pm$ 0.31 ^a	1.10 $\pm$ 0.19 ^{cd}	0.17 $\pm$ 0.00 ^c
60	14.89 $\pm$ 1.77 ^b	3.42 $\pm$ 0.42 ^b	3.06 $\pm$ 0.33 ^a	0.51 $\pm$ 0.06 ^c	14.06 $\pm$ 2.96 ^c	3.07 $\pm$ 0.17 ^a	1.31 $\pm$ 0.09 ^d	0.17 $\pm$ 0.01 ^c
72	14.43 $\pm$ 0.697 ^b	3.35 $\pm$ 0.21 ^{bc}	3.12 $\pm$ 0.22 ^c	0.49 $\pm$ 0.04 ^c	14.37 $\pm$ 0.39 ^c	3.28 $\pm$ 0.19 ^a	1.21 $\pm$ 0.06 ^{cd}	0.17 $\pm$ 0.00 ^c
84	15.85 $\pm$ 0.76 ^b	3.38 $\pm$ 0.11 ^{bc}	3.08 $\pm$ 0.32 ^c	0.45 $\pm$ 0.06 ^c	15.07 $\pm$ 1.45 ^c	2.96 $\pm$ 0.24 ^a	1.21 $\pm$ 0.07 ^{cd}	0.18 $\pm$ 0.00 ^c

如表2所示, 酸角汁中酒石酸和草酸的含量较高, 这也是酸角果肉的特点。发酵过程中, FOS组和空白组中的2种物质质量浓度呈动态变化, FOS组分别在13.5~16.3 g/L和2.8~3.4 g/L之间波动。

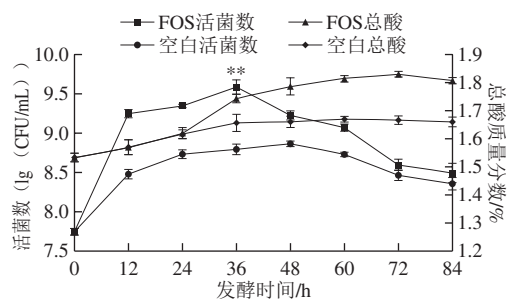
浸提的酸角汁中未检出乳酸, 但在发酵过程中, 乳酸含量增长明显。空白组中, 乳酸质量浓度在60 h后达到最高, 为1.31 g/L; 而FOS组中, 乳酸在发酵72 h后达到最高, 为3.12 g/L, 增长量约为空白组的2.5倍。

酸角汁本来含有少量乙酸, 发酵过程中, 空白组中的乙酸质量浓度从0 h的0.13 g/L增加到24 h的0.17 g/L, 变化不大; 但是在FOS组中, 乙酸质量浓度在发酵60 h达到最高, 为0.51 g/L, 乙酸的增长量约为空白组的9倍。根据陈臣^[22]报道, FOS会诱导植物乳杆菌ST-III中与乙酸合成相关的基因上调, 使代谢产物乙酸含量变高, 同

时,植物乳杆菌在好氧及葡萄糖限制的情况下,会将乳酸转化为乙酸等代谢产物,也就是进行兼性异型乳酸发酵,这可能是酸角汁中乙酸含量上升的原因。

上述结果显示,添加FOS显著提高了植物乳杆菌A33产生乳酸和乙酸的能力。Freire等^[23]也发现,在添加5% FOS后,植物乳杆菌在玉米和米浆中主要产生的有机酸是乳酸和乙酸,质量浓度分别为3.70 g/L和0.50 g/L。

2.1.3 酸角汁发酵过程中总酸和活菌数的变化



**表示FOS组与空白组活菌数有极显著差异, $P < 0.01$ 。图3同。

图1 酸角汁发酵过程中活菌数和总酸的变化

Fig. 1 Changes in viable cell count and total acidity during fermentation of tamarind juice by *L. plantarum* A33

由图1可知,空白组总酸的变化较为平缓,从发酵前的1.53%增长到36 h的1.67%,随后变化很小,趋于稳定。FOS组中,总酸含量从开始至72 h持续上升,在72 h达到最高值,然后稍有下降。

空白组中活菌数在0~12 h快速增加,在48 h后达到最高,为8.86 (lg (CFU/mL))。FOS组活菌数在0~12 h增加迅速,增速明显高于空白组,在36 h时达到最高,为9.59 (lg (CFU/mL)),显著高于空白组;但之后乳酸菌活菌数下降明显,在84 h时降至最低,但此时活菌数仍然高于空白组。这表明,即使是在总酸明显高于空白组的情况下,添加FOS仍有助于促进植物乳杆菌A33的生长,并对其有一定的保护作用。

李达等^[24]研究复合益生菌发酵果蔬饮料时也发现,发酵前期饮料总酸持续增长,活菌数在发酵前期增长较快,而后开始下降。本研究中,空白组的活菌数变化曲线较为平滑,在48 h达到峰值。但添加FOS发酵12~24 h时,活菌数增速减慢,此时,总酸的含量变化也比较平缓。而由表1和图1也可以看出,FOS组中,24~36 h FOS被消耗得更快,且总酸提升较快,说明植物乳杆菌A33可能在此期间活力增强。Chen Chen等^[25]研究发现,在葡萄糖和FOS同时存在时,植物乳杆菌会率先利用葡萄糖,在葡萄糖耗竭后,开始利用FOS,此时会出现短期的停滞期,这和本研究中FOS组12~24 h的活菌数变化情况相似。

2.1.4 酸角汁发酵过程中多酚及抗氧化能力的变化

如图2所示,空白组中,总酚含量和抗氧化能力在发酵过程中没有显著变化 ($P > 0.05$)。FOS组中,在发酵

36 h和48 h时,总酚含量和抗氧化能力分别达到最高,分别为156.75 mg/100 mL和37.96 $\mu\text{mol}/100\text{ mL}$,均显著高于空白组。图1显示,FOS组中,12~60 h,乳酸菌活菌数显著高于空白组。这说明,添加FOS,活菌数和抗氧化能力均显著增加 ($P < 0.05$),这可能是因为乳酸菌可以利用果汁中的结合态酚类物质中的糖苷,使得果汁中游离酚类物质含量升高,从而提高了果汁的抗氧化能力^[26]。

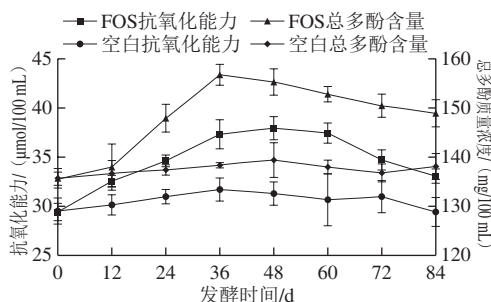


图2 酸角汁发酵过程中总酚含量和抗氧化能力的变化

Fig. 2 Changes in total phenolic content and antioxidant activity during fermentation of tamarind juice by *L. plantarum* A33

但是,在发酵72 h后,酸角汁中总酚含量和抗氧化能力都显著下降。王益莉等^[27]在对苹果酵素的研究中也发现,在发酵28 h后,酵素DPPH自由基清除能力开始下降,而总多酚含量则是在48~60 h下降,这也与FOS组中的情况类似,说明过度发酵会导致酚类物质的降解及果汁抗氧化能力的下降。

2.2 酸角发酵汁在冷藏期的变化

2.2.1 活菌数的变化

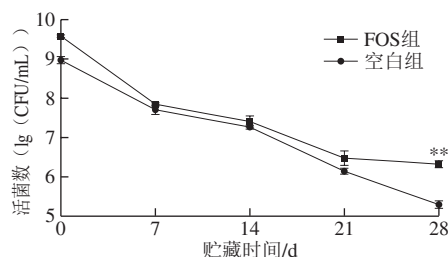


图3 冷藏期间酸角果汁中活菌数变化

Fig. 3 Change in viable cell count of fermented tamarind juice during cold storage

由图3可知,在冷藏期间,FOS组和空白组的活菌数的变化趋势相近,在0~7 d下降最为迅速,而在7~14 d,活菌数持续下降,但是有所缓和;14~21 d,2组活菌数继续迅速下降;但在21~28 d期间,FOS组的活菌数变化较小,在28 d时为6.35 (lg (CFU/mL)),而空白组活菌数下降到 10^6 CFU/mL以下。这说明冷藏21 d内,与空白组相比,添加FOS没有提高乳酸菌活菌数。Amanda等^[28]发现,在西瓜汁中添加FOS和菊粉,对植物乳杆菌在发酵和冷藏时的过程中的活菌数都没有显

著影响。这说明即使在糖源充足的情况下，乳酸菌在冷藏条件下也难以维持高活菌数，这可能是因为酸角汁本身的pH值较低，抑制了乳酸菌的生长。嗜酸乳杆菌在以大米和黄豆为基质的冷藏过程中，也被发现在21 d后活菌数低于 10^6 CFU/mL^[23]。

2.2.2 总多酚和抗氧化能力的变化

表3 酸角汁在冷藏期间总多酚含量和抗氧化能力的变化
Table 3 Changes in total phenolic content and antioxidant activity of fermented tamarind juice during cold storage

时间/d	FOS组		空白组	
	总多酚/ (mg/100 mL)	抗氧化能力/ (μ mol/100 mL)	总多酚/ (mg/100 mL)	抗氧化能力/ (μ mol/100 mL)
0	161.39 $\pm$ 5.97 ^a	37.34 $\pm$ 1.47 ^a	139.03 $\pm$ 1.33 ^a	31.71 $\pm$ 1.18 ^a
7	154.46 $\pm$ 9.05 ^a	40.98 $\pm$ 1.62 ^b	140.99 $\pm$ 2.41 ^a	34.42 $\pm$ 2.06 ^a
14	156.94 $\pm$ 4.01 ^a	44.42 $\pm$ 0.59 ^b	139.03 $\pm$ 2.68 ^a	34.63 $\pm$ 1.18 ^a
21	173.81 $\pm$ 10.71 ^a	43.27 $\pm$ 1.92 ^b	139.68 $\pm$ 2.72 ^a	35.05 $\pm$ 2.06 ^a
28	154.85 $\pm$ 11.95 ^a	40.77 $\pm$ 0.74 ^{ab}	138.90 $\pm$ 2.01 ^a	32.75 $\pm$ 1.18 ^a

如表3所示，空白组中的总多酚和抗氧化能力变化不显著（ $P>0.05$ ），乳酸菌的缓慢发酵可以将发酵汁抗氧化能力维持在34 μ mol/100 mL左右；而FOS组中，发酵汁抗氧化能力的变化趋势与总多酚含量变化趋势接近，FOS组在冷藏14 d后抗氧化能力达到最高，约为44 μ mol/100 mL，而28 d下降到40.77 μ mol/100 mL。

2.3 酸角汁及其在发酵和贮藏过程中挥发性成分的变化

酸角汁添加FOS经植物乳杆菌发酵后，从发酵汁中共检出100种挥发性成分，其中有17种酯类、18种酸类、28种醇类、7种烷类、15种酮类、11种醛类和4种其他物质；这比发酵前多出了1种酯类、3种醇类、2种酮类、2种醛类和2种其他物质。而在冷藏21 d后，挥发性成分种类数目没有改变，但是大多数含量都有所下降。

表4 酸角汁及其在发酵和贮藏过程中挥发性成分的变化
Table 4 Changes in volatile components of fermented tamarind juice before and after fermentation for 21 days

种类	保留时间/min	挥发性成分	质量浓度/（ μ g/L）		
			酸角汁	36 h酸角发酵汁	21 d冷藏发酵汁
酯类 (17种)	2.54	甲酸乙酯	1.53 $\pm$ 0.02 ^c	0.02 $\pm$ 0.01 ^a	1.04 $\pm$ 0.04 ^b
	2.57	乙酸甲酯	19.26 $\pm$ 2.58 ^a	28.35 $\pm$ 12.33 ^b	27.76 $\pm$ 1.05 ^b
	3.14	乙酸乙酯	62.87 $\pm$ 9.14 ^a	248.08 $\pm$ 13.87 ^b	388.09 $\pm$ 55.31 ^c
	3.40	乙氧基乙酸乙酯	1.15 $\pm$ 0.92 ^a	1.44 $\pm$ 0.68 ^a	0.90 $\pm$ 0.24 ^a
	4.31	丙酸乙酯	4.45 $\pm$ 0.26 ^a	3.52 $\pm$ 0.02 ^a	5.28 $\pm$ 0.44 ^a
	5.01	醋酸仲丁酯	0.44 $\pm$ 0.11 ^a	0.63 $\pm$ 0.41 ^a	0.49 $\pm$ 0.00 ^a
	5.73	乙酸异丁酯	1.46 $\pm$ 0.10 ^a	1.44 $\pm$ 0.05 ^a	1.47 $\pm$ 0.56 ^a
	6.44	丁酸乙酯	0.37 $\pm$ 0.04 ^b	0.02 $\pm$ 0.01 ^a	0.37 $\pm$ 0.03 ^b
	7.54	乙酸丁酯	2.33 $\pm$ 0.01 ^a	2.35 $\pm$ 0.87 ^a	2.37 $\pm$ 0.18 ^a
	10.59	2-丙烯酸丁酯	0.69 $\pm$ 0.14 ^b	1.35 $\pm$ 0.84 ^b	0.02 $\pm$ 0.00 ^a
	10.64	甲酸丁酯	2.02 $\pm$ 0.28 ^a	5.56 $\pm$ 1.88 ^b	4.69 $\pm$ 0.86 ^b
	15.54	草酸烯丙基庚酯	—	0.83 $\pm$ 0.02 ^a	0.66 $\pm$ 0.09 ^a
	19.02	2-甲基-2-甲基-2-丙烯基丁酸酯	2.26 $\pm$ 0.17 ^a	2.48 $\pm$ 2.13 ^a	2.06 $\pm$ 0.14 ^a
	26.59	水杨酸甲酯	0.82 $\pm$ 0.09 ^a	1.16 $\pm$ 0.74 ^a	1.01 $\pm$ 0.10 ^a
	28.73	2-甲基-2-乙基-3-羟基己基丙酸酯	0.58 $\pm$ 0.06 ^a	1.02 $\pm$ 0.58 ^a	0.73 $\pm$ 0.11 ^a

续表4

种类	保留时间/min	挥发性成分	质量浓度/（ μ g/L）		
			酸角汁	36 h酸角发酵汁	21 d冷藏发酵汁
酸类 (18种)	41.02	1,2-苯二甲酸双(2-甲基丙基)酯	0.64 $\pm$ 0.04 ^a	0.76 $\pm$ 0.68 ^a	0.90 $\pm$ 0.05 ^a
	42.84	邻苯二甲酸二丁酯	3.39 $\pm$ 0.26 ^a	4.23 $\pm$ 3.22 ^b	4.72 $\pm$ 0.16 ^b
		酯类总和	104.28 $\pm$ 14.22 ^a	303.24 $\pm$ 33.19 ^b	442.56 $\pm$ 59.34 ^c
	1.63	肌氨酸	66.51 $\pm$ 6.17 ^a	138.69 $\pm$ 30.06 ^b	75.53 $\pm$ 2.82 ^a
	2.16	丝氨酸	0.01 $\pm$ 0.00 ^a	0.33 $\pm$ 0.16 ^b	0.31 $\pm$ 0.13 ^a
	9.04	2-羟基-2-甲基丙酸	0.83 $\pm$ 0.42 ^a	1.06 $\pm$ 0.42 ^a	0.59 $\pm$ 0.15 ^a
	15.52	L-半胱氨酸	0.37 $\pm$ 0.01 ^b	0.02 $\pm$ 0.01 ^a	0.36 $\pm$ 0.04 ^b
	16.11	胞壁酸	1.43 $\pm$ 0.14 ^a	6.77 $\pm$ 2.43 ^b	5.99 $\pm$ 1.57 ^b
	18.78	顺式-亚麻酸	0.03 $\pm$ 0.00 ^a	1.99 $\pm$ 0.71 ^b	1.70 $\pm$ 0.08 ^b
	18.82	亚甲基丁二酸	0.01 $\pm$ 0.00 ^a	0.47 $\pm$ 0.07 ^b	0.57 $\pm$ 0.13 ^b
	18.91	乙酸	91.02 $\pm$ 0.93 ^a	349.60 $\pm$ 92.13 ^b	287.59 $\pm$ 14.62 ^b
	21.24	丙酸	6.64 $\pm$ 1.60 ^b	14.33 $\pm$ 5.39 ^c	2.93 $\pm$ 0.31 ^a
	22.07	2-甲基丙酸	0.95 $\pm$ 0.02 ^a	2.61 $\pm$ 1.02 ^c	1.34 $\pm$ 0.03 ^b
	23.41	α -羟基异丙酸	1.84 $\pm$ 0.56 ^a	1.74 $\pm$ 0.82 ^a	1.37 $\pm$ 0.16 ^a
	23.49	丁酸	1.29 $\pm$ 0.17 ^b	3.98 $\pm$ 1.19 ^c	0.02 $\pm$ 0.00 ^a
	26.03	戊酸	1.55 $\pm$ 0.90 ^a	5.18 $\pm$ 1.64 ^b	1.97 $\pm$ 0.23 ^a
	28.07	7-羟基香豆素-3-羧酸	0.34 $\pm$ 0.06 ^a	0.69 $\pm$ 0.13 ^b	0.33 $\pm$ 0.11 ^a
	28.36	己酸	9.20 $\pm$ 0.25 ^b	15.88 $\pm$ 1.76 ^c	6.35 $\pm$ 0.23 ^a
	30.56	2-乙基己酸	0.47 $\pm$ 0.04 ^a	2.28 $\pm$ 1.54 ^c	0.02 $\pm$ 0.00 ^a
	32.74	辛酸	3.17 $\pm$ 0.43 ^a	7.99 $\pm$ 1.83 ^c	4.63 $\pm$ 0.42 ^b
	34.75	壬酸	6.25 $\pm$ 0.50 ^a	16.59 $\pm$ 3.40 ^c	7.16 $\pm$ 0.05 ^b
		酸类总和	191.91 $\pm$ 12.20 ^a	570.19 $\pm$ 144.71 ^c	398.75 $\pm$ 21.08 ^b
醇类 (28种)	3.96	乙醇	92.68 $\pm$ 30.74 ^a	164.63 $\pm$ 10.77 ^b	162.15 $\pm$ 28.67 ^b
	6.64	正丙醇	3.12 $\pm$ 0.14 ^a	3.85 $\pm$ 1.13 ^a	4.08 $\pm$ 0.26 ^a
	6.93	5-甲基-2-己醇	0.11 $\pm$ 0.01 ^a	0.26 $\pm$ 0.04 ^a	0.18 $\pm$ 0.02 ^a
	8.67	2-甲基-1-丙醇	8.24 $\pm$ 0.36 ^a	8.89 $\pm$ 3.48 ^a	10.84 $\pm$ 0.51 ^a
	9.01	乙酸-3-甲基-1-丁醇	3.62 $\pm$ 0.07 ^a	0.64 $\pm$ 0.19 ^a	3.03 $\pm$ 0.14 ^b
	9.25	二甲基苯乙基甲醇	0.68 $\pm$ 0.11 ^a	0.84 $\pm$ 0.33 ^a	0.51 $\pm$ 0.03 ^a
	9.79	2-戊醇	0.46 $\pm$ 0.18 ^a	0.54 $\pm$ 0.27 ^a	0.48 $\pm$ 0.18 ^a
	10.12	五丙二醇	0.41 $\pm$ 0.19 ^b	0.02 $\pm$ 0.01 ^a	0.25 $\pm$ 0.04 ^b
	11.78	1,2-丙二醇	0.03 $\pm$ 0.00 ^a	2.75 $\pm$ 0.96 ^b	3.76 $\pm$ 0.04 ^b
	13.50	正戊醇	0.67 $\pm$ 0.03 ^a	1.76 $\pm$ 0.57 ^b	1.51 $\pm$ 0.09 ^b
	13.57	3-甲基-3-丁烯-1-醇	0.14 $\pm$ 0.18 ^a	41.40 $\pm$ 15.39 ^b	32.28 $\pm$ 1.40 ^b
	14.58	甲基乙醚甲醇	2.07 $\pm$ 0.07 ^a	49.81 $\pm$ 3.21 ^b	40.84 $\pm$ 2.44 ^b
	14.82	3-庚醇	0.55 $\pm$ 0.05 ^a	1.05 $\pm$ 1.13 ^b	0.51 $\pm$ 0.04 ^a
	16.11	2-乙氧基-乙醇	—	0.61 $\pm$ 0.34 ^a	0.44 $\pm$ 0.07 ^a
	16.47	正己醇	3.85 $\pm$ 0.17 ^a	10.08 $\pm$ 3.30 ^b	9.12 $\pm$ 0.29 ^b
	16.74	2-乙基-2-甲基-1,3-丙二醇	0.26 $\pm$ 0.01 ^a	0.35 $\pm$ 0.10 ^a	0.23 $\pm$ 0.07 ^a
	17.29	3-己烯-1-醇	—	5.59 $\pm$ 2.14 ^a	4.53 $\pm$ 0.02 ^a
	19.19	1-庚醇	1.45 $\pm$ 0.06 ^a	3.71 $\pm$ 1.35 ^b	2.94 $\pm$ 0.16 ^b
	19.48	2,3-二甲基-5-己烷-3-醇	0.01 $\pm$ 0.00 ^a	0.90 $\pm$ 0.38 ^b	0.65 $\pm$ 0.03 ^b
	20.15	2-甲氧基-乙醇	0.50 $\pm$ 0.04 ^a	1.37 $\pm$ 0.54 ^b	0.95 $\pm$ 0.11 ^b
	20.83	2-壬醇	—	0.82 $\pm$ 0.26 ^a	0.70 $\pm$ 0.06 ^a
	21.48	芳樟醇	0.86 $\pm$ 0.05 ^a	1.05 $\pm$ 0.43 ^a	1.03 $\pm$ 0.02 ^a
	23.15	6-甲基-1-庚醇	0.93 $\pm$ 0.05 ^b	0.61 $\pm$ 0.07 ^a	0.61 $\pm$ 0.10 ^a
	24.67	3,4-二羟基苯乙二醇	4.93 $\pm$ 0.91 ^a	10.52 $\pm$ 2.98 ^b	5.31 $\pm$ 0.41 ^a
烷类 (7种)	25.02	松油醇	0.62 $\pm$ 0.00 ^a	0.84 $\pm$ 0.06 ^b	0.68 $\pm$ 0.03 ^a
	27.69	雌三烯醇	0.36 $\pm$ 0.02 ^a	0.34 $\pm$ 0.01 ^a	0.52 $\pm$ 0.01 ^b
	29.07	1,2,4-丁三醇	1.48 $\pm$ 0.05 ^a	2.22 $\pm$ 0.42 ^b	1.42 $\pm$ 0.00 ^a
	29.63	苯乙醇	5.16 $\pm$ 0.26 ^a	15.65 $\pm$ 4.15 ^b	14.70 $\pm$ 1.18 ^b
		醇类总和	133.24 $\pm$ 33.76 ^a	331.10 $\pm$ 53.98 ^b	304.25 $\pm$ 36.46 ^b
	5.68	八甲基环四硅氧烷	7.25 $\pm$ 1.19 ^a	13.03 $\pm$ 2.11 ^b	7.43 $\pm$ 0.07 ^a
	6.47	4,7-二甲基十一烷	1.39 $\pm$ 0.05 ^a	2.80 $\pm$ 0.31 ^b	2.28 $\pm$ 0.37 ^b
	8.53	十甲基四环氧烷	2.54 $\pm$ 0.58 ^a	2.40 $\pm$ 0.74 ^a	1.93 $\pm$ 0.18 ^a

续表4

种类	保留时间/min	挥发性成分	质量浓度/($\mu\text{g/L}$)		
			酸角汁	36 h酸角发酵汁	21 d冷藏发酵汁
醇类 (15种)	14.32	十三烷	8.14 $\pm$ 1.84 ^a	10.89 $\pm$ 3.47 ^a	10.05 $\pm$ 1.63 ^a
	16.44	3-甲基十三烷	0.35 $\pm$ 0.08 ^a	1.17 $\pm$ 0.09 ^b	1.11 $\pm$ 0.22 ^b
	17.41	十四烷	6.37 $\pm$ 0.98 ^a	10.29 $\pm$ 5.01 ^a	6.16 $\pm$ 0.81 ^a
	30.27	四甲基硅烷	0.25 $\pm$ 0.06 ^a	0.28 $\pm$ 0.05 ^a	0.26 $\pm$ 0.02 ^a
		烷类总和	26.28 $\pm$ 4.77 ^a	40.87 $\pm$ 11.79 ^a	29.21 $\pm$ 3.30 ^a
	2.47	丙酮	5.87 $\pm$ 1.45 ^a	14.25 $\pm$ 5.90 ^a	8.71 $\pm$ 0.59 ^b
	4.71	2-戊酮	16.14 $\pm$ 3.32 ^a	62.64 $\pm$ 11.94 ^a	36.68 $\pm$ 3.26 ^a
	5.49	甲基异丁基酮	2.99 $\pm$ 1.21 ^a	4.08 $\pm$ 1.72 ^a	2.29 $\pm$ 0.39 ^a
	7.13	2-甲基-3-戊酮	0.36 $\pm$ 0.01 ^a	1.22 $\pm$ 0.50 ^b	0.85 $\pm$ 0.01 ^b
	10.89	2-庚酮	0.41 $\pm$ 0.01 ^a	19.54 $\pm$ 2.73 ^c	11.98 $\pm$ 0.73 ^b
	14.15	4-甲基-2-己酮	0.62 $\pm$ 0.13 ^a	0.72 $\pm$ 0.20 ^a	0.61 $\pm$ 0.09 ^a
	14.86	1-羟基-2-丙酮	0.01 $\pm$ 0.00 ^a	19.72 $\pm$ 2.40 ^c	12.42 $\pm$ 0.80 ^b
	15.75	6-甲基-5-庚烷-2-酮	2.57 $\pm$ 0.26 ^a	2.53 $\pm$ 1.00 ^a	2.76 $\pm$ 0.56 ^a
	17.18	2-壬酮	0.64 $\pm$ 0.02 ^a	12.01 $\pm$ 1.89 ^c	7.36 $\pm$ 0.30 ^b
	17.18	3-(羟甲基)-2-壬酮	—	1.03 $\pm$ 0.33 ^b	0.52 $\pm$ 0.01 ^a
醛类 (11种)	18.29	5-甲基-2(3H)-呋喃酮	1.99 $\pm$ 0.10 ^a	2.13 $\pm$ 0.92 ^a	1.39 $\pm$ 0.07 ^a
	20.24	1-(2-呋喃基)乙酮	0.37 $\pm$ 0.03 ^a	0.37 $\pm$ 0.01 ^a	0.44 $\pm$ 0.03 ^a
	22.18	4-环戊烯-1,3-二酮	0.52 $\pm$ 0.09 ^a	0.68 $\pm$ 0.26 ^a	0.54 $\pm$ 0.10 ^a
	27.46	2-八酮	0.30 $\pm$ 0.06 ^a	2.55 $\pm$ 0.72 ^a	1.71 $\pm$ 0.22 ^b
	31.91	二氢-5-丙基-2(3H)-呋喃酮	—	0.65 $\pm$ 0.17 ^b	0.02 $\pm$ 0.00 ^a
		酮类总和	32.83 $\pm$ 6.71 ^a	144.11 $\pm$ 30.69 ^c	88.28 $\pm$ 7.18 ^b
	1.95	乙醛	—	10.53 $\pm$ 2.18 ^a	17.53 $\pm$ 2.92 ^b
	3.47	2-甲基丁醛	3.04 $\pm$ 0.12 ^b	0.69 $\pm$ 0.22 ^a	0.61 $\pm$ 0.12 ^a
	3.54	3-甲基丁醛	5.57 $\pm$ 0.49 ^b	0.73 $\pm$ 0.25 ^a	0.83 $\pm$ 0.04 ^a
	7.74	己醛	10.73 $\pm$ 0.72 ^b	2.02 $\pm$ 1.00 ^a	4.05 $\pm$ 0.05 ^b
	10.91	庚醛	3.05 $\pm$ 0.35 ^b	5.37 $\pm$ 0.22 ^a	1.72 $\pm$ 0.39 ^a
	11.60	3-甲基-2-丁烯醛	—	1.11 $\pm$ 0.82 ^a	0.57 $\pm$ 0.25 ^a
	14.20	辛醛	5.69 $\pm$ 0.15 ^b	0.50 $\pm$ 0.15 ^a	0.69 $\pm$ 0.10 ^a
	17.26	壬醛	3.32 $\pm$ 0.52 ^a	2.55 $\pm$ 0.91 ^a	2.23 $\pm$ 0.10 ^a
	19.16	糠醛	21.85 $\pm$ 0.81 ^a	25.90 $\pm$ 9.18 ^a	22.05 $\pm$ 0.96 ^a
其他类 (4种)	21.22	2,5-二羟基苯甲醛	21.52 $\pm$ 0.89 ^a	25.19 $\pm$ 3.04 ^a	20.01 $\pm$ 1.52 ^a
	40.30	5-羟甲基糠醛	2.91 $\pm$ 0.67 ^b	2.84 $\pm$ 1.34 ^b	1.30 $\pm$ 0.01 ^a
		醛类总和	77.70 $\pm$ 4.73 ^a	77.43 $\pm$ 19.30 ^a	71.57 $\pm$ 6.46 ^a
	15.14	D-木糖	0.29 $\pm$ 0.00 ^a	0.41 $\pm$ 0.27 ^a	0.35 $\pm$ 0.05 ^a
	25.82	甲基壬基醚	—	1.02 $\pm$ 0.38 ^a	0.92 $\pm$ 0.03 ^a
其他类 (4种)	38.48	2,3-二氢苯并呋喃	—	0.48 $\pm$ 0.10 ^a	0.44 $\pm$ 0.00 ^a
	44.65	4,6-二叔丁基间苯二酚	1.51 $\pm$ 0.03 ^a	4.15 $\pm$ 1.16 ^a	2.41 $\pm$ 0.12 ^b
		其他类总和	1.83 $\pm$ 0.03 ^a	6.06 $\pm$ 1.91 ^c	4.12 $\pm$ 0.20 ^b

注：—未检出；同行不同肩标字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。

酯类物质在发酵后，从104.28 $\mu\text{g/L}$ 显著增长到303.24 $\mu\text{g/L}$ ，冷藏后继续升高，达到442.56 $\mu\text{g/L}$ 。乙酸乙酯在发酵后质量浓度显著增加，从62.87 $\mu\text{g/L}$ 增长到248.08 $\mu\text{g/L}$ ，冷藏后持续增长到388.09 $\mu\text{g/L}$ 。乙酸乙酯是发酵后含量最高的物质，且风味阈值较低，气味活性值较高^[29]。

酸类物质在发酵后从191.91 $\mu\text{g/L}$ 增长到570.19 $\mu\text{g/L}$ ，但是在冷藏后下降到了398.75 $\mu\text{g/L}$ 。乙酸质量浓度从91.02 $\mu\text{g/L}$ 增加到349.60 $\mu\text{g/L}$ ，这也与FOS组中36 h发酵后乙酸增长的趋势一致，冷藏21 d后乙酸质量浓度下降到287.56 $\mu\text{g/L}$ 。

醇类物质从133.24 $\mu\text{g/L}$ 显著增长到331.10 $\mu\text{g/L}$ ，冷藏后质量浓度304.25 $\mu\text{g/L}$ 。醇类物质是微生物通过氨基酸代谢产生，乙醇、3-甲基-3-丁烯-1-醇和甲基乙醚甲醇在发酵后质量浓度较大，达到164.63、41.40 $\mu\text{g/L}$ 和49.81 $\mu\text{g/L}$ ；正己醇有果子香气，也在发酵后达到10.08 $\mu\text{g/L}$ ；苯乙醇有玫瑰花香气，在发酵后质量浓度增加近2倍；乙醇赋予了甜味，发酵后质量浓度增长了近10倍，这些含量较高的醇类也改善了酸角果汁的风味。作为鉴定细菌的次级代谢产物，甲基乙醚甲醇在发酵后提高了接近25倍，从2.07 $\mu\text{g/L}$ 增长到49.81 $\mu\text{g/L}$ ，而在冷藏21 d后下降到40.84 $\mu\text{g/L}$ 。说明植物乳杆菌利用葡萄糖生成丙酮酸，又使丙酮酸脱羧形成甲基乙醚甲醇，在冷藏后乳酸菌活力下降，甲基乙醚甲醇含量下降。

烷类物质在发酵和冷藏时质量浓度变化不显著，且质量浓度较少，从26.28 $\mu\text{g/L}$ 增长到40.87 $\mu\text{g/L}$ 又下降到29.21 $\mu\text{g/L}$ 。

酮类物质在发酵后显著增加，从32.83 $\mu\text{g/L}$ 到144.11 $\mu\text{g/L}$ ，冷藏后下降到88.28 $\mu\text{g/L}$ 。大多数酮是由脂肪酸的微生物氧化或脱羧途径产生的，在低质量浓度下，酮类有强烈的味道^[30]。含量较高的2-戊酮、2-庚酮、1-羟基-2-丙酮、2-壬酮的含量在发酵后都有增加，但在冷藏后含量显著下降。

醛类物质在发酵后和冷藏后都并没有显著变化，在70 $\mu\text{g/L}$ 左右；其他物质含量最少，但变化较明显，也是发酵后含量增加，而冷藏后又降低，在10 $\mu\text{g/L}$ 以下。在微生物作用下，醛类物质是不稳定的化合物，容易被还原为醇或被氧化为酸^[31]，这也可能是醛类物质含量不高，而醇类和酸类物质在发酵和冷藏后变化明显的原因。其中，乙醛是发酵后新产生的物质，质量浓度为10.53 $\mu\text{g/L}$ ，较其他新增物质更高，在冷藏后继续增长到了17.53 $\mu\text{g/L}$ 。乙醛是乳酸菌代谢的中间产物，主要由苏氨酸代谢产生，给予了发酵乳制品新鲜清爽的风味^[32]，因为它在较低的质量浓度有水果味。壬醛有明显的油脂气味和甜橙气息，己醛有水果香气及青草和油脂气味^[33]。

总的来说，乙酸乙酯、乙醇和乙酸为发酵酸角汁提供了主要的香气。朱琦等^[34]在酸角挥发油中鉴定和检测出糠醛、5-甲基-2(3H)-呋喃酮、己酸乙酯、5-羟甲基糠醛和顺式亚麻酸等物质；Lasekan等^[35]在对比3种酸角果实的关键香气成分发现，所有酸角果实中均检测出呋喃、芳樟醇、壬醛、醋酸和松油醇等挥发性成分。本研究中，在酸角汁、发酵后果汁和冷藏后果汁均检测出了上述挥发性成分，且含量稳定，说明这些成分是酸角果汁的特征性物质，可能为酸角汁和发酵酸角汁提供了独特的香气。乳酸菌发酵后酸角汁中酯类、醇类和酮类物质相对都有增加，说明乳酸菌利用糖产生了这些代谢产物，丰富了酸角果汁的风味。而冷藏后，多数物质含量

降低,而乙酸乙酯含量持续增加,使酸角乳酸发酵汁的气味变得更清爽,气味更独特。Wei Ming等^[36]在越橘汁的风味成分研究中发现,发酵汁的pH值会影响到风味成分的组成和含量,而酸角果汁发酵后和冷藏后pH值的变化,可能也造成了风味的变化。

3 结 论

添加FOS显著提高了植物乳杆菌A33在酸角汁中的产酸能力,乳酸产量最高达到3.12 g/L,约为空白组的2.5倍;FOS的添加也使植物乳杆菌A33代谢产物乙酸的质量浓度变高,达到0.51 g/L,其增长量约为空白组的9倍;添加FOS显著提高了酸角汁中的活菌数,最高达到9.59 (lg (CFU/mL)),比空白组显著更高 ($P<0.01$);添加FOS提高了酸角汁的总酚含量和抗氧化能力,在36~48 h达到最高。冷藏21 d内,添加FOS在冷藏中对植物乳杆菌A33并没有表现出显著的保护作用 ($P>0.05$),但是在28 d内,添加FOS组中乳酸菌的活菌数都能维持在 10^6 CFU/mL以上;冷藏过程中,添加FOS使果汁的抗氧化能力在21 d后增长到最高的43.27 $\mu\text{mol}/100\text{ mL}$,显著高于空白组 ($P<0.05$)。发酵36 h后,产生了10种新的挥发性物质;冷藏21 d后,挥发性成分大多数含量下降,而酸角特征物质含量较为稳定,为酸角汁持续提供了独特的风味。

参考文献:

- [1] KURU P. Tamarindus indica and its health related effects[J]. Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine, 2014, 4(9): 676-681. DOI:10.12980/apjtb.4.2014apjtb-2014-0173.
- [2] 马天晓,姚顺阳,刘震,等. 酸角研究进展[J]. 中国野生植物资源, 2012, 31(6): 6-11.
- [3] HAVINGA R M, HARTLA, PUTSCHER J, et al. Tamarindus indica L. (Fabaceae): patterns of use in traditional African medicine[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2010, 127(3): 573-588. DOI:10.1016/j.jep.2009.11.028.
- [4] BHADORIYA S S, GANESHPURKAR A, NARWARIA J, et al. Tamarindus indica: extent of explored potential[J]. Pharmacognosy Reviews, 2011, 5(9): 73-81. DOI:10.4103/0973-7847.79102.
- [5] SHARMA R, KAMBOJ S, KHURANA R, et al. Physicochemical and functional performance of pectin extracted by QbD approach from Tamarindus indica L. pulp[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 134(14): 364-374. DOI:10.1016/j.carbpol.2015.07.073.
- [6] 吉宏武,丁霄霖. 罗望子研究进展[J]. 中国野生植物资源, 2000, 19(6): 10-14.
- [7] 瞿文林,马开华,宋子波,等. 酸角种质资源的保护和利用研究进展[J]. 热带作物学报, 2020, 41(1): 202-209.
- [8] 张智宏,程春生,覃宇悦,等. 玫瑰花酸角汁复合饮料的制备[J]. 食品科技, 2013, 38(4): 89-92.
- [9] 曹淼,化志秀,童斌,等. 响应面法优化酸角海绵蛋糕的制作工艺[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(12): 164-169.
- [10] NAZIR M, ARIF S, KHAN R S, et al. Opportunities and challenges for functional and medicinal beverages: current and future trends[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 88(4): 513-526. DOI:10.1016/j.tifs.2019.04.011.
- [11] SANDERS M E, MERENSTEIN D J, REID G, et al. Probiotics and prebiotics in intestinal health and disease: from biology to the clinic[J]. Nature Reviews Gastroenterology Hepatology, 2019, 16(10): 605-616. DOI:10.1038/s41575-019-0173-3.
- [12] Food and Agriculture Organization of the United Nations and World Health Organization. Working group report on drafting guidelines for the evaluation of probiotics in food[R]. London, Ontario, Canada, 2002.
- [13] FONTELES T V, RODRIGUES S. Prebiotic in fruit juice: processing challenges, advances, and perspectives[J]. Current Opinion in Food Science, 2018, 22(4): 55-61. DOI:10.1016/j.cofs.2018.02.001.
- [14] CARINE R G, POLETO G, DE DEUS C, et al. Use of prebiotic sources to increase probiotic viability in pectin microparticles obtained by emulsification/internal gelation followed by freeze-drying[J]. Food Research International, 2019, 130: 108902. DOI:10.1016/j.foodres.2019.108902.
- [15] 国家卫生和计划生育委员会. 食品微生物学检验 乳酸菌检验: GB 4789.35—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [16] 国家质量检验检疫总局. 食品中总酸的测定: GB/T 12456—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [17] 魏永赞,王一承,刘丽琴,等. 12份引进油梨品种果肉有机酸组分和抗坏血酸含量分析[J]. 果树学报, 2018, 35(2): 177-184.
- [18] 周振,周能. 苯酚-硫酸法测定仁东大蒜中的总糖[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(6): 137-142.
- [19] 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, 29(8): 534-536. DOI:10.3321/j.issn.1002-6630.2008.08.127.
- [20] 贝琦. 燕麦发酵多酚释放与转化及生物活性增强的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018: 10-20.
- [21] BEI Q, LIU Y, WANG L, et al. Improving free, conjugated, and bound phenolic fractions in fermented oats (Avena sativa L.) with Monascus anka and their antioxidant activity[J]. Journal of Functional Foods, 2017, 32(5): 185-194. DOI:10.1016/j.jff.2017.02.028.
- [22] 陈臣. 植物乳杆菌ST-III全基因组序列分析及其对低聚果糖代谢通路的解析[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 50-60.
- [23] FREIRE A L, RAMOS C L, SCHWAN R F, et al. Effect of symbiotic interaction between a fructooligosaccharide and probiotic on the kinetic fermentation and chemical profile of maize blended rice beverages[J]. Food Research International, 2017, 100(1): 698-707. DOI:10.1016/j.foodres.2017.07.070.
- [24] 李达,苗欣宇,牛红红,等. 复合益生菌发酵果蔬饮料的研制[J]. 饮料工业, 2019, 22(6): 32-37.
- [25] CHEN C, LU Y Q, WANG L L, et al. CcpA-dependent carbon catabolite repression regulates fructooligosaccharides metabolism in Lactobacillus plantarum[J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 1-12. DOI:10.3389/fmicb.2018.01114.
- [26] WU C Y, LI T L, QI J, et al. Effects of lactic acid fermentation-based biotransformation on phenolic profiles, antioxidant capacity and flavor volatiles of apple juice[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 122(6): 109064. DOI:10.1016/j.lwt.2020.109064.
- [27] 王益莉,顾飞燕,黄怡雯,等. 发酵时间对苹果酵素抗氧化活性的影响[J]. 中国食品添加剂, 2017, 24(9): 200-204. DOI:10.3969/j.issn.1006-2513.2017.09.024.

- [28] AMANDA E, CHOO W S. Effect of refrigerated storage on the physicochemical characteristics and viability of *Lactobacillus plantarum* in fermented watermelon juice with or without supplementation with inulin or fructooligosaccharide[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(12): e13831. DOI:10.1111/jfpp.13831.
- [29] 任婷婷, 岳田利, 魏欣, 等. 益生菌发酵苹果浆工艺优化及发酵前后挥发性风味成分分析[J]. 食品科学, 2019, 40(8): 87-93. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180423-290.
- [30] ZIADI M, WATHELET J P, MARLIER M, et al. Analysis of volatile compounds produced by 2 strains of *Lactococcus lactis* isolated from leben (Tunisian fermented milk) using solid-phase microextraction-gas chromatography[J]. Journal of Food Science, 2008, 73(6): S247-S252. DOI:10.1111/j.1750-3841.2008.00846.x.
- [31] DI CAGNO R, SURICO R F, PARADISO A, et al. Effect of autochthonous lactic acid bacteria starters on health-promoting and sensory properties of tomato juices[J]. International Journal of Food Microbiology, 2009, 128(3): 473-483. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2008.10.017.
- [32] SETTACHAIMONGKON S, NOUT M J R, ANTUNES F E C, et al. The impact of selected strains of probiotic bacteria on metabolite formation in set yoghurt[J]. International Dairy Journal, 2014, 38(1): 1-10. DOI:10.1016/j.idairyj.2014.04.002.
- [33] 乔博鑫, 邢紫娟, 郭红莲. 乳酸菌发酵枸杞过程中理化指标及风味物质的变化[J]. 食品工业科技, 2019, 40(9): 6-12.
- [34] 朱琦, 魏明杰, 郑峰洋, 等. 酸角挥发油香味成分分析及在卷烟中的应用[J]. 安徽农学通报(下半月刊), 2009, 15(22): 124-126.
- [35] LASEKAN O, SEE N S. Key volatile aroma compounds of three black velvet tamarind (*Dialium*) fruit species[J]. Food Chemistry, 2015, 168(3): 561-565. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.07.112.
- [36] WEI M, WANG S Y, GU P, et al. Comparison of physicochemical indexes, amino acids, phenolic compounds and volatile compounds in bog bilberry juice fermented by *Lactobacillus plantarum* under different pH conditions[J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55(6): 2240-2250. DOI:10.1007/s13197-018-3141-y.