

## 添加谷氨酰胺转氨酶对凝固型酸奶品质的影响

霍辰辰, 胡志和, 鲁丁强, 祝玉婷, 肖厚栋, 伊 万, 李明瑞

### Effect of Adding Glutamine Transaminase on the Quality of Set-style Yogurt

HUO Chenchen, HU Zhihe, LU Dingqiang, ZHU Yuting, XIAO Houdong, YI Wan, and LI Mingrui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021090097>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 胶原蛋白肽对凝固型酸奶品质的影响

Effect of Collagen Peptide on the Quality of Set-style Yoghurt

食品工业科技. 2020, 41(16): 1–6

#### 葡萄糖氧化酶和谷氨酰胺转氨酶对发酵麦麸面团加工品质的影响

Effects of Glucose Oxidase and Glutamine Transaminase on Processing Quality of Fermented Wheat Bran Dough

食品工业科技. 2019, 40(9): 85–90

#### 乳清蛋白粉对凝固型酸奶品质的影响

Effect of Whey Protein Powder on the Quality of Solidified Yogurt

食品工业科技. 2020, 41(13): 39–45

#### 热处理和转谷氨酰胺酶对凝固型酸乳品质的影响

Effects of Heat Treatment and Transglutaminase on the Quality of Set Yoghurt

食品工业科技. 2020, 41(18): 33–37

#### 不同稳定剂对凝固型牦牛酸奶在冷藏后熟过程中品质及风味的影响

Effect of different stabilizers on the quality and flavors of set-style yak yoghurt during post-fermentation storage

食品工业科技. 2018, 39(4): 188–196

#### 淀粉酶、谷氨酰胺转氨酶及黄原胶对燕麦-小麦混合粉面团流变特性的影响

Effect of Amylase,Glutamine Aminotransferase and Xanthan Gum on Rheological Properties of Qat-Wheat Mixed Flour Dough

食品工业科技. 2021, 42(2): 52–57



关注微信公众号，获得更多资讯信息

霍辰辰, 胡志和, 鲁丁强, 等. 添加谷氨酰胺转氨酶对凝固型酸奶品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(11): 83–95. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021090097

HUO Chenchen, HU Zhihe, LU Dingqiang, et al. Effect of Adding Glutamine Transaminase on the Quality of Set-style Yogurt[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(11): 83–95. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021090097

· 研究与探讨 ·

# 添加谷氨酰胺转氨酶对凝固型酸奶品质的影响

霍辰辰, 胡志和\*, 鲁丁强, 祝玉婷, 肖厚栋, 伊 万, 李明瑞

(天津市食品生物技术重点实验室, 天津商业大学生物技术与食品科学学院, 天津 300134)

**摘要:** 研究添加谷氨酰胺转氨酶(简称 TG 酶)的凝固型酸奶与普通凝固型酸奶(未添加 TG 酶)在发酵过程中理化指标与感官指标的差异性。采用酚酞指示剂法、流变仪、质构仪、离心法和平板计数法分别测定酸奶在发酵过程中酸度、粘度、硬度、持水性及活菌数的变化;用电子眼、电子舌、电子鼻测定色泽、滋味、气味的变化,并进行感官评定。结果表明,每克乳蛋白添加 0~5 U 的 TG 酶,发酵结束时酸奶的酸度在 71.12~73.64 °T 范围内,酸度无显著性差异 ( $P>0.05$ ) ;在发酵过程中,粘度、硬度均在 3 h 后呈显著上升 ( $P<0.05$ ),发酵结束时,添加 TG 酶会显著增高凝固型酸奶的粘度和硬度 ( $P<0.05$ ) ;随着 TG 酶添加量的增加,持水性显著增强 ( $P<0.05$ ) ;添加不同浓度的 TG 酶凝固型酸奶中的活菌数无显著差异 ( $P>0.05$ ) 。TG 酶凝固型酸奶与普通凝固型酸奶的主色号均为 4095,发酵结束时,色泽无显著性差异 ( $P>0.05$ ) ;经主成分分析,发酵结束后添加不同浓度的 TG 酶不会对酸奶的滋味、气味造成显著性影响 ( $P>0.05$ ) ;经感官评定, TG 酶在添加量为 2 U/(g 蛋白)时感官品质最受喜爱。因此,与未加 TG 酶的普通凝固型酸奶相比,添加 TG 酶的凝固型酸奶在酸度、活菌数、色澤、滋味、气味方面均无显著性差异 ( $P>0.05$ ) ;在粘度、硬度和持水性方面显著提高 ( $P<0.05$ ),添加适量 TG 酶有利于凝固型酸奶品质的提高。

**关键词:** 凝固型酸奶, 谷氨酰胺转氨酶, 理化指标, 感官指标, 差异性比较

中图分类号: TS252.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)11-0083-13

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021090097

本文网刊:



## Effect of Adding Glutamine Transaminase on the Quality of Set-style Yogurt

HUO Chenchen, HU Zhihe\*, LU Dingqiang, ZHU Yuting, XIAO Houdong, YI Wan, LI Mingrui

(Tianjin Key Laboratory of Food and Biotechnology, College of Biotechnology and Food Science, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

**Abstract:** The objective of this work was to study the difference of physical and chemical indexes and sensory indexes between set-style yogurt with TG enzyme and plain set-style yogurt (without TG enzyme) in the fermentation process. The changes of acidity, viscosity, hardness, water holding capacity and viable count of yogurt during fermentation were measured by phenolphthalein indicator method, rheometer, texture analyzer, centrifugation and plate counting method, respectively. The changes of color, taste and smell were measured by electronic eye, electronic tongue and electronic nose, respectively, and sensory evaluation was carried out. The results showed that adding 0~5 U TG enzyme per gram of milk protein, the acidity of yogurt at the end of fermentation was within the range of 71.12~73.64 °T, and there was no significant difference in the acidity of yogurt ( $P>0.05$ ). During the fermentation process, the viscosity and hardness increased significantly after 3 h ( $P<0.05$ ), and the viscosity and hardness of set-style yogurt with TG enzyme increased significantly at the end of fermentation ( $P<0.05$ ). With the increase of TG enzyme content, the water holding capacity increased significantly ( $P<0.05$ ). Adding different concentrations of TG enzyme had no significant effect on the number of

收稿日期: 2021-09-08

基金项目: 天津市科技计划项目 (17ZXYENC00130); 天津市高等学校创新团队项目 (TD13-5087)。

作者简介: 霍辰辰 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: 760525723@qq.com。

\* 通信作者: 胡志和 (1962-), 男, 硕士, 教授, 研究方向: 专用功能食品, E-mail: hzhihe@tjcu.edu.cn。

viable bacteria in set-style yogurt ( $P>0.05$ ). The main color number of TG enzyme set-style yoghurt and common set-style yoghurt were both 4095, and there was no significant difference in color at the end of fermentation ( $P>0.05$ ). By principal component analysis, adding different concentrations of TG enzyme after fermentation had no significant effect on the taste and smell of yogurt ( $P>0.05$ ). According to sensory evaluation, yogurt that 1 g milk protein supplemented with 2 U TG enzyme had the best sensory. Therefore, compared with the plain set-style yogurt without TG enzyme, the coagulated yogurt with TG enzyme was not significantly different in acidity, live bacteria count, color, taste and odor ( $P>0.05$ ); it was significantly higher in viscosity, hardness and water-holding capacity ( $P<0.05$ ), and the addition of appropriate amount of TG enzyme was beneficial to the improvement of the quality of coagulated yogurt.

**Key words:** set-style yoghurt; glutamine transaminase; physical and chemical indicators; sensory index; comparison of differences

酸奶是一种具有特殊风味的乳制品,含有大量的活性乳酸菌<sup>[1]</sup>,但是酸奶在保质期内常出现脱水收缩现象,虽然可以通过改善加工工艺或调整不同的稳定剂配比来提高酸奶的表现粘度、稠度和持水性,但随着食品安全与饮食健康概念的普及,消费者更青睐在产品标签中出现较少的配料和添加剂种类,甚至更喜欢选择无添加、保持天然食品原料属性的产品。

谷氨酰胺转氨酶也被称为转谷氨酰胺酶或谷氨酰胺转移酶(简称TG酶),是一类可以催化酰基发生转移的酶<sup>[2]</sup>,享有“21世纪超级粘合剂”的美誉<sup>[3]</sup>,是重要的酶制剂。对于酸奶而言,添加TG酶可以改善酸奶的质构特性,TG酶通过催化 $\epsilon$ -( $\gamma$ -谷氨酰)赖氨酸生成交联蛋白,提高酸奶的硬度<sup>[4-8]</sup>。TG酶浓度增加时,蛋白质的交联程度也会增加,从而导致酸奶的凝胶结构发生变化<sup>[9]</sup>。TG酶处理可显著增加酸奶的表现粘度<sup>[10-12]</sup>,对不同类型酸乳的持水性和脱水性均有非常显著的影响,添加TG酶后凝固型酸奶<sup>[5,13-15]</sup>和搅拌型酸奶<sup>[16]</sup>的持水性均显著增加,一般而言,TG酶浓度越高,持水性越好,脱水率越低。此外,在高浓度TG酶的处理下,由于乳蛋白的交联,强化了酸乳的三维网络稳定性,降低了乳清析出<sup>[14]</sup>,从而达到改善酸奶品质的目的<sup>[17]</sup>。

在酸奶生产中,TG酶添加方式通常有:将TG酶加入鲜奶中<sup>[18-19]</sup>;在杀菌冷却后,发酵剂加入之前添加<sup>[6,20-25]</sup>;和发酵剂同时添加<sup>[20,22-23,26-29]</sup>;在发酵剂加入之后添加<sup>[30]</sup>三种方式。TG酶处理奶,可以在不同的温度和时间进行保温<sup>[21,28]</sup>,接着加入发酵剂直到发酵结束;大多数研究还采用热处理的方式使奶中的TG酶失活<sup>[18,22-24]</sup>,因为没有灭活的TG酶在酸奶中仍然具有活性。

TG酶可以改变蛋白质的功能特性与结构,将TG酶应用于酸奶中,能够改变酸奶的质构和功能特性<sup>[17,31-34]</sup>以及营养价值,进而改善酸奶的品质。本文对添加TG酶后的凝固型酸奶的理化及色泽、气味、滋味等感官指标产生的变化进行了研究,为添加TG酶凝固型酸奶的生产提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

牛乳 天津市海河乳业有限公司;蔗糖 食品

级,CJ 第一制糖株式会社;乳酸菌 食品级,帝斯曼贸易(上海)有限公司;TG 酶(120 U/g) 食品级,上海领瀚科学仪器有限公司;MRS 琼脂 北京索莱宝科技有限公司;酚酞 上海麦克林生化科技有限公司。

FA25 均质机 上海弗鲁克流体机械制造有限公司; MCR301 型流变仪 奥地利安东帕中国有限公司; TA-XT plus 型质构仪 英国 SMS 公司; SIGMA 离心机 德国 Sigma 公司; Supcre G6R 全自动菌落计数仪 杭州迅数科技有限公司; IRIS VA400 电子眼、Astree 电子舌、Heracles II 电子鼻 法国 Alpha M.O.S 公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 凝固型酸奶的制备 称取一定量的原料奶,添加 6% 蔗糖,混合均匀后预热至 60 ℃ 左右,均质 10~15 min,然后进行热杀菌处理,90~95 ℃ 持续 10~15 min,杀菌结束后冷却至 43 ℃ 左右。按比例接种菌种,并添加 TG 酶,置于 43 ℃ 恒温培养箱中发酵。发酵完成后,将酸奶迅速冷却至 6 ℃ 左右,置于 4 ℃ 冷藏,后熟 18 h<sup>[35]</sup>。

TG 酶添加量的确定:按乳蛋白含量添加 TG 酶,使牛奶中 TG 酶浓度分别达到 1、2、3、4、5 U/(g 蛋白),以不加 TG 酶的样品作为对照。

#### 1.2.2 凝固型酸奶理化指标的测定

1.2.2.1 酸度的测定 依据 GB 5009.239-2016《食品安全国家标准 食品酸度的测定》中第一法酚酞指示剂法<sup>[36]</sup>测定酸奶酸度。依据 GB 19302-2010《食品安全国家标准 发酵乳》<sup>[37]</sup>中对发酵乳制品酸度的要求,确定酸奶的发酵终点。

1.2.2.2 粘度的测定 使用安东帕高级流变仪 MCR301,选择平板 pp50 系统,板间距为 1 mm,采用静态控制剪切速率模式(恒温),剪切速率范围为 1~100 l/s 线性变化<sup>[38]</sup>,测量温度 43 ℃。测定酸奶发酵过程及 4 ℃ 后熟 18 h 后的粘度。

1.2.2.3 硬度的测定 称取 60 g 样品置于相同的烧杯中,使用 TA-XT plus 质构仪,P/36R 的探头进行穿刺实验,测前速度:1.0 mm/s,测试速度:1.5 mm/s,测后速度:10.0 mm/s,压缩距离:3 mm,感应力:Auto-2 g<sup>[39-41]</sup>。

1.2.2.4 持水性的测定 称取 30 g 样品置于 50 mL 离心管中, 在 4000 r/min 离心 15 min, 静置 10 min 后, 弃去上清液。按照公式(1)进行计算<sup>[42-43]</sup>。

$$\text{持水性}(\%) = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

式中:  $m_0$  表示离心管质量, g;  $m_1$  为离心前样品和离心管总质量, g;  $m_2$  为离心弃上清液后样品和离心管质量, g。

1.2.3 乳酸菌活菌数的测定 采用 MRS 琼脂培养基<sup>[44]</sup> 测定酸奶的乳酸菌的数量。

#### 1.2.4 凝固型酸奶感官指标的测定

1.2.4.1 色泽的测定 将 IRIS VA400 电子眼使用黑色背景板校准, 将 20 g 样品倒入透明培养皿中, 对样品逐个采集图像<sup>[45]</sup>, 每个样品采集 3 次图像, 使用 Alpha Soft V14.2 软件进行图片处理及数据分析。

1.2.4.2 滋味的测定 将样品稀释 1 倍放于 Astree 电子舌专用测试杯(25 mL)中, 采用 AHS(酸味)、ANS(甜味)、CTS(咸味)、NMS(鲜味)、SCS(苦味)、PKS(通用型)和 CPS(通用型) 7 根传感器, 经活化、校正后检测样品滋味<sup>[46]</sup>。每个样品测定 3 次, 采用 Alpha Soft V14.2 软件处理检测结果。

1.2.4.3 气味的测定 精确称取 7 g 样品置于 30 mL 顶空瓶中, 使用 Heracles II 电子鼻进行检测, 顶空进样参数: 50 °C 下孵化 10 min, 振荡速度为 500 r/min。进样量为 5000 μL, 注射时速度为 125 μL/s, 进样口温度为 200 °C、压力为 10 kPa、流速为 30 mL/min, 注射时间为 45 s。捕集阱参数: 捕集温度为 40 °C, 分流 10 mL/min, 捕集时间为 50 s, 最终温度为 240 °C。柱温参数: 初始温度 50 °C, 程序升温以 1.0 °C/s 速率升温至 80 °C, 然后以 3 °C/s 速率升温至 250 °C; 数据采集时间为 110 s。检测器参数: 检测器温度为 260 °C<sup>[47]</sup>。每个样品测定 3 次, 使用 Alpha Soft V14.2 软件对所得数据进行处理与分析。

1.2.4.4 感官评价 依据 RHB 103-2004《酸牛乳感官质量评鉴细则》<sup>[48]</sup> 对样品进行感官评价, 酸奶的感官评分标准见表 1。

#### 1.3 数据处理

每个样品测定 3 次取平均值, 采用 origin 2008 作图, SPSS 软件分析显著性差异, Alpha Soft V14.2 进行主成分分析。

### 2 结果与分析

#### 2.1 添加 TG 酶对凝固型酸奶理化指标的影响

2.1.1 TG 酶添加量对酸奶酸度的影响 酸奶的发酵终点通过检测发酵乳制品的酸度( $\geq 70^{\circ}\text{T}$ )以及凝固状态来确定。由图 1 可知, 在发酵温度为 43 °C 的条件下, 添加 TG 酶的凝固型酸奶与普通凝固型酸奶达到发酵终点的时间均为 5 h, 不同酸奶在发酵结束后, 酸度在 71.12~73.64 °T 范围内, 均达到 70 °T, 符合国标中对发酵乳制品酸度的要求, 且酸奶的凝固状态较好。

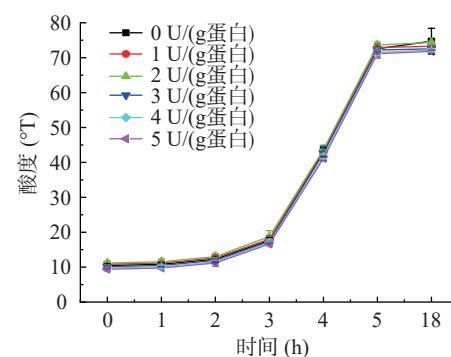


图 1 普通酸奶和添加 TG 酶的酸奶在发酵过程中酸度变化

Fig.1 Changes in acidity of plain yogurt and yogurt with TG enzyme during fermentation

添加 TG 酶的凝固型酸奶和普通凝固型酸奶在发酵过程中酸度变化如图 1 所示, 对比相同发酵时间下添加 TG 酶的凝固型酸奶与普通凝固型酸奶, 酸

表 1 酸奶的感官评分标准

Table 1 Sensory score standard of yogurt

项目	评分标准	评分范围(分)
色泽(10分)	呈均匀乳白色, 颜色均匀有光泽	8~10
	淡黄色	6~7
	浅灰色或者灰白色	4~5
	绿色、黑色斑点或有霉菌生长、异常颜色	0~3
滋味和气味(40分)	具有酸牛乳固有滋味和气味, 酸味和甜味比例适当	35~40
	过酸或过甜	20~34
	有涩味	10~19
	有苦味	5~9
	异常滋味或气味	0~4
组织状态(50分)	组织细腻、均匀、表面光滑、无裂纹、无气泡、无乳清析出	40~50
	组织细腻、均匀、表面光滑、无气泡、有少量乳清析出	30~39
	组织粗糙、有裂纹、无气泡、有少量乳清析出	20~29
	组织粗糙、有裂纹、有气泡、乳清析出	10~19
	组织粗糙、有裂纹、有大量气泡、乳清析出严重、有颗粒	0~9

奶酸度的变化趋势相同, 0~3 h 酸奶的酸度缓慢上升, 在 3 h 后, 酸度显著上升, 酸度曲线呈指数函数曲线形式。

由图 2 可知, 到达发酵终点 5 h 时, 普通凝固型酸奶的酸度为 72.56 °T, TG 酶添加量为 1、2、3、4、5 U/(g 蛋白) 的凝固型酸奶酸度分别为 72.93、73.64、72.20、71.48、71.12 °T, 添加 TG 酶的凝固型酸奶酸度与普通凝固型酸奶的酸度无显著性差异 ( $P>0.05$ )。当 TG 酶添加量为 1~2 U/(g 蛋白) 时, 酸奶的酸度随着 TG 酶添加量的增大而升高, TG 酶添加量为 2 U/(g 蛋白) 时酸度最大, 这是由于适量的 TG 酶可以促进保加利亚乳杆菌产酸, 提高了酸奶的酸度<sup>[49]</sup>; 当 TG 酶添加量为 3~5 U/(g 蛋白) 时, 酸奶的酸度随着 TG 酶添加量的增大反而降低, 且低于未添加 TG 酶的普通凝固型酸奶的酸度, 这可能是由于 TG 酶催化乳蛋白中谷氨酰胺残基与赖氨酸残基发生酰基转移反应, 形成谷氨酰胺-赖氨酸异构肽和 NH<sub>3</sub>, 而 NH<sub>3</sub> 能中和酸奶发酵过程中生成的乳酸, 使酸奶的酸度降低<sup>[26]</sup>。

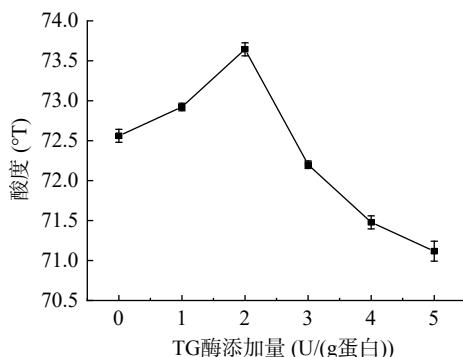


图 2 发酵结束 5 h 时添加 TG 酶酸奶酸度的变化

Fig.2 Acidity change of yogurt with TG enzyme at the end of fermentation for 5 h

酸奶在 4 °C 条件下后熟 18 h, 普通凝固型酸奶的酸度为 74.73 °T, TG 酶添加量为 1、2、3、4、5 U/(g 蛋白) 的凝固型酸奶的酸度分别为 73.28、74.36、72.56、72.20、71.84 °T, 添加 TG 酶的凝固型酸奶酸度与普通凝固型酸奶的酸度无显著差异 ( $P>0.05$ )。经过后熟的酸奶比刚刚发酵完成的酸奶酸度均略有升高, 可能是由于酸奶的后酸化作用<sup>[50]</sup>。添加 TG 酶的凝固型酸奶后酸化较弱, 可能与蛋白质交联时利用乳中的多肽或氨基酸, 导致乳酸菌生长所需营养物质不足有关, 菌体生长缓慢, 产酸较少<sup>[51]</sup>。因此, 添加 TG 酶可以有效抑制酸奶的后酸化。

**2.1.2 TG 酶添加量对酸奶粘度的影响** 添加 TG 酶的凝固型酸奶和普通凝固型酸奶在发酵过程中粘度变化如图 3 所示。相同发酵条件下的添加 TG 酶的凝固型酸奶与普通凝固型酸奶, 前 3 h 粘度基本保持不变, 3 h 后粘度均显著上升 ( $P<0.05$ )。

到达发酵终点 5 h 时(图 4), 普通凝固型酸奶的粘度为 520 mPa·s, TG 酶添加量为 1、2、3、4、

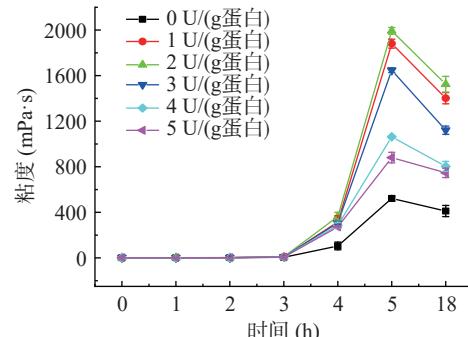


图 3 普通酸奶和添加 TG 酶的酸奶在发酵过程中粘度变化

Fig.3 Viscosity changes of plain yogurt and yogurt with TG enzyme during fermentation

5 U/(g 蛋白) 的凝固型酸奶的粘度分别为 1880、1990、1650、1060、880 mPa·s, 添加 TG 酶会使凝固型酸奶粘度显著增大 ( $P<0.05$ )。当 TG 酶添加量为 1~2 U/(g 蛋白) 时, 酸奶的粘度随着 TG 酶添加量的增大而升高, TG 酶添加量为 2 U/(g 蛋白) 时粘度最大, 比普通凝固型酸奶的粘度高 1470 mPa·s, 这是由于 TG 酶增强了蛋白质凝胶网络结构, 使得酸奶的粘度增大<sup>[52]</sup>。当 TG 酶添加量为 3~5 U/(g 蛋白) 时, 酸奶的粘度随着 TG 酶添加量的增大反而降低, 这可能是由于 TG 酶添加量过多, 导致蛋白质凝胶网络结构过于紧密, 在一定程度上抑制了乳酸菌的生长<sup>[53]</sup>, 反而使酸奶的粘度逐渐降低, 但仍然要比未添加 TG 酶的普通凝固型酸奶粘度大。

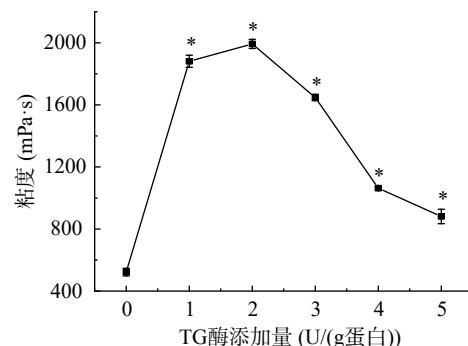


图 4 发酵终点 5 h 时添加 TG 酶酸奶粘度变化

Fig.4 Viscosity change of yogurt with TG enzyme at the end of fermentation for 5 h

注: \*表示与普通凝固型酸奶相比有显著性差异 ( $P<0.05$ ); 图 6、图 7 同。

酸奶在 4 °C 的条件下后熟 18 h, 测得普通凝固型酸奶的粘度为 410 mPa·s, TG 酶添加量为 1、2、3、4、5 U/(g 蛋白) 凝固型酸奶的粘度分别为 1400、1520、1120、800、750 mPa·s, 添加 TG 酶会使凝固型酸奶粘度显著增大 ( $P<0.05$ )。经过后熟的酸奶比刚刚发酵完成的酸奶粘度都略有降低, 其原因可能是滴定酸度上升, 酸奶的酸性环境增强, 导致酸奶中原有的部分凝胶结构发生变化, 从而酸奶的粘度降低<sup>[54]</sup>。

**2.1.3 TG 酶添加量对酸奶硬度的影响** 添加 TG 酶

的凝固型酸奶和普通凝固型酸奶在发酵过程中硬度变化如图 5 所示。相同发酵条件下添加 TG 酶的凝固型酸奶与普通凝固型酸奶, 前 3 h 硬度基本保持不变, 3 h 后硬度均显著上升 ( $P<0.05$ )。到达发酵终点 5 h 时(图 6), 普通凝固型酸奶的硬度为 100 g, TG 酶添加量为 1、2、3、4、5 U/(g 蛋白) 的凝固型酸奶的硬度分别为 237、248、139、132、125 g, 添加 TG 酶会使酸奶硬度显著增大 ( $P<0.05$ )。当 TG 酶添加量为 1~2 U/(g 蛋白) 时, 酸奶的硬度随着 TG 酶添加量的增大而升高, TG 酶添加量为 2 U/(g 蛋白) 时硬度最大, 比普通凝固型酸奶的硬度高 148 g, 这是由于 TG 酶通过催化 $\epsilon$ - $(\gamma$ -谷氨酰) 赖氨酸生成交联蛋白, 提高了酸奶的硬度<sup>[55]</sup>。当 TG 酶添加量为 3~5 U/(g 蛋白) 时, 酸奶的硬度随着 TG 酶添加量的增大反而降低, 这可能是由于 TG 酶添加量过多, 导致蛋白质凝胶网络结构过于紧密, 影响了 TG 酶进一步诱导蛋白质发生交联<sup>[52]</sup>, 反而使酸奶的硬度逐渐降低, 但仍然要比未添加 TG 酶的普通凝固型酸奶硬度大。

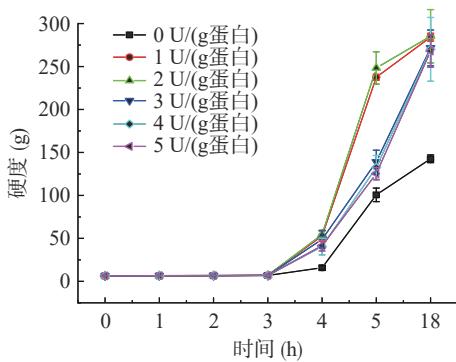


图 5 普通酸奶和添加 TG 酶的酸奶在发酵过程中硬度变化  
Fig.5 Hardness changes of plain yogurt and yogurt added with TG enzyme during fermentation

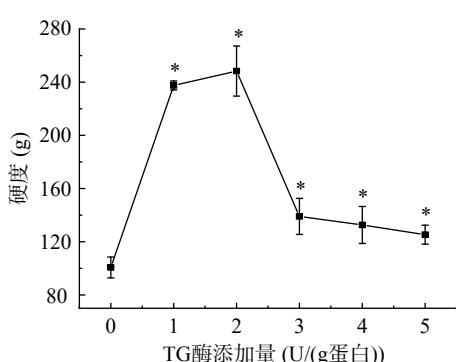


图 6 发酵终点 5 h 时添加 TG 酶的酸奶硬度变化  
Fig.6 Hardness change of yogurt with TG enzyme at the end of fermentation for 5 h

酸奶在 4 °C 的条件下后熟 18 h, 测定的普通凝固型酸奶的硬度为 142 g, TG 酶添加量为 1、2、3、4、5 U/(g 蛋白) 的凝固型酸奶的硬度分别为 284、285、271、169、168 g, 添加 TG 酶会使凝固型酸奶硬度显著增大 ( $P<0.05$ )。经过后熟的酸奶比刚刚发酵完成的酸奶硬度均增大, 这是由于在后熟过程中乳酸菌的缓慢增长<sup>[50]</sup>, 使得酸奶的凝胶结构进一步发生变

化, 从而导致酸奶硬度的变化。

**2.1.4 TG 酶添加量对酸奶持水性的影响** 添加 TG 酶的凝固型酸奶和普通凝固型酸奶在到达发酵终点时的持水性如图 7 所示。普通凝固型酸奶的持水性为 62.08%, TG 酶添加量为 1、2、3、4、5 U/(g 蛋白) 的凝固型酸奶的持水性分别为 76.35%、92.03%、92.35%、94.46%、95.78%, 持水性随着 TG 酶添加量的增大而提高。当 TG 酶添加量为 1 U/(g 蛋白) 时, 与不添加 TG 酶的普通凝固型酸奶持水性无显著性差异 ( $P>0.05$ ); 当 TG 酶添加量为 2~5 U/(g 蛋白) 时, 与普通凝固型酸奶持水性有显著性差异 ( $P<0.05$ )。持水性是指酸奶凝胶保持水分的能力, 表示酸奶中乳清在凝胶中的分离程度, 持水性越低, 酸奶凝胶中水分越易析出, 提高持水性有利于增加酸奶的凝胶特性。随着 TG 酶添加量的增大, 蛋白质胶粒网络结构增强, 对水分的包容、束缚能力增强, 使凝胶网络中的水分不易析出, 增强了酸奶的持水力<sup>[56]</sup>。

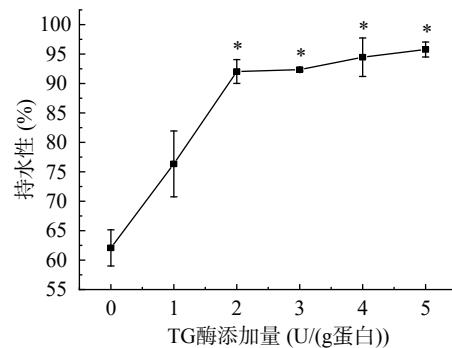


图 7 发酵终点 5 h 时添加 TG 酶的酸奶持水性变化  
Fig.7 Changes of water holding capacity of yogurt with TG enzyme at the end of fermentation for 5 h

## 2.2 添加 TG 酶对凝固型酸奶乳酸菌活菌数的影响

添加 TG 酶的凝固型酸奶和普通凝固型酸奶在发酵过程中乳酸菌活菌数的变化如图 8 所示, 相同发酵条件下的添加 TG 酶的凝固型酸奶与普通凝固型酸奶, 0~2 h 的活菌数均上升缓慢, 在 3 h 后活菌数均显著上升 ( $P<0.05$ ), 活菌数曲线呈指数函数曲线形式。

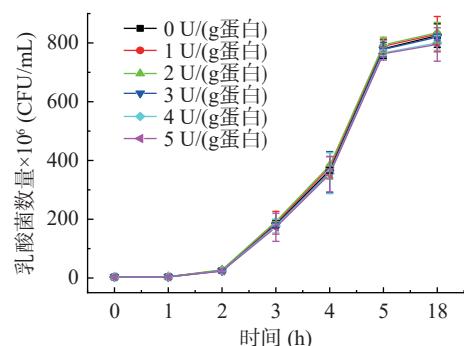


图 8 普通酸奶和添加 TG 酶的酸奶在发酵过程中乳酸菌活菌数变化  
Fig.8 Changes of viable number of lactic acid bacteria in plain yogurt and yogurt with TG enzyme during fermentation

由图 9 可知, 到达发酵终点 5 h 时, 普通凝固型酸奶的活菌数为  $7.80 \times 10^8$  CFU/mL, TG 酶添加量为 1、2、3、4、5 U/(g 蛋白) 的凝固型酸奶的活菌数分别为  $7.88 \times 10^8$ 、 $7.93 \times 10^8$ 、 $7.78 \times 10^8$ 、 $7.66 \times 10^8$ 、 $7.63 \times 10^8$  CFU/mL, 添加 TG 酶的凝固型酸奶的活菌数与普通凝固型酸奶的活菌数无显著性差异( $P > 0.05$ )。酸奶在 4 ℃ 的条件下后熟 18 h, 测定的普通凝固型

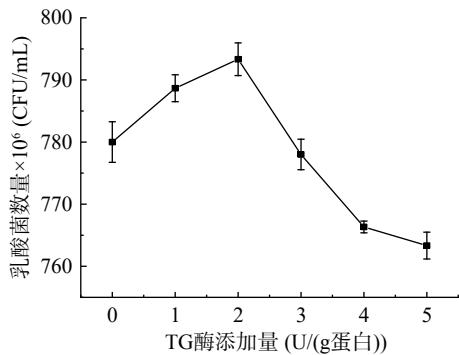


图 9 发酵终点 5 h 时添加 TG 酶的酸奶乳酸菌活菌数变化

Fig.9 Changes of viable bacteria number of yogurt with TG enzyme at the end of fermentation for 5 h

酸奶中的活菌数为  $8.25 \times 10^8$  CFU/mL, TG 酶添加量为 1、2、3、4、5 U/(g 蛋白) 的凝固型酸奶活菌数分别为  $8.30 \times 10^8$ 、 $8.35 \times 10^8$ 、 $8.20 \times 10^8$ 、 $8.00 \times 10^8$ 、 $7.95 \times 10^8$  CFU/mL, 添加 TG 酶的凝固型酸奶的活菌数与普通凝固型酸奶的活菌数无显著性差异( $P > 0.05$ )。该结果与发酵产酸(图 1)类似。

### 2.3 添加 TG 酶对凝固型酸奶感官指标的影响

#### 2.3.1 不同 TG 酶添加量对酸奶色泽的影响

2.3.1.1 添加 TG 酶的凝固型酸奶与普通酸奶发酵过程中的色号变化 添加 TG 酶的凝固型酸奶和普通凝固型酸奶在发酵过程中色泽变化如图 10 所示。对比添加 TG 酶的凝固型酸奶和普通凝固型酸奶, TG 酶添加量不同, 色号比例的变化趋势相同, 4095 色号(白色)一直占主体地位。在发酵过程中 4095 色号比例随发酵时间增加有所降低, 4094 色号(黄白色)比例则随发酵时间增加有所上升, 但无显著性变化( $P > 0.05$ )。在发酵结束后, 4095 色号占比均在 85% 以上, 差值在 2% 以内, 且随着 TG 酶添加量的增大占比略有降低, 但与普通凝固型酸奶无显著性

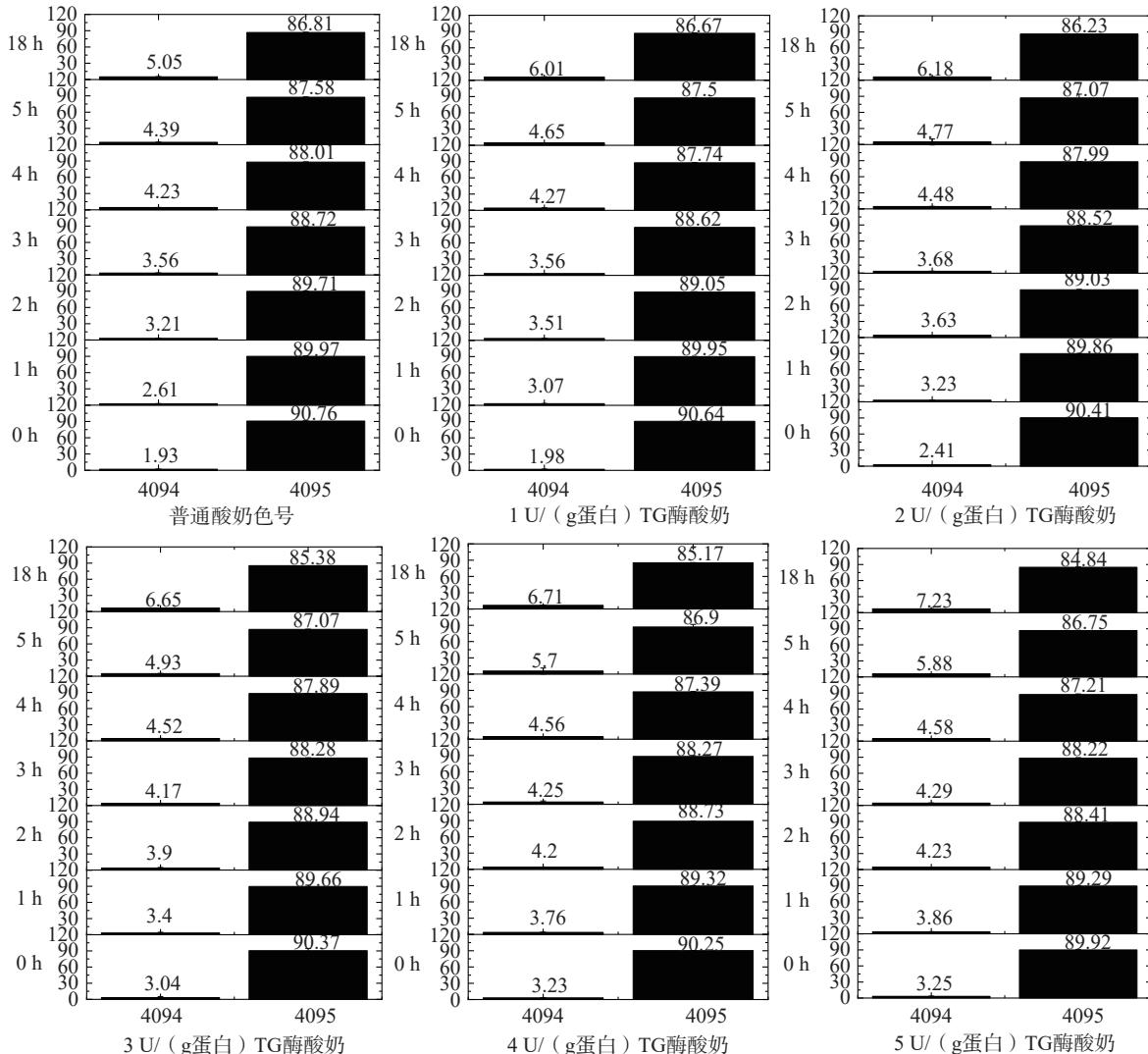


图 10 普通酸奶和添加 TG 酶的酸奶色泽随发酵时间的变化

Fig.10 Changes of color of plain yogurt and yogurt added with TG enzyme with fermentation time

差异( $P>0.05$ )。

**2.3.1.2 发酵前后添加 TG 酶的凝固型酸奶与普通酸奶的色泽主成分分析** 图 11 为添加 TG 酶的凝固型酸奶和普通凝固型酸奶在发酵 0 h 的色泽主成分分析图, 主成分 1(87.582%) 与主成分 2(11.46%) 之和大于 95%, 识别指数(-1) 小于 85。因此, 发酵 0 h 的添加 TG 酶的凝固型酸奶与普通凝固型酸奶的色泽之间无显著性差异( $P>0.05$ ), 说明添加 TG 酶不会引起调配后样品颜色变化。

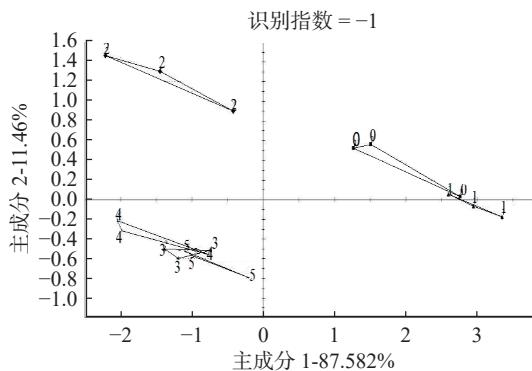


图 11 发酵 0 h 普通酸奶及 TG 酶酸奶色泽主成分分析  
Fig.11 Principal component analysis of color of plain yoghurt and TG enzyme yoghurt fermented for 0 h

注: 0 为普通凝固型酸奶(未添加 TG 酶), 1~5 分别为 TG 酶添加量为 1~5 U/(g 蛋白)的凝固型酸奶; 图 12~图 28 同。

图 12 为添加不同量 TG 酶, 在发酵 0 h 的调配样品色泽主成分分析图, 主成分 1(88.255%) 与主成分 2(10.852%) 之和大于 95%, 识别指数(-1) 小于 85, 添加不同量 TG 酶, 调配后样品的色泽无显著性差异( $P>0.05$ )。

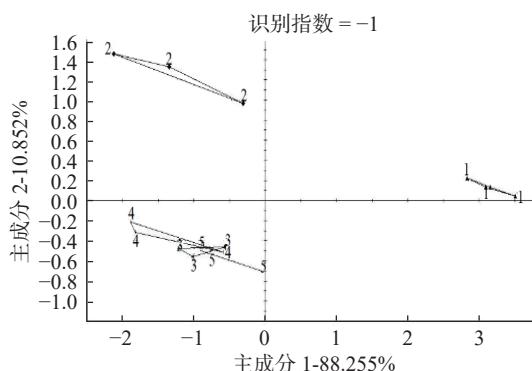


图 12 发酵 0 h TG 酶酸奶色泽主成分分析  
Fig.12 Principal component analysis of color of TG enzyme yoghurt fermented for 0 h

图 13 为添加 TG 酶的凝固型酸奶和普通凝固型酸奶发酵 5 h 的主成分分析图, 主成分 1(89.485%) 与主成分 2(9.259%) 之和大于 95%, 识别指数(-0.3) 小于 85, 故发酵 5 h 的添加 TG 酶的凝固型酸奶与普通凝固型酸奶的色泽之间无显著性差异( $P>0.05$ )。

图 14 为不同 TG 酶添加量的凝固型酸奶在发酵 5 h 的色泽主成分分析图, 主成分 1(88.326%) 与主成分 2(10.621%) 之和大于 95%, 识别指数(-0.0005)

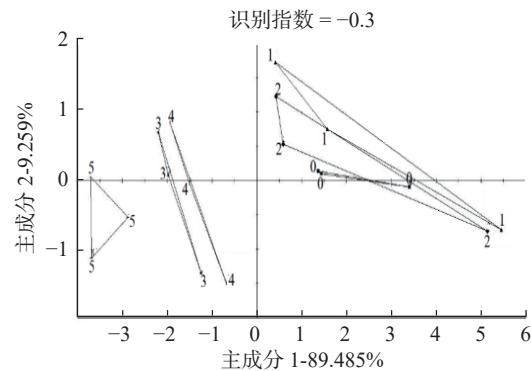


图 13 发酵 5 h 普通酸奶及 TG 酶酸奶色泽主成分分析  
Fig.13 Principal component analysis of color of plain yoghurt and TG enzyme yoghurt fermented for 5 h

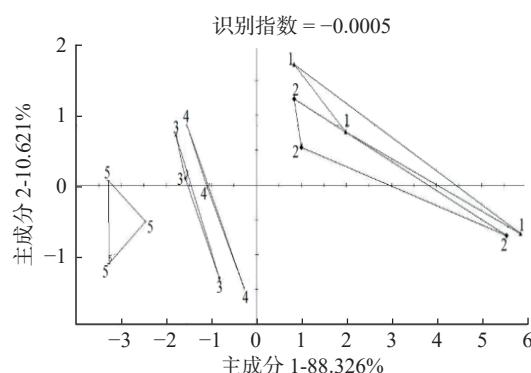


图 14 发酵 5 h TG 酶酸奶色泽主成分分析  
Fig.14 Principal component analysis of color of TG enzyme yoghurt fermented for 5 h

小于 85, 故发酵 5 h 不同 TG 酶添加量的凝固型酸奶的色泽无显著性差异( $P>0.05$ )。

图 15 为添加 TG 酶的凝固型酸奶和普通凝固型酸奶在发酵结束后 4 °C 后熟 18 h 的色泽主成分分析图, 主成分 1(93.976%) 与主成分 2(4.319%) 之和大于 95%, 识别指数(-33) 小于 85, 添加 TG 酶的凝固型酸奶与普通凝固型酸奶的色泽之间无显著性差异( $P>0.05$ )。

图 16 为不同 TG 酶添加量的凝固型酸奶在发酵结束后 4 °C 后熟 18 h 的色泽主成分分析图, 主成

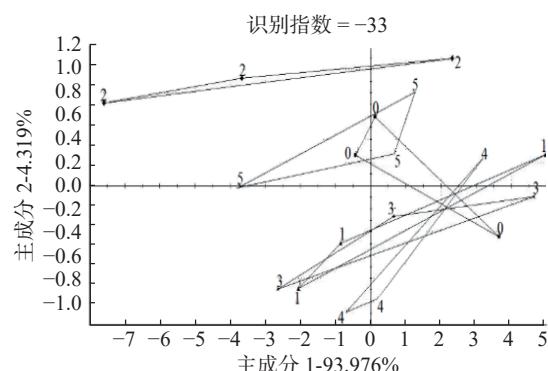


图 15 发酵结束后 4 °C 后熟 18 h 的普通酸奶及 TG 酶酸奶色泽主成分分析  
Fig.15 Principal component analysis of color of plain yogurt and TG enzyme yogurt ripened at 4 °C for 18 h after fermentation

分 1(88.326%) 与主成分 2(10.621%) 之和大于 95%, 识别指数(-0.0005)

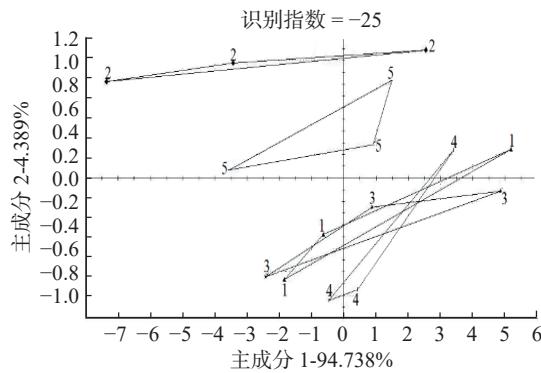


图 16 发酵结束后 4 ℃ 后熟 18 h 的 TG 酶酸奶色泽主成分分析

Fig.16 Principal component analysis of color of TG enzyme yogurt ripened at 4 °C for 18 h after fermentation

分 1(94.738%)与主成分 2(4.389%)之和大于 95%，识别指数(-25)小于 85，故不同 TG 酶添加量的凝固型酸奶的色泽无显著性差异( $P>0.05$ )。

在添加 TG 酶的凝固型酸奶和普通凝固型酸奶的整个发酵过程中，色泽均无显著性差异( $P>0.05$ )。因此，在实验范围内，TG 酶添加量不会引起酸奶色泽的变化。

**2.3.2 不同 TG 酶添加量对酸奶滋味的影响** 滋味由酸味、咸味、鲜味、甜味和苦味组合而成，主要与酸奶中非挥发性物质的组成和含量有关<sup>[47]</sup>，电子舌能够反映不同样品滋味方面的差异。图 17 为添加 TG 酶的凝固型酸奶和普通凝固型酸奶在发酵 0 h 的滋味主成分分析图，主成分 1(98.399%)与主成分 2(0.9403%)之和大于 95%，识别指数(91)大于 85，故发酵 0 h 的添加 TG 酶的凝固型酸奶与普通凝固型酸奶的滋味之间有显著性差异( $P<0.05$ )。

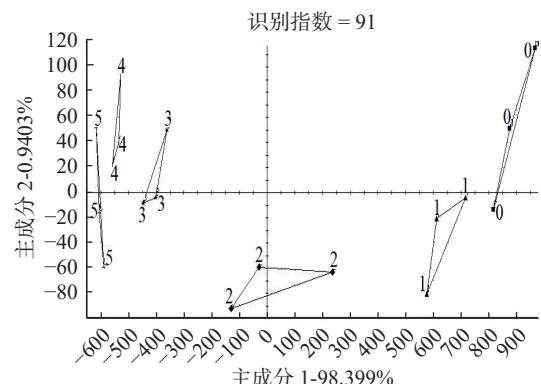


图 17 发酵 0 h 普通酸奶及 TG 酶酸奶滋味主成分分析

Fig.17 Principal component analysis of taste of plain yoghurt and TG enzyme yoghurt fermented for 0 h

图 18 为不同 TG 酶添加量的凝固型酸奶在发酵 0 h 的滋味主成分分析图，主成分 1(98.238%)与主成分 2(1.138%)之和大于 95%，识别指数(91)大于 85，故发酵 0 h 的不同 TG 酶添加量的凝固型酸奶的滋味之间有显著性差异( $P<0.05$ )。0 h 添加 TG 酶的凝固型酸奶和普通凝固型酸奶的滋味存在显著性差异( $P<0.05$ )，其可能是由于 TG 酶自身的味

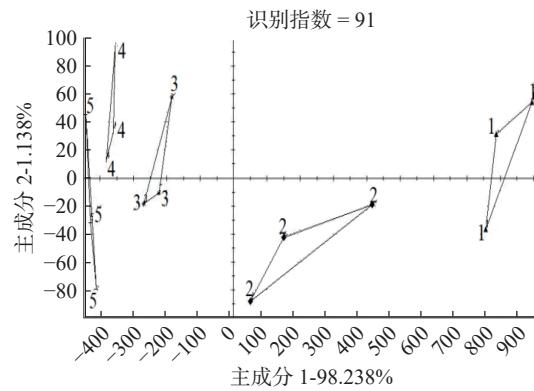


图 18 发酵 0 h TG 酶酸奶滋味主成分分析

Fig.18 Principal component analysis of taste of TG enzyme yoghurt fermented for 0 h

道，从而使酸奶的滋味发生一定程度的变化。

图 19 为添加 TG 酶的凝固型酸奶和普通凝固型酸奶在发酵 5 h 的滋味主成分分析图，主成分 1(98.334%)与主成分 2(0.9932%)之和大于 95%，识别指数(-0.08)小于 85，故发酵 5 h 的添加 TG 酶的凝固型酸奶与普通凝固型酸奶的滋味之间无显著性差异( $P>0.05$ )。

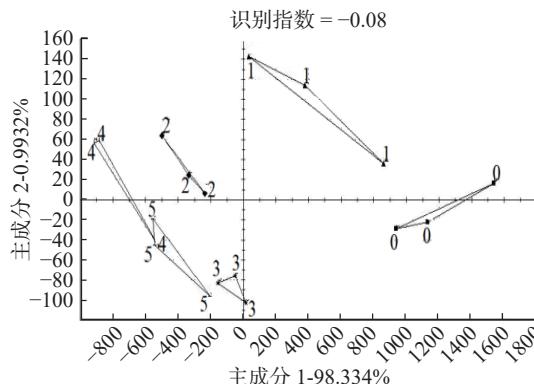


图 19 发酵 5 h 普通酸奶及 TG 酶酸奶滋味主成分分析

Fig.19 Principal component analysis of taste of plain yoghurt and TG enzyme yoghurt fermented for 5 h

图 20 为不同 TG 酶添加量的凝固型酸奶在发酵 5 h 的滋味主成分分析图，主成分 1(96.518%)与主成分 2(2.662%)之和大于 95%，识别指数(-0.07)小于 85，故发酵 5 h 的不同 TG 酶添加量的凝固型酸奶的滋味之间无显著性差异( $P>0.05$ )。

图 21 为添加 TG 酶的凝固型酸奶和普通凝固型酸奶在发酵结束后 4 ℃ 后熟 18 h 的滋味主成分分析图，主成分 1(65.881%)与主成分 2(25.211%)之和大于 90%，识别指数(-0.001)小于 85，故添加 TG 酶的凝固型酸奶与普通凝固型酸奶的滋味之间无显著性差异( $P>0.05$ )。

图 22 为不同 TG 酶添加量的凝固型酸奶在发酵结束后 4 ℃ 后熟 18 h 的滋味主成分分析图，主成分 1(68.235%)与主成分 2(29.733%)之和大于 95%，识别指数(-0.002)小于 85，故不同 TG 酶添加量的凝固型酸奶的滋味之间无显著性差异( $P>0.05$ )。

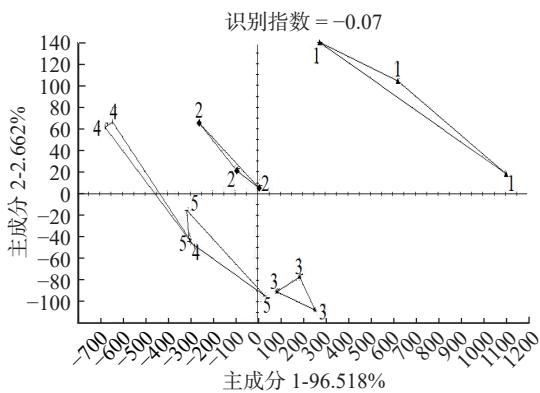


图 20 发酵 5 h TG 酶酸奶滋味主成分分析

Fig.20 Principal component analysis of taste of TG enzyme yoghurt fermented for 5 h

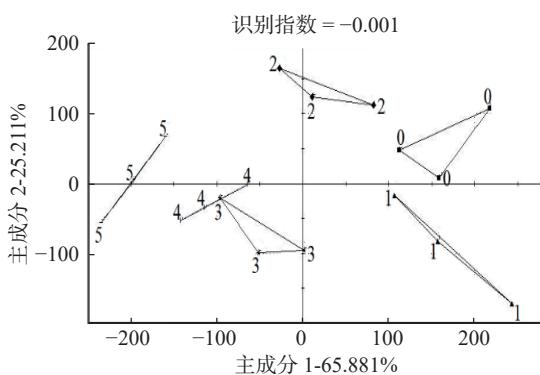


图 21 发酵结束后 4 °C 后熟 18 h 的普通酸奶及 TG 酶酸奶滋味主成分分析

Fig.21 Principal component analysis of taste of plain yogurt and TG enzyme yogurt ripened at 4 °C for 18 h after fermentation

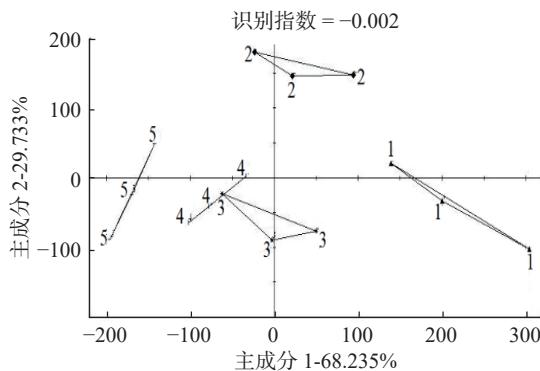


图 22 发酵结束后 4 °C 后熟 18 h 的 TG 酶酸奶滋味主成分分析

Fig.22 Principal component analysis of taste of TG enzyme yoghurt ripened at 4 °C for 18 h after fermentation

发酵结束后添加 TG 酶的凝固型酸奶与普通凝固型酸奶的滋味不再存在显著性差异( $P>0.05$ )，其原因可能是在发酵后，酸奶产酸、产香的提高，减弱或掩盖了发酵前的原料滋味。

**2.3.3 不同 TG 酶添加量对酸奶气味的影响** 电子鼻可以灵敏地测定样品中的挥发性物质<sup>[57]</sup>，图 23 为添加 TG 酶的凝固型酸奶和普通凝固型酸奶在发酵 0 h 的气味主成分分析图。主成分 1(76.783%)和主

成分 2(15.597%)之和大于 90%，识别指数(-45)小于 85，故发酵 0 h 的添加 TG 酶的凝固型酸奶与普通凝固型酸奶的气味之间无显著性差异( $P>0.05$ )。

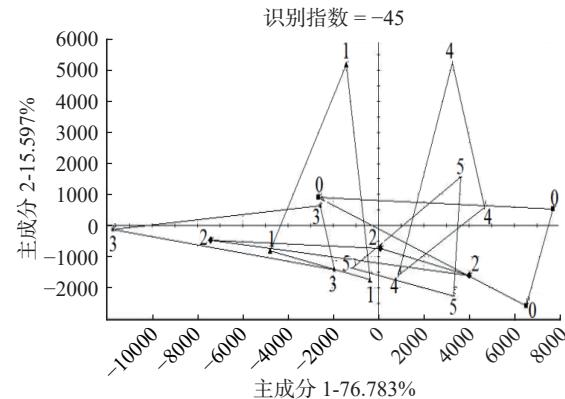


图 23 发酵 0 h 普通酸奶及 TG 酶酸奶气味主成分分析

Fig.23 Principal component analysis of odor of plain yoghurt and TG enzyme yoghurt fermented for 0 h

图 24 为不同 TG 酶添加量的凝固型酸奶在发酵 0 h 的气味主成分分析图，主成分 1(72.609%)和主成分 2(18.424%)之和大于 90%，识别指数(-40)小于 85，故发酵 0 h，不同量的 TG 酶之间不会引起气味的显著性差异( $P>0.05$ )。

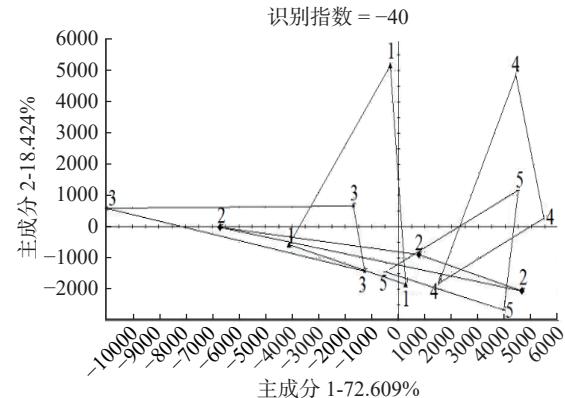


图 24 发酵 0 h TG 酶酸奶气味主成分分析

Fig.24 Principal component analysis of odor of TG enzyme yoghurt fermented for 0 h

图 25 为添加 TG 酶的凝固型酸奶和普通凝固型酸奶在发酵 5 h 的气味主成分分析图，主成分 1(89.453%)和主成分 2(6.231%)之和大于 95%，识别指数(-0.7)小于 85。因此，发酵 5 h 的添加 TG 酶的凝固型酸奶与普通凝固型酸奶的气味之间无显著性差异( $P>0.05$ )。

图 26 为不同 TG 酶添加量的凝固型酸奶在发酵 5 h 的气味主成分分析图，主成分 1(87.568%)和主成分 2(8.017%)之和大于 95%，识别指数(-0.4)小于 85，故发酵 5 h 的不同 TG 酶添加量的凝固型酸奶的气味之间无显著性差异( $P>0.05$ )。

图 27 为添加 TG 酶的凝固型酸奶和普通凝固型酸奶在发酵结束后 4 °C 后熟 18 h 的气味主成分分析图。主成分 1(68.886%)和主成分 2(25.753%)

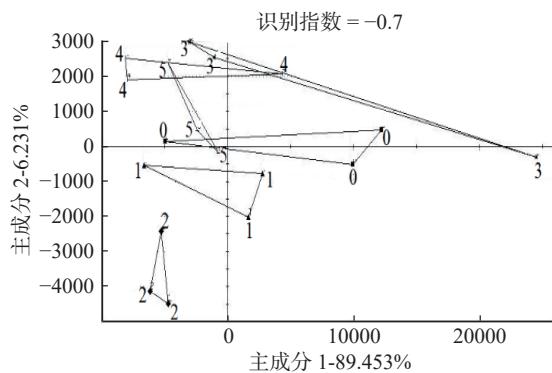


图 25 发酵 5 h 普通酸奶及 TG 酶酸奶气味主成分分析

Fig.25 Principal component analysis of odor of plain yoghurt and TG enzyme yoghurt fermented for 5 h

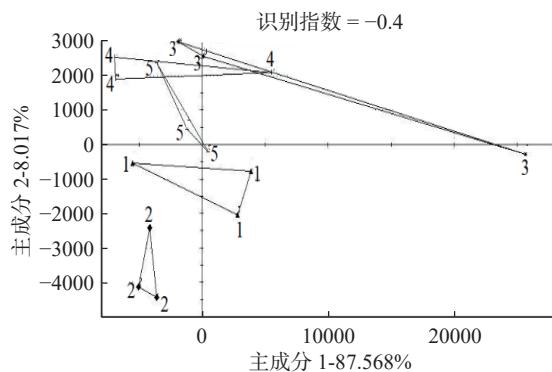


图 26 发酵 5 h TG 酶酸奶气味主成分分析

Fig.26 Principal component analysis of odor of TG enzyme yoghurt fermented for 5 h

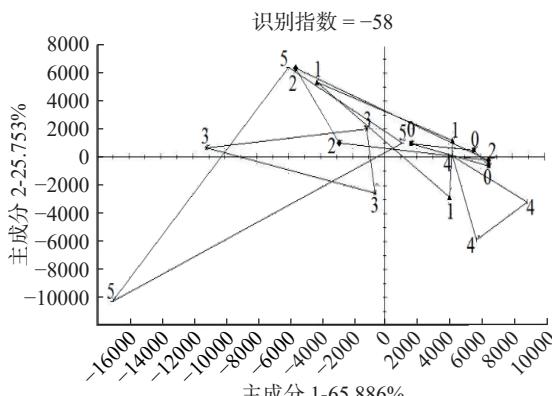


图 27 发酵结束后 4 °C 后熟 18 h 的普通酸奶及 TG 酶酸奶气味主成分分析

Fig.27 Principal component analysis of odor of plain yogurt and TG enzyme yogurt ripened at 4 °C for 18 h after fermentation

之和大于 90%，识别指数（-58）小于 85，故添加 TG 酶的凝固型酸奶与普通凝固型酸奶的气味之间

无显著性差异( $P>0.05$ )。

图 28 为不同 TG 酶添加量的凝固型酸奶在发酵结束后 4 °C 后熟 18 h 的气味主成分分析图，主成分 1(64.2%) 和主成分 2(25.9%) 之和大于 90%，识别指数（-52）小于 85，故不同 TG 酶添加量的凝固型酸奶的气味之间无显著性差异( $P>0.05$ )。

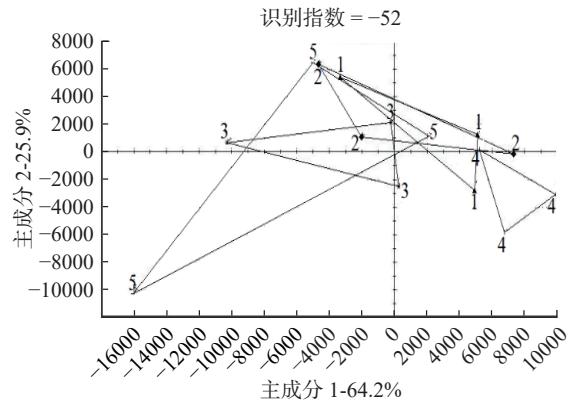


图 28 发酵结束后 4 °C 后熟 18 h 的 TG 酶酸奶气味主成分分析

Fig.28 Principal component analysis of odor of TG enzyme yogurt ripened at 4 °C for 18 h after fermentation

在添加 TG 酶的凝固型酸奶和普通凝固型酸奶的整个发酵过程中，气味均无显著性差异( $P>0.05$ )。因此，在实验范围内，TG 酶添加量不会引起酸奶气味的变化。

**2.3.4 感官评价** 感官评价包括对产品的色泽、滋味与气味、组织状态及喜爱程度的评价<sup>[57]</sup>，通过对品评数据进行分析可较为直观地知晓产品所存在的优缺点并判断最优指数，是产品发展中不可或缺的一环。对添加 TG 酶的凝固型酸奶和普通凝固型酸奶的感官评分见表 2，经 10 人品评打分后取平均值。

经品评发现，TG 酶添加量为 2 U/(g 蛋白)时最受喜爱。酸奶色泽呈均匀乳白色，有光泽；具有酸牛乳固有的滋味和气味，酸味和甜味比例适当；组织细腻、均匀，表面光滑、无裂纹、无气泡、无乳清析出。

### 3 结论

在相同工艺和参数条件下，制备添加 TG 酶的凝固型酸奶和普通凝固型酸奶（未添加 TG 酶），在酸度、活菌数、色泽、滋味、气味等方面均无显著性差异( $P>0.05$ )；添加 TG 酶的凝固型酸奶与普通凝固型酸奶相比，在粘度、硬度和持水性方面显著提高( $P<0.05$ )；经感官评价，在实验范围内，TG 酶添加量为

表 2 酸奶感官评分结果

Table 2 Sensory score results of yogurt

项目	普通酸奶得分	1 U/(g蛋白)酸奶得分	2 U/(g蛋白)酸奶得分	3 U/(g蛋白)酸奶得分	4 U/(g蛋白)酸奶得分	5 U/(g蛋白)酸奶得分
色泽(10分)	7	8	9	8	8	8
滋味和气味(40分)	35	36	38	37	36	35
组织状态(50分)	38	44	48	46	44	42
总分(100分)	80	88	95	91	88	85

2 U/(g 蛋白)更有利于提高凝固型酸奶的品质。因此,添加适量 TG 酶有利于凝固型酸奶品质的提高。

研究发现, TG 酶添加量对凝固性酸奶品质有较大影响,但其影响方式以及添加 TG 酶对酸奶的生物可及性和致敏性的影响还需进一步研究。

### 参考文献

- [1] CÁCERES P J, PEÑAS E, MARTÍNEZ-VILLALUENGA C, et al. Development of a multifunctional yogurt-like product from germinated brown rice[J]. *LWT*, 2019, 99: 306–312.
- [2] 贾迪, 吴秀英, 李树森, 等. 谷氨酰胺转氨酶在乳制品中应用的研究进展[J]. 食品科技, 2019, 44(5): 14–18. [JIA Di, WU Xiuying, LI Shusen, et al. Research progress on the application of transglutaminase in dairy products[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(5): 14–18.]
- [3] 李寅. “微生物发酵法生产谷氨酰胺转氨酶”通过鉴定[J]. 工业微生物, 2000(4): 44. [LI Yin. "Production of transglutaminase by microbial fermentation" passed the appraisal[J]. *Industrial Microorganism*, 2000(4): 44.]
- [4] ONER Z, KARAHAN A G, AYDEMIR S, et al. Effect of transglutaminase on physicochemical properties of set-style yogurt [J]. *International Journal of Food Properties*, 2008, 11(1): 196–205.
- [5] DEMIRKAYA A K, CEYLAN Z G. The effect of microbial transglutaminase on microbiological, chemical, textural and sensory properties of yogurt[J]. *Australian Journal of Dairy Technology*, 2009, 64(2): 171–176.
- [6] ANLI T, SEZGIN E, DEVECI O, et al. Effect of using transglutaminase on physical, chemical and sensory properties of set-type yoghurt[J]. *Food Hydrocolloids*, 2010, 25(6): 1477–1481.
- [7] JOOYANDEH H, MAHMOODI R, HOJJATI M. Effect of cold enzymatic treatment of milk by transglutaminase on textural properties of yogurt[J]. 2015, 13(1): 23.
- [8] PAVUNC AL, BEGANOVÍĆ J, KOS B, et al. Influence of microencapsulation and transglutaminase on viability of probiotic strain *Lactobacillus helveticus* M92 and consistency of set yoghurt [J]. 2011, 64(2) : 254–261.
- [9] SHIEIKIN A G, ZIPAEV D V, ZHILINSKAYA N T, et al. Structure properties of stirred yoghurt made with transglutaminase and Amaranth[J]. *Carpathian Journal of Food Science & Technology*, 2016, 8(2): 71–80.
- [10] ABDRABO F H R, ELDIEB S M, ABDELFATTAH A M, et al. Characteristics of set-style yoghurt manufactured from transglutaminase treated milk[J]. *Egyptian Journal of Dairy Science*, 2014, 42(1): 37–50.
- [11] NOGHANI V F, MOFIDI A, ZAREI M. Effect of using microbial transglutaminase as a substitute for part of milk protein concentrate on the selected physicochemical and sensory properties of spinach yoghurt[J]. *Iranian Journal of Nutrition Sciences & Food Technology*, 2014, 9(3): 93–100.
- [12] FADAEI N V, MOFIDI A, ZAREI M. Using of microbial transglutaminase as a substitute for part of skim milk powder in spinach yoghurt[J]. 2016, 13(1): 17–24.
- [13] LORENZEN P C, NEVE H, MAUTNER A, et al. Effect of enzymatic cross-linking of milk proteins on functional properties of set-style yoghurt[J]. *International Journal of Dairy Technology*, 2002, 55(3): 152–157.
- [14] ROMEIH EA, ABDEL-HAMID M, AWAD A A. The addition of buttermilk powder and transglutaminase improves textural and organoleptic properties of fat-free buffalo yogurt[J]. *Dairy Science & Technology*, 2014, 94(3): 297–309.
- [15] YÜKSEL Z, ERDEM Y K. The influence of transglutaminase treatment on functional properties of set yoghurt[J]. *International Journal of Dairy Technology*, 2010, 63(1): 86–97.
- [16] PARAMBAN R M, KUMAR R, MANN B, et al. Enzymatic modification of milk proteins for the preparation of low fat dahi[J]. *Journal of Food Processing & Preservation*, 2016, 40(5): 1038–1046.
- [17] 金洪伟, 张毅, 高源, 等. 谷氨酰胺转氨酶的功能性质及在乳制品中的应用[J]. *中国乳业工业*, 2013, 41(2): 37–40. [JIN Hongwei, ZHANG Yi, GAO Yuan, et al. Functions of transglutaminase and its application in dairy product[J]. *China Dairy Industry*, 2013, 41(2): 37–40.]
- [18] 李思宁, 唐善虎, 毛蒙兰, 等. TG 酶和漆酶对双歧杆菌益生菌酸奶品质的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(8): 119–125, 135. [LI Sining, TANG Shanhu, MAO Menglan, et al. Effect of TGase and laccase on the quality of probiotics yogurt[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(8): 119–125, 135.]
- [19] LI H B, LI C S, LIU T T, et al. Textural performance of Zea mays transglutaminase modified milk protein concentrate in stirred yoghurt[J]. *LWT*, 2021, 147(S1): 111625.
- [20] 杨洋, 刘奕伟, 周方, 等. TG 酶与稳定剂复配改善搅拌型酸奶生产特性的研究[J]. *中国乳业工业*, 2013, 41(4): 26–31. [YANG Yang, LIU Yiwei, ZHOU Fang, et al. Applications of transglutaminase plus a stabilizer in improving the processing characteristics of stirred yogurt product[J]. *China Dairy Industry*, 2013, 41(4): 26–31.]
- [21] 王银. 谷氨酰胺转氨酶对酸羊乳凝乳特性及贮存期品质的影响[D]. 西安: 陕西师范大学, 2018. [WANG Yin. Effect of glutamine transaminase on curd characteristics and storage quality of sour goat milk[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2018.]
- [22] 李洪波, 张君颜, 李卿, 等. 谷氨酰胺转氨酶在酸奶中的应用研究[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(18): 86–88. [LI Hongbo, ZHANG Junyan, LI Qing, et al. Application of transglutaminase in yoghurt[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, 45(18): 86–88.]
- [23] 张莉丽, 韩雪, 张兰威, 等. 茂原链霉菌谷氨酰胺转氨酶在酸奶中的应用研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(12): 210–212, 217. [ZHANG Lili, HAN Xue, ZHANG Lanwei, et al. Application of transglutaminase from *Streptomyces mobaraense* in yoghurt [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(12): 210–212, 217.]
- [24] 郭颖. 谷氨酰胺转氨酶对酸羊乳凝胶特性的影响分析[J]. 中国乳业, 2020(7): 70–72. [GUO Ying. Effect of glutamine transaminase on gel properties of sour goat milk[J]. *China Dairy*, 2020(7): 70–72.]
- [25] DOMAGALA J, WSZOŁEK M, TAMIME A Y, et al. The effect of transglutaminase concentration on the texture, syneresis and

- microstructure of set-type goat's milk yoghurt during the storage period[J]. *Small Ruminant Research*, 2013, 112(1-3): 154–161.
- [26] 张艳, 张富新, 王毕妮, 等. 谷氨酰胺转氨酶浓度对巴氏杀菌酸羊奶品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(7): 201–206. [ZHANG Yan, ZHANG Fuxin, WANG Bini, et al. Effects of transglutaminase concentration on quality of pasteurized goat yogurt [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(7): 201–206.]
- [27] 王文超, 袁海娜, 赵广生, 等. 谷氨酰胺转氨酶对酸奶乳清蛋白抗氧化活性的影响[J]. 中国食品学报, 2017, 17(8): 80–85. [WANG Wenchao, YUAN Haina, ZHAO Guangsheng, et al. Effect of transglutaminase on antioxidant activity of whey protein in yoghurt[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(8): 80–85.]
- [28] 吴彤, 姜淑娟, 妥彦峰, 等. 热处理和转谷氨酰胺酶对凝固型酸乳品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(18): 33–37. [WU Tong, JIANG Shujuan, TUO Yanfeng, et al. Effects of heat treatment and transglutaminase on the quality of set yoghurt[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(18): 33–37.]
- [29] ZHANG L, ZHANG L, YI H, et al. Enzymatic characterization of transglutaminase from *Streptomyces mobaraensis* DSM 40587 in high salt and effect of enzymatic cross-linking of yak milk proteins on functional properties of stirred yogurt[J]. *Journal of Dairy Science*, 2012, 95(7): 3559–3568.
- [30] 张春红, 孙婧, 许娇, 等. 利用固定化谷氨酰胺转氨酶生产搅拌型软枣猕猴桃果肉酸奶[J]. 食品与发酵工业, 2011, 37(5): 209–212. [ZHANG Chunhong, SUN Jing, XU Jiao, et al. Research of immobilized transglutaminase in stirred actinidia arguta fruit yogurt[J]. Food and Fermentation Industries, 2011, 37(5): 209–212.]
- [31] GAUCHE C, TOMAZI T, BARRETO PLM, et al. Physical properties of yoghurt manufactured with milk whey and transglutaminase[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2008, 42(1): 239–243.
- [32] TSEVDOU M S, ELEFTHERIOU E G, TAOUKIS P S, et al. Transglutaminase treatment of thermally and high pressure processed milk: Effects on the properties and storage stability of set yoghurt[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2013, 17: 144–152.
- [33] FARGEMAND M, SORENSEN M V, JORGENSEN U, et al. Transglutaminase: Effect on instrumental and sensory texture of set style yoghurt[J]. *Milchwissenschaft-milk Science International*, 1999, 54(10): 563–566.
- [34] MOTOKI M, SEGURO K. Transglutaminase and its use for food processing[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 1998, 9(5): 204–210.
- [35] 白丽娟, 张英龙, 刘青云, 等. 响应面法优化凝固型羊奶酸奶生产工艺[J]. 中国乳品工业, 2020, 48(1): 56–60. [BAI Lijuan, ZHANG Yinglong, LIU Qingyun, et al. Optimized the production process of solidified goat's milk yogurt[J]. China Dairy Industry, 2020, 48(1): 56–60.]
- [36] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.239-2016 食品安全国家标准 食品酸度的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the PRC. GB 5009.239-2016 National standard for food safety determination of acidity of food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [37] 中华人民共和国卫生部. GB 19302-2010 食品安全国家标准 发酵乳 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010. [Ministry of Health, PRC. GB 19302-2010 National standard for food safety fermented milk[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.]
- [38] 王伟佳, 高晓夏月, 刘爱国, 等. 不同热处理无乳糖酸奶与普通酸奶品质的比较[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(5): 99–104. [WANG Weijia, GAO Xiaoxiayue, LIU Aiguo, et al. Quality comparison of lactose free yoghurt and ordinary yoghurt with different heat treatment[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(5): 99–104.]
- [39] 蔡静静, 张亚川, 李谞, 等. 新疆伊犁地区乳制品中乳酸菌发酵和益生特性及其复合发酵方案优化[J]. 食品科学, 2020, 41(18): 172–179. [CAI Jingjing, ZHANG Yachuan, LI Xu, et al. Fermentation and probiotic properties of lactic acid bacteria isolated from dairy products in yili, xinjiang and optimization of their mixtures for mixed-culture fermentation[J]. Food Science, 2020, 41(18): 172–179.]
- [40] 陈南, 高浩祥, 何强, 等. 共发酵技术对番茄酸奶品质的影响[J]. 广东化工, 2017, 44(22): 9–11. [CHEN Nan, GAO Haoxiang, HE Qiang, et al. Effect of co-fermentation on the quality of tomato yogurt[J]. Guangdong Chemical Industry, 2017, 44(22): 9–11.]
- [41] 王婷, 张国权. 苦荞花生复合发酵酸奶加工工艺研究[J]. 食品工业, 2013, 34(9): 17–21. [WANG Ting, ZHANG Guoquan. Research on processing technology of set tartary buckwheat-peanut yoghourt[J]. The Food Industry, 2013, 34(9): 17–21.]
- [42] 孔凡平, 郎秀杰, 郭成宇. 凝固型双蛋白酸奶的发酵配方优化[J]. 食品工业, 2021, 42(1): 47–52. [KONG Fanping, LANG Xiujie, GUO Chengyu. Optimization of fermentation formula of coagulated double protein yoghurt[J]. The Food Industry, 2021, 42(1): 47–52.]
- [43] 赵岩岩, 赵圣明, 李帅, 等. 山楂叶多糖对发酵乳品质及抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(2): 73–79. [ZHAO Yanyan, ZHAO Shengming, LI Shuai, et al. Effect of polysaccharides from hawthorn leaves on the quality and antioxidant activity of fermented milk[J]. Food Science, 2020, 41(2): 73–79.]
- [44] 中华人民共和国卫生部. GB 4789.35-2016 食品安全国家标准 食品微生物学检验 乳酸菌检验 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [Ministry of Health, PRC. GB 4789.35-2016 National standard for food safety food microbiology test lactic acid bacteria test[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [45] 赵旭飞, 胡志和, 薛璐, 等. 超高压处理对脱脂乳感官特性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(19): 172–184. [ZHAO Xufei, HU Zhihe, XUE Lu, et al. Effect of ultra-high pressure treatment on sensory quality of skim milk[J]. Food Science, 2019, 40(19): 172–184.]
- [46] 冯永强, 贾凌云, 胡志和, 等. 无乳糖酸乳的制备及与普通酸乳的比较研究[J]. 乳业科学与技术, 2018, 41(6): 12–17. [FENG Yongqiang, JIA Lingyun, HU Zhihe, et al. Preparation of lactose-free yogurt and comparison with ordinary yogurt[J]. Journ-

- al of Dairy Science and Technology, 2018, 41(6): 12–17. ]
- [ 47 ] 贾凌云, 胡志和, 薛璐, 等. 不同温度发酵无乳糖酸奶与普通酸奶差异性比较 [J]. 食品科学, 2019, 40(23): 79–90. [ JIA Lingyun, HU Zhihe, XUE Lu, et al. Comparison of lactose-free and plain yoghurt fermented at different temperatures [J]. Food Science, 2019, 40(23): 79–90. ]
- [ 48 ] 中国乳制品工业协会. RHB 103-2004 酸牛乳感官质量评鉴细则 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2004. [ China Dairy Industry Association. RHB 103-2004 Rules for sensory quality evaluation of sour milk[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004. ]
- [ 49 ] 王文超. 微生物谷氨酰胺转氨酶作用于酸奶蛋白凝胶特性及抗氧化机理研究 [D]. 杭州: 浙江科技学院, 2017. [ WANG Wenchao. Study on gel properties and antioxidant mechanism of protein from yoghurt treated by mTG[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Science and Technology, 2017. ]
- [ 50 ] 李晨, 张国文, 赵云, 等. 酸奶后酸化中保加利亚乳杆菌关键基因表达分析 [J]. 中国食品学报, 2018, 18(7): 256–262. [ LI Chen, ZHANG Guowen, ZHAO Yun, et al. Gene expression analysis of yogurt post-acidification in *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(7): 256–262. ]
- [ 51 ] 牟英杰, 林海君, 杨丽杰, 等. 谷氨酰胺转氨酶对搅拌型酸奶品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2013, 34(24): 155–158, 172. [ MU Yingjie, LIN Haijun, YANG Lijie, et al. Effect of transglutaminase on the quality of stirred yoghurt [J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(24): 155–158, 172. ]
- [ 52 ] 张艳. 巴氏杀菌酸羊奶生产技术研究 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2019. [ ZHANG Yan. Study on production technology of pasteurized yogurt milk[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2019. ]
- [ 53 ] 付颖. 微生物谷氨酰胺转氨酶对酸奶品质的影响 [D]. 上海: 华东师范大学, 2005. [ FU Ying. Effects of MTG on yoghourt quality[D]. Shanghai: East China Normal University, 2005. ]
- [ 54 ] 杨敏. 凝固型酸奶加工技术应用研究 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2016. [ YANG Min. Study on processing technology of solidified yoghurt[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2016. ]
- [ 55 ] ARDELEAN A I, OTTO C, JAROS D, et al. Transglutaminase treatment to improve physical properties of acid gels from enriched goat milk [J]. Small Ruminant Research, 2012, 106(1): 47–53.
- [ 56 ] 苏海龙. 转谷氨酰胺酶在凝固型酸奶中的应用研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2003. [ SU Hailong. The study of transglutaminase's application in firm yoghurt[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2003. ]
- [ 57 ] 李东红, 贾先勇, 杨晋杰, 等. 碱性蛋白酶和谷氨酰胺转氨酶对无麸质谷物馒头发酵过程中风味特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2020, 41(22): 62–69. [ LI Donghong, JIA Xianyong, YANG Jinjie, et al. Effects of alkaline protease and transglutaminase on flavor characteristics of gluten-free grain steamed buns during fermentation [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(22): 62–69. ]