

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.11.011

# 无乳糖褐色风味发酵乳的研制

李硕倩<sup>1</sup>, 陶 晗<sup>1</sup>, 孙芳芳<sup>2</sup>, 丁小玲<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大学 食品与生物工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 新疆石河子花园乳业有限公司, 新疆 石河子 832021)

**摘要:**文章以鲜牛乳为原料,将现代生物酶解技术和发酵技术相结合制备2组不同工艺的无乳糖、无外源性添加糖的褐色发酵乳,测定其危害物质量浓度、风味组成和贮藏期的理化性质,并与市售产品进行质量安全评价对比。结果表明:2组自制发酵乳的乳糖质量比均低于5 mg/g,且葡萄糖质量浓度在15~20 g/L之间,均低于市售产品;与市售产品相比,酶解/发酵共混工艺使得发酵乳中5-HMF和3-DG的质量比分别从0.60、85.26 mg/kg降低至0.38、50.67 mg/kg;3组发酵乳均检测出超过20种风味物质,市售产品所含的酮类物质较多,而先酶解后发酵工艺与酶解/发酵共混工艺制备的乳分别富含杂环类和酸类物质;在4℃贮藏过程中,2组自制发酵乳的色泽、酸度随着贮藏时间的延长逐渐升高( $P<0.05$ );3组发酵乳的黏度和Zeta电位在贮藏期间均呈现先升高后下降的趋势,其中先酶解后发酵工艺制备的发酵乳的Zeta电位值最高。综合来看,在无添加外源性葡萄糖、稳定剂和添加剂的条件下,2组自制发酵乳的贮藏品质与市售产品无显著差异,其健康危害物质量浓度低于市售产品。

**关键词:**褐色风味发酵乳;乳糖;美拉德反应;危害物;贮藏品质

中图分类号:TS252.42

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2025)11-1508-07

## Development of lactose-free brown flavored fermented milk

LI Shuoqian<sup>1</sup>, TAO Han<sup>1</sup>, SUN Fangfang<sup>2</sup>, DING Xiaoling<sup>2</sup>

(1. School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 2. Xinjiang Shihezi Huayuan Dairy Co., Ltd., Shihezi 832021, China)

**Abstract:** Fresh milk was used to prepare two groups of lactose-free brown fermented milks without exogenous sugar by modern bio-enzymatic digestion and fermentation technologies. The hazardous substance content, flavor composition and physicochemical properties during the storage period were investigated, and a comparative study of quality and safety between self-prepared and commercial products was conducted. The results showed that the lactose content of two self-prepared fermented milks was lower than 5 mg/g, and the glucose content was in the range of 15-20 g/L, both of which were lower than those of the commercial product. Especially, compared to the commercial product, the enzymolysis/fermentation incubation treatment lowered down the values of 5-HMF and 3-DG from 0.60 mg/kg and 85.26 mg/kg to 0.38 mg/kg and 50.67 mg/kg, respectively. In addition, more than 20 flavor substances were detected in the three fermented milk groups. The commercial product contained more ketones while the milks treated by the pre-enzymolysis and fermentation and the enzymolysis/fermentation incubation were rich in heterocyclic and acidic substances, respectively. During the storage period at 4℃, the color and acidity of the two self-prepared fermented milks increased with the storage time ( $P<0.05$ ). The viscosity and zeta potential of the three fermented milk groups showed a tendency to increase and then decrease during the storage period. The milk treated by the pre-enzymolysis and fermentation exhibited the highest zeta potential value. In conclusion, the storage

收稿日期:2023-10-27;修回日期:2023-11-22

基金项目:兵团财政科技计划资助项目(2022AB004);新疆生产建设兵团第八师石河子市科技计划资助项目(2023GY08)

作者简介:李硕倩(2000—),女,山东济宁人,合肥工业大学硕士生;

陶 晗(1989—),女,河南郑州人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:hantao2017@hfut.edu.cn.

quality of the two self-prepared fermented milks without exogenous glucose, stabilizers and additives was as the same as the commercial product, with lower levels of health hazards.

**Key words:** brown flavored fermented milk; lactose; Maillard reaction; hazards; storage quality

褐色发酵乳是一种高黏度、低热量、风味独特、口感细腻清爽的发酵乳,通过脱脂乳粉或牛乳中的蛋白质与还原糖发生美拉德反应赋予其独特的色泽风味<sup>[1]</sup>。目前,市场上的褐色发酵乳生产工艺需要在原料乳中添加外源性还原糖,带来额外生产成本的同时,也增加了乳制品的糖分,易导致肥胖、心血管疾病、糖尿病等健康问题<sup>[2]</sup>。同时,美拉德反应伴随着如 3-脱氧葡萄糖醛酮(3-DG)和 5-羟甲基糠醛(5-HMF)等有害物质的产生,可能对动物和人类细胞有致癌和遗传毒性作用,诱发糖尿病和神经退行性疾病等<sup>[3-4]</sup>。因此消费者对低糖型无乳糖褐色乳制品的青睐将成为必然趋势。然而,关于无乳糖褐色发酵乳制品的研发较少,对于褐色发酵乳在褐变过程中产生的健康危害物的调控和形成规律研究也较少。

本实验将现代生物酶解技术与发酵技术相结合,利用乳糖酶水解原料乳中的乳糖,使其分解为葡萄糖和半乳糖,代替外源性葡萄糖,在此基础上完成美拉德褐变反应。通过比较分析 2 种不同工艺方法制成的无乳糖褐色发酵乳与市售褐色发酵乳,以此为开发适合乳糖不耐受患者安全可靠的低乳糖或无乳糖乳制品提供理论参考,有利于拓展低糖型或无乳糖乳制品市场。

## 1 材料与设备

### 1.1 材料与试剂

鲜牛乳购于伊利实业集团股份有限公司;乳糖酶(7 500 U/g)购于诺维信公司;市售发酵剂(包含嗜热链球菌和保加利亚乳杆菌)购于安琪酵母股份有限公司;市售褐色发酵乳购于合肥红府超市;乳糖检测盒购于睿信生物公司;葡萄糖检测盒购于索莱宝生物公司;其他所用化学试剂(分析纯)均购于国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 仪器与设备

本实验所用设备有:RPHS-3C 酸度计(上海雷磁仪器厂);HH-4 数显恒温水浴锅(常州市江南仪器设备厂);NDJ-1 旋转式黏度计(上海尼润科技有限公司);CM-5 分光测色仪(日本柯尼卡美能达);7890A-5975C 气相色谱质谱联用仪(安捷伦科技有限公司);E2695 高效液相色谱仪(美国沃特世公司);SW-CJ-2D 型无菌操作台(苏州

净化设备有限公司)。

## 2 实验方法

### 2.1 褐色发酵乳制备流程

#### 2.1.1 先酶解后发酵工艺

鲜牛乳在 95 °C 预杀菌 300 s,冷却降温至 41 °C,添加 0.8%乳糖酶进行酶解,升温至 95 °C,保温褐变 3 h,冷却至 42 °C 后接入发酵剂发酵 6 h,冷却至 12~15 °C 进行破乳,最终 4 °C 冷藏、后熟。

#### 2.1.2 酶解/发酵共混工艺

鲜牛乳在 95 °C 下预杀菌 300 s,保温褐变 3 h,冷却降温至 42 °C,添加 0.8%乳糖酶并接入发酵剂,充分搅拌,封口保温酶解 6 h,冷却至 12~15 °C 进行破乳,最终 4 °C 冷藏、后熟。

### 2.2 乳糖质量比测定

采用乳糖检测盒法,通过校正游离的葡萄糖背景值得到乳糖质量比。按照说明,将待测样品在 510 nm 处的吸光度代入公式进行计算。

### 2.3 葡萄糖质量浓度

采用葡萄糖检测盒法测定乳糖水解后产生的葡萄糖质量浓度。按照操作说明,测定葡萄糖标准品和待测样品在 530 nm 波长处的吸光度,根据说明书公式计算样品中葡萄糖的质量浓度。

### 2.4 5-HMF 质量比测定

#### 2.4.1 标准溶液的配制

参考文献[5]的方法并稍作修改。称取一定量的 5-HMF 标准品,依次配制成 0、0.10、0.50、1.00、1.50、2.00  $\mu\text{g}/\text{mL}$  的 5-HMF 标准溶液。

#### 2.4.2 样品溶液的制备

准确称取牛乳样品 10.00 g,加入 5 mL 0.15 mol/L 草酸溶液,混合均匀;再加入 92 g/L 六氰合铁酸钾溶液 3 mL 和 183 g/L 乙酸锌溶液 3 mL,振摇充分后静置 10 min,用甲醇定容至 50 mL;混匀后在 4 000 r/min 条件下离心 10 min,收集离心后的上清液,用 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤后进样。

#### 2.4.3 5-HMF 的高效液相色谱色条件

采用文献[6]的方法并稍作修改。采用 Waters Symmetry C18 色谱柱(250 mm $\times$ 4.6 mm, 5  $\mu\text{m}$ );流动相为甲醇-水(体积比 15:85);紫外

检测波长为 280 nm;流速为 1.0 mL/min;进样量为 10  $\mu$ L;柱温为 30  $^{\circ}$ C。

## 2.5 3-DG 质量比测定

### 2.5.1 3-DG 标准溶液的配制

称取一定量 3-DG 标准品,依次配制成 0.50、1.00、5.00、10.00、20.00、25.00 mg/L 的 3-DG 标准溶液。向棕色反应瓶中加入 1.00 mL 的 3-DG 标准溶液和 70  $\mu$ L 邻苯二胺,按照下述衍生条件进行衍生化处理。

### 2.5.2 3-DG 的衍生条件

参考文献[7]的方法并稍作修改。选用邻苯二胺作为衍生试剂,取离心后的样品溶液 1 mL,加入邻苯二胺衍生试剂(60 mg/mL 水溶液)70  $\mu$ L 于棕色反应瓶中,在 60  $^{\circ}$ C、250 r/min 条件下,水浴反应 30 min,然后用 0.45  $\mu$ m 水系微孔滤膜过滤,待测高效液相色谱分析测定。

### 2.5.3 样品溶液的制备

样品溶液的制备工艺同 2.4.2。

### 2.5.4 3-DG 的高效液相色谱分析

色谱柱为 Waters Symmetry C18 色谱柱(250 mm $\times$ 4.6 mm,5  $\mu$ m);流动相 A 为 0.15% 醋酸,流动相 B 为乙腈;进样量为 20  $\mu$ L;柱温为 25  $^{\circ}$ C;检测波长为 313 nm。梯度洗脱程序见表 1 所列(流动相 A 和 B 所占比例分别用  $\varphi$ (A) 和  $\varphi$ (B) 表示)。

表 1 梯度洗脱程序

时间/min	流量/(mL/min)	$\varphi$ (A)/%	$\varphi$ (B)/%
0	0.8	92	8
10.0	0.8	60	40
12.0	0.8	52	48
13.0	0.8	40	60
15.5	0.8	20	80
20.5	0.8	20	80
25.5	0.8	55	45
30.5	0.8	92	8

## 2.6 挥发性风味物质的检测

### 2.6.1 发酵乳样品前处理

参考文献[8]的方法,采用顶空固相微萃取,样品在 60  $^{\circ}$ C 水浴萃取 30 min,在进样口处解析 5 min。

### 2.6.2 气相色谱分析

参考文献[9]的方法,色谱毛细管柱为 DB-WAX(30 mm $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25  $\mu$ m),载气为 He,流速为 1.0 mL/min,采取不分流进样,进样口温度为 250  $^{\circ}$ C。采用程序升温方式,起始温度为 40  $^{\circ}$ C,保持 2.5 min;再以 5.0  $^{\circ}$ C/min 升温到

140  $^{\circ}$ C,保持 5.0 min;然后以 6  $^{\circ}$ C/min 升温到 230  $^{\circ}$ C,保持 5.0 min。

### 2.6.3 质谱分析

电离方式为 EI,电子轰击能量为 70 eV,传输线温度为 280  $^{\circ}$ C,离子源温度为 230  $^{\circ}$ C,四极杆温度为 150  $^{\circ}$ C,扫描范围为 30~450 Da,发射电流为 100  $\mu$ A,检测电压为 1.4 kV。

## 2.7 产品货架期理化指标测定

### 2.7.1 色度

参考文献[10]的方法,在稳定的标准光源 D65 环境下来测定发酵乳色泽的变化。取 20 mL 发酵乳于一次性培养皿中,利用色差仪对表征发酵乳样品色泽的  $b^*$  值进行测定,每个样品测定 3 次,取算术平均值。

### 2.7.2 褐变指数

参考文献[6]的方法,取 1 mL 发酵乳样品,用蒸馏水稀释 200 倍,在 540 nm 处测量吸光度值(以生鲜牛乳为空白)。

### 2.7.3 黏度

发酵乳黏度的测定参考文献[11]的方法,采用 NDJ-1 旋转式黏度计,测量条件为温度 20  $^{\circ}$ C、转速为 12 r/min、停留时间为 30 s、用 I 号转子测定。

### 2.7.4 酸度

发酵乳酸度的测定采用 GB 5009.239—2016《食品安全国家标准食品酸度的测定》中规定的 NaOH 滴定法。

### 2.7.5 Zeta 电位

参考文献[12]的方法,室温下将发酵乳样品与去离子水按照体积比 1:1 000 稀释,然后过 0.45  $\mu$ m 微滤膜处理,利用 Zetasizer Nano ZS 纳米粒径电位分析仪对发酵乳的 Zeta 电位进行测定。测定 Zeta 电位时样品池选用 DTS1060 弯曲式毛细管样品池,每个样品平行测定 3 次,取算术平均值。

## 2.8 数据处理与分析

所有实验均重复 3 次,实验数据以平均值 $\pm$ 标准差表示。使用 SPSS 27.0 软件对实验数据进行统计分析,单向方差分析(ANOVA)用于测定各组之间的显著性差异。 $P < 0.05$  表示不同组间存在显著性差异,不同字母表示差异显著。

## 3 结果与分析

### 3.1 乳糖质量比和葡萄糖质量浓度分析

不同发酵乳的乳糖质量比和葡萄糖质量浓度如图 1 所示。由图 1 可知,与市售发酵乳(C 组)相比,先酶解后发酵工艺制备的发酵乳(A 组)的

乳糖质量比和葡萄糖质量浓度分别从 20.2 mg/g 和 44.89 g/L 降低至 0.9 mg/g 和 16.48 g/L,酶解/发酵共混工艺制备的发酵乳(B组)分别降低至 0.7 mg/g 和 19.34 g/L。2 组自制发酵乳的乳糖质量比均低于 5.0 mg/g,符合无乳糖的标准。这些变化是由于自制发酵乳不含外源性添加糖,且乳糖水解产生的葡萄糖在褐变过程中参与了美拉德反应,导致最终产品中葡萄糖质量浓度较低。

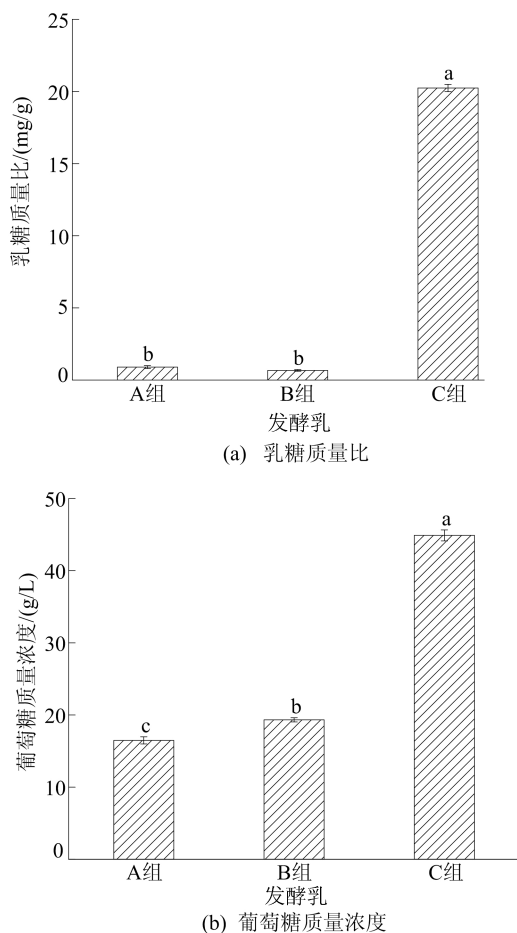


图 1 不同发酵乳的乳糖质量比和葡萄糖质量浓度

### 3.2 5-HMF 和 3-DG 质量比分析

不同发酵乳的 5-HMF 和 3-DG 质量比如图 2 所示。由图 2 可知,2 组自制产品的有害物质质量分数均不超过 15%。与市售产品相比,酶解/发酵共混工艺所制备的发酵乳中 5-HMF 和 3-DG 的质量比分别从 0.60、85.26 mg/kg 降低至 0.38、50.67 mg/kg,即两者质量分数分别降低了 36.67%和 40.57%,这在很大程度上减少了有害物的产生。文献[13-14]的研究表明,5-HMF 和 3-DG 的形成与美拉德反应中的葡萄糖质量浓度呈正相关趋势。由于市售产品中添加了过多的外源性葡萄糖,在 6~16 h 的褐变过程中产生更多

的有害物质。而先酶解后发酵工艺与酶解/发酵共混工艺缩短了褐变时间,有效利用水解葡萄糖,从而降低危害物在发酵乳中的质量比。

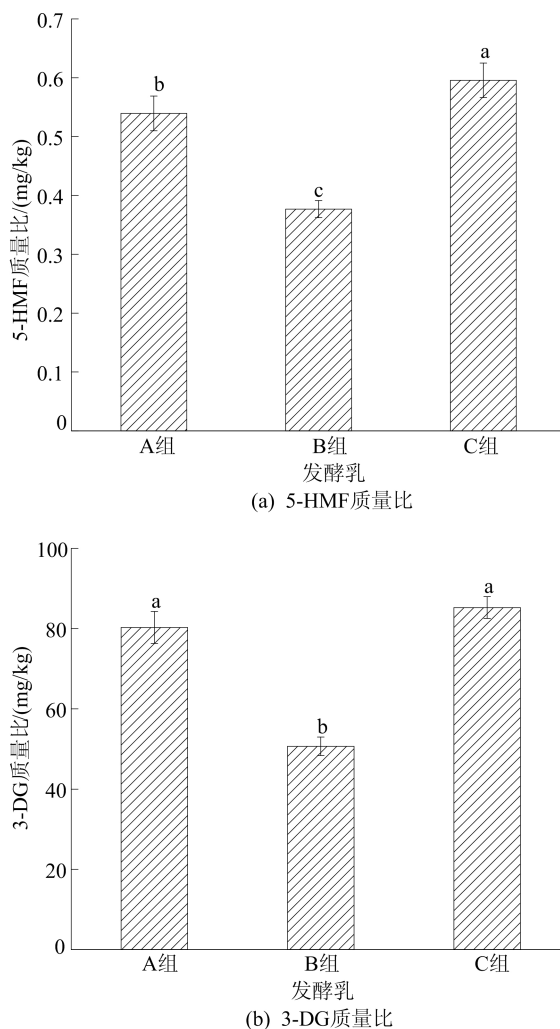


图 2 不同发酵乳的 5-HMF 和 3-DG 质量比

### 3.3 挥发性风味物质的分析与比较

3 组发酵乳的挥发性风味物质见表 2 所列。由表 2 可知:先酶解后发酵制成的发酵乳共检测出 21 种挥发性风味物质,其中烃类 6 种、酯类 4 种、杂环类 5 种、酮类 4 种、醚类 1 种。烃类、酮类和杂环类质量比较高,分别占比 75.44%、47.72%、29.22%;酶解/发酵共混制成的发酵乳共检测出 21 种挥发性风味物质,其中杂环类 5 种、酮类 3 种、酯类 4 种、烃类 4 种、醚类 2 种、酸类 2 种,酮类物质质量比最高,占比 35.17%,其次是酯类和醚类,分别占比 27.49%和 24.42%,酸类化合物占全部的 3.37%;市售发酵乳检测出共 24 种挥发性风味物质,其中酮类 7 种、烃类 6 种、酯类 5 种、杂环类 5 种、醚类 1 种,酮类和酯类质量比较高,分别占比 50.94%和 31.37%,是烃类质量比,占比 17.46%。

表 2 不同发酵乳的风味物质及其质量比

序号	特征风味物质	种类	质量比/( $\mu\text{g/g}$ )		
			A组	B组	C组
1	二甲醚	醚类	0.036 4	0.051 4	
2	丙酮	酮类	0.020 6		0.054 8
3	2,3-丁二酮	酮类	0.248 9		
4	4-异丙基苯酚	杂环类	0.001 7		
5	2,6-二氟苯甲酸-2,2,2-三氟乙酯	酯类	0.000 8		
6	2-甲基-3-庚酮	酮类	0.202 7	0.435 4	
7	八甲基环四硅氧烷	烃类	0.078 1		
8	4-甲氧基-3-硝基苯基萘-2-基二氮杂环己烷	烃类	0.000 7		
9	十甲基环戊硅氧烷	烃类	0.372 1	0.044 3	0.101 2
10	十二甲基环己硅氧烷	烃类	0.301 3	0.102 6	0.151 5
11	1,1,1-三氟-2-丁酮	酮类	0.005 0		
12	4-[[4-(二甲氨基)苯基]氨基]-1-萘酯	酯类	0.000 5		
13	1,2-二甲基环二十二烯	杂环类	0.000 7		
14	L-丙氨酸正十五氟辛酰丁酯	酯类	0.000 9		
15	甲烷	烃类	0.000 7		
16	二甲基(2-萘氧基)十八烷基氧基硅烷	烃类	0.001 5		
17	2,2'-(1,1,2,2,3,3-六氟-1,3-丙二基)双噻吩	杂环类	0.001 0		
18	噻吩-2-羧酸-3-(2,4-二氟苯基磺酰氨基)-5-苯基甲酯	酯类	0.000 4		
19	2-甲基-2H-四唑	杂环类	0.000 5		
20	(2-氮丙啶乙基)胺	杂环类	0.288 3		
21	氨基甲酸酯	酯类		0.141 1	0.478 1
22	丙氨酸	酸类		0.054 2	
23	甲基丙醚	醚类		0.347 9	
24	四硝基甲烷	烃类		0.001 8	
25	2-甲基-5-苯基吡咯	杂环类		0.000 8	
26	丙酰丙酸酯	酯类		0.134 7	
27	2,5-二甲基-3-己酮	酮类		0.139 1	
28	2-甲基丙酰基 2-甲基丙酸酯	酯类		0.169 0	
29	2-乙基丁酸四氢糠基酯	酯类		0.004 7	
30	4-羟基苯甲酸-4-辛氧基苯甲酸	酸类		0.000 9	
31	N-苯基苄-9-亚胺	杂环类		0.000 4	
32	2-己基-5-戊基吡咯烷	烃类		0.000 6	
33	双( $\eta^5$ -吡啶基环戊二烯)钴	杂环类		0.003 8	
34	2-(5-苯基硫基-2-噻吩基亚甲基)丙二腈	杂环类		0.001 0	
35	五苯	杂环类		0.000 9	
36	10-丙基-10H-吡啶-9-酮	酮类		0.000 5	
37	乙酸乙烯酯	酯类			0.039 0
38	1-甲基吡啶甲酸乙酯	酯类			0.009 3
39	2-甲基-3-己酮	酮类			0.203 5
40	2-庚酮	酮类			0.475 0
41	胆甾烷-3-酮,二甲基胆, (5. $\alpha$ )	杂环类			0.000 8
42	3-戊酮	酮类			0.084 1
43	9,10-联亚胺-11,12-二羧酸-9,10-二氢二乙酯	酯类			0.000 9
44	八甲基四氧杂四硅烷	烃类			0.039 8
45	二甲基(2-萘氧基)十七烷基氧基硅烷	烃类			0.000 6
46	丙烯酸甲酯	酯类			0.001 8
47	7,7-二氯-2-庚酮	酮类			0.035 0
48	3,4-己二酮	酮类			0.006 1
49	2,3-脱氢-6-乙基-7-甲氧基-2-甲基-3-苯基-4-酮	酮类			0.000 8
50	3-氰基-5,5-二甲氧基糠基-N-甲基异恶唑烷	烃类			0.000 8
51	二乙基戊氧基十一氧基硅烷	烃类			0.000 7
52	9-(2-(5-甲基-2-吡啶基)乙基)-6-甲基-1,2,3,4-四氢吡啶	杂环类			0.000 8
53	四氢-4-苯基-2-四氟苯基噻啉	杂环类			0.000 8
54	五溴-6-氯三氮杂三环己烷-1,3,5-三烯	杂环类			0.000 1
55	N-苯基-7H-嘌呤-6-胺	杂环类			0.000 5
56	3,4-二羟基-5-甲氧基苯甲醛	醛类			0.000 9
57	三氟化磷	其他	0.000 7		
58	碘	其他		0.001 4	

气味的主要呈味物质是杂环类、酮类和酸类。市售发酵乳所含的酮类物质较多,先酶解后发酵

工艺制备的发酵乳中的杂环类物质质量比远高于酶解/发酵共混工艺制备的发酵乳中的,酶解/发

酵共混工艺制备的发酵乳相较于其他 2 组酸类物质较丰富。此外,市售发酵乳还检测出少量醛类。酮类物质主要由一些多不饱和脂肪酸经氧化和降解产生。杂环类化合物是由美拉德反应产生,使发酵乳带有麦芽香气味。酯类化合物主要源于脂肪酸的水解和微生物代谢作用。酸类物质来源于乳酸菌发酵,赋予发酵乳特征滋味。造成 3 组发酵乳风味物质差异性的原因可能是市售产品与自制发酵乳所用菌种不同,且 2 组自制发酵乳的工艺流程不一致。此外,在加工过程中蛋白质和微生物代谢等复杂的变化也会影响其风味组成。

### 3.4 产品货架期理化指标分析

#### 3.4.1 色泽的变化

不同发酵乳在贮藏期间色泽的变化如图 3 所示。

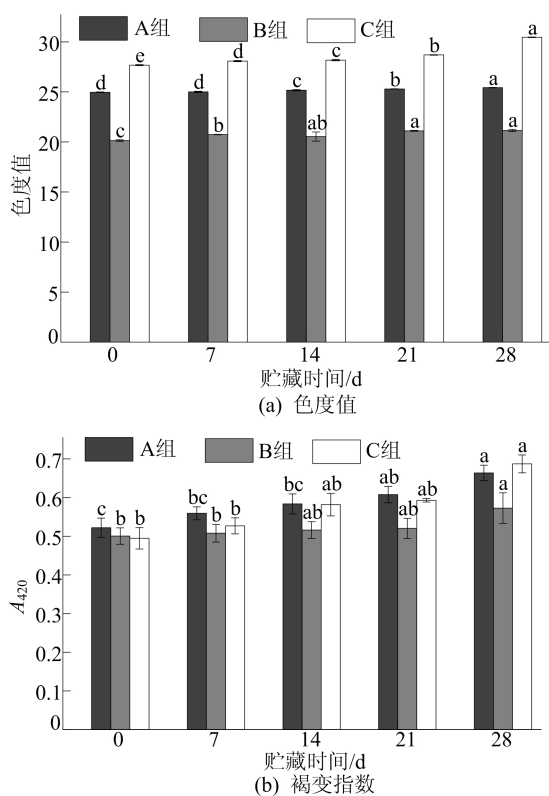


图 3 不同发酵乳在贮藏期间色泽的变化

褐变反应生成的显色物质主要为黄色,通过测定指标中的  $b^*$  值来对样品的显色物质的浓度进行对比,从而比较反应的程度, $b^*$  值属于黄蓝色,数值越大则黄蓝色越深,反应程度越深。由图 3a 可知,2 组自制产品和市售发酵乳的  $b^*$  值随着贮藏时间的延长缓慢上升,颜色逐渐加深,这是由于发酵乳在低温时也会继续发生美拉德反应。由图 3b 可知,2 组自制产品的褐变指数随着贮藏时间的延长逐渐增大。这是由于在贮藏期间,发酵

乳中的蛋白质与羰基会继续发生美拉德反应,导致发酵乳的褐色色泽逐渐加深。

#### 3.4.2 黏度的变化

不同发酵乳在贮藏期间的黏度变化如图 4 所示。由图 4 可知,2 组自制产品和市售发酵乳的黏度在贮藏 0~28 d 期间均呈先升高后下降的趋势。其中,先酶解后发酵工艺制备的发酵乳黏度具有最高。发酵乳的黏度主要是由于乳酸菌发酵产生的有机酸导致原料中的蛋白质发生变性凝结,使发酵乳表现出一定的黏性。文献[15]研究发现贮藏初期黏度增加主要是由于加工过程而分离的凝乳微粒重新凝聚到凝乳微粒的网络结构中,凝胶网络结构变得更加紧密,但是随着贮藏时间的延长,酸奶中的乳酸菌会继续发酵产酸,尤其是当酸度过高时,会破坏酸奶中原有的凝乳体系,导致黏度逐渐降低。

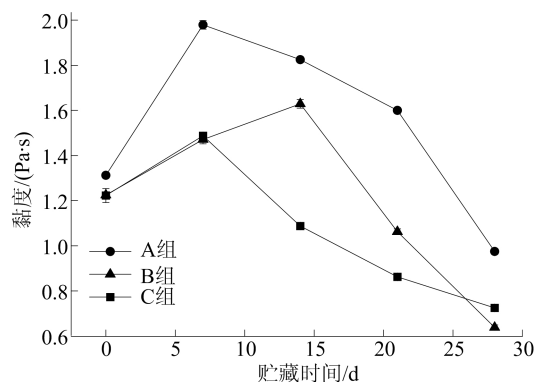


图 4 不同发酵乳在贮藏期间黏度的变化

#### 3.4.3 酸度的变化

不同发酵乳在贮藏期间的酸度如图 5 所示。

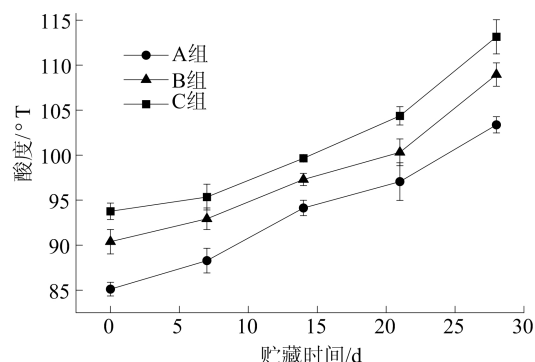


图 5 不同发酵乳在贮藏期间酸度的变化

由图 5 可知,随着贮藏时间延长,3 组发酵乳的酸度呈显著升高 ( $P < 0.05$ ) 趋势,均在 28 d 达到最高值。其中,市售发酵乳的酸度从 93.77 °T 升至 113.15 °T,远高于酶解/发酵共混工艺和先

酶解后发酵工艺制备的发酵乳。这是由于酸奶在 4~6 °C 低温保藏期间,虽然乳酸菌生长受到抑制,但乳酸菌仍具有活性,并持续利用一些酶解作用,导致乳糖及葡萄糖生成乳酸,酸度显著升高,形成后酸化的现象。

#### 3.4.4 Zeta 电位的变化

Zeta 电位的大小是衡量胶体粒子稳定性的重要参数,绝对值较高意味着稳定性越高。3 组发酵乳在贮藏期间的 Zeta 电位变化如图 6 所示。

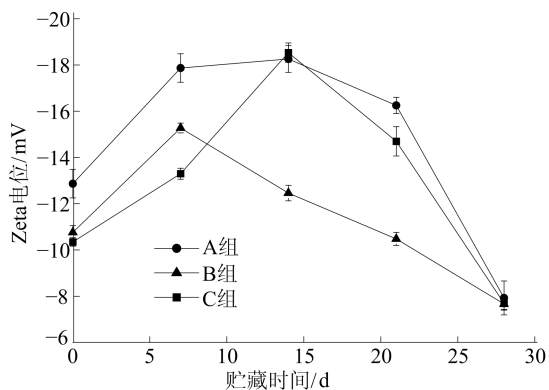


图 6 不同发酵乳在贮藏期间 Zeta 电位的变化

由图 6 可知,2 组样品粒子所带负电荷在贮藏期间内均呈现先增加后减少的趋势。在储藏初期负电荷的增加存在以下原因:① 在美拉德反应的第 1 阶段,糖类与正电荷的赖氨酸和精氨酸残基反应,正电荷的减少导致负电荷的增多;② 脂肪被脂肪酶氧化生成小分子有机酸分布在粒子表面,是以  $\text{COO}^-$  的形式存在于粒子表面,导致负电荷增加。而在储藏后期,粒子负电荷的减少可能是由于粒径变大、电位绝对值降低,稳定性降低的主要原因是酶的作用导致粒子大小发生变化,并且溶液的酸度值升高,从而导致体系电位的不稳定。本实验中,采用先酶解后发酵工艺制备的发酵乳的 Zeta 电位在贮藏期间始终高于其他组,说明其具有较好的粒子稳定性。这可能是由于 2 种工艺的褐变和酶解的先后顺序不一致,先酶解后发酵工艺制备的乳的褐变过程发生在酶解之后,而酶解/发酵共混工艺的褐变和酶解顺序与之相反,导致前者有更多的糖类与正电荷的氨基酸发生美拉德反应,其带有更多的负电荷,因而先酶解后发酵工艺制备的乳有更高的粒子稳定性。

## 4 结 论

本研究基于内源性乳糖酶水解和发酵技术,分别采用先酶解后发酵工艺和酶解/发酵共混工

艺制作 2 组无乳糖褐色发酵乳。在无乳糖、无外源性添加糖的情况下,自制发酵乳与市售发酵乳的贮藏品质无显著差异,其健康危害物质量比低于市售发酵乳。因此,本研究成果有望为无乳糖褐色乳制品的研发和应用提供理论参考,为调控褐色乳的质量安全提供策略,具有广泛的应用前景。

## [参 考 文 献]

- [1] LI A, ZHENG J, HAN X, et al. Advances in low-lactose/lactose-free dairy products and their production[J]. Foods, 2023, 12(13):2553.
- [2] 陶一获. 无蔗糖褐色乳酸菌饮料加工工艺研究[J]. 现代食品, 2022, 28(11):42-44, 62.
- [3] HAN Z, GAO J, WANG X, et al. Formation and alterations of the potentially harmful Maillard reaction products during the production and storage of brown fermented milk[J]. Molecules, 2019, 24(2):272.
- [4] HAN Z, GAO J, LI J, et al. Mitigation of 3-deoxyglucosone and 5-hydroxymethylfurfural in brown fermented milk via an alternative browning process based on the hydrolysis of endogenous lactose[J]. Food & Function, 2019, 10(4):2022-2029.
- [5] 刘畅, 钱方. 褐色酸奶中 5-羟甲基糠醛测定方法探究[J]. 中国食品添加剂, 2018(12):180-185.
- [6] 李思宁, 唐善虎, 胡洋, 等. 酶法水解乳糖与热处理偶联对牛乳 Maillard 反应的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(7):122-128.
- [7] 杨亚楠. 褐色乳酸菌饮料加工中品质与安全性的评价[D]. 天津:天津科技大学, 2016.
- [8] 王婧. 褐色风味发酵乳的研制及主要风味分析[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2019.
- [9] 刘玲, 付佳宁, 于梓涵, 等. 特色褐色风味发酵乳的研制及与市售产品的风味分析[J]. 食品科技, 2023, 48(1):56-61.
- [10] 高晓夏月. 酶法降解乳糖及在酸奶冰淇淋产品中的应用[D]. 天津:天津商业大学, 2019.
- [11] 王振伟. 蔓越莓酸奶的研制及工业化应用研究[D]. 上海:华东理工大学, 2021.
- [12] 依胜男. 长保质期 HTST 杀菌乳工艺及品质研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2020.
- [13] 薛瑞琪, 夏小乐. 褐色发酵乳中 5-羟甲基糠醛相关性分析及应用[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(19):79-83.
- [14] 高茜. 功能性饮料中有害物质形成规律的研究[D]. 天津:天津科技大学, 2017.
- [15] 孙健, 陈静, 翁心刚. 酸奶的储存温度对产品品质的影响[J]. 食品工业科技, 2010, 31(12):140-141.

(责任编辑 吴 亮)