

## 蛋白含量对搅拌型发酵乳微流变和贮藏特性的影响

杨淑娟, 史嘉琦, 孙悦欣, 李 璟, 刘俊霞, 杨志辉, 孙志宏, 白 梅\*

(内蒙古农业大学 乳品生物技术与工程教育部重点实验室 农业农村部奶制品加工重点实验室 呼和浩特 010018)

**摘要** 蛋白质含量会影响发酵乳特性,进而决定发酵乳品质。采用多频扩散波谱法分析蛋白含量分别为 2.4%、2.8% 和 3.2% 时对发酵乳发酵过程中微流变特性影响,分析贮藏期间不同蛋白含量发酵乳的质构特性和稳定性,同时做感官评价。发酵过程微流变分析结果显示,蛋白含量增加形成的乳凝胶具有较高的固-液平衡值和较低的弹性因子,对流动因子虽没有影响,但到达凝胶点的时间较短,缩短了发酵时间。推测蛋白含量的增加加速了酪蛋白颗粒的聚集。发酵终点时蛋白含量 2.8% 组发酵乳黏度因子最高。贮藏期间,蛋白含量 2.8% 发酵乳的黏度、稠度、内聚性等均显著高于另外两组 ( $P < 0.05$ ),质构状态最佳;蛋白含量 2.4% 发酵乳的持水力显著低于蛋白含量 2.8% 组和蛋白含量 3.2% 组 ( $P < 0.05$ );pH 值和滴定酸度随蛋白含量的增加而变大,3 组发酵乳 pH 值和滴定酸度值均匀变化 ( $P > 0.05$ ),蛋白含量 3.2% 组的 pH 值始终高于另外两组,即蛋白含量越高,滴定酸度越高。感官评价结果显示,蛋白含量 2.8% 和 3.2% 的发酵乳各项指标评分接近,总体优于蛋白含量 2.4% 的。本研究为不同蛋白含量发酵乳的开发提供了试验数据,对多元化发酵乳产品研发具有一定的指导意义。

**关键词** 蛋白质含量; 发酵乳; 微流变学; 质构

**文章编号** 1009-7848(2023)02-0183-09 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.02.018

发酵乳因独特的风味和丰富的营养价值,故是乳制品行业中增长最迅速的产品之一。发酵乳必须具备一定的蛋白质含量、饱满滑爽的口感和良好的外观<sup>[1]</sup>。发酵乳制作是利用乳酸菌发酵,分解乳糖产生乳酸来改变牛奶的酸度,从而形成酸乳凝胶的过程。搅拌型发酵乳是发酵后的凝乳在灌装前搅拌成黏稠的组织状态。当牛奶的 pH 值降到 5.0 左右时,酪蛋白的高级结构被破坏,是由于此时氨基酸残基质子化造成的。同时,疏水分子与变性蛋白质相互作用,然后重新聚集在一起,酪蛋白的相互作用会使牛奶中的蛋白质形成半固态的网络结构,即形成了发酵乳<sup>[2]</sup>。有研究发现<sup>[3]</sup>,酪蛋白胶束是牛奶酸凝胶形成初期的主要驱动力,因此乳中的蛋白质,是形成发酵乳凝胶的基本物质,对发酵乳凝胶形成和所形成凝胶的微观结构、理化性质等有最直接的影响<sup>[4]</sup>。

光学微流变技术是一种在无扰和静态条件下,通过检测样品的后向散射光来表征分散体的

流变性能和内部结构变化的分析技术。通过检测样品对给定波长激光的背散射散斑图像,可以得到分散体中粒子的运动状态,即均方根位移(Mean square displacement, MSD)与去相关时间(Decorrelation time, tdec)的关系,从而来表示分散体的流变特性<sup>[5]</sup>。微流变学可在不损坏样品的情况下研究样品的流变性能,可通过跟踪体系中颗粒的运动来表示样品的黏弹性变化。微流变学的灵敏度高于机械流变学,目前已成功应用于凝乳酶诱导酪蛋白凝胶的流变学特性研究<sup>[6-7]</sup>。微流变学能够反映发酵乳流变学特性随时间的变化规律,发酵乳在发酵过程中的流变特性会影响产品的质构,从而影响口感<sup>[8]</sup>。

本文研究乳中蛋白含量分别为 2.4%、2.8%、3.2% 时对搅拌型发酵乳发酵过程中微流变特性及贮藏稳定性的影响,并做感官评价,以期探讨酸乳凝胶形成机理,实现对发酵乳产品凝胶强度等的预测,为产品的质量控制在提供试验依据。

## 1 材料及方法

### 1.1 材料和试验菌种

纯牛乳(脂肪含量为 3.7 g/100 g;蛋白质含量为 3.0 g/100 g),蒙牛乳业(集团)股份有限公司;蔗糖,广西凤糖生化股份有限公司;浓缩牛奶蛋白

收稿日期: 2022-04-25

基金项目: 内蒙古农业大学高层次人才科研启动项目(NDYB2020-23);国家自然科学基金青年科学基金项目(32101918)

第一作者: 杨淑娟,女,博士生

通信作者: 白梅 E-mail: baimeier@163.com

(MPC-80)粉,德国穆勒有限公司;直投式酸奶发酵剂【包括嗜热链球菌 (*Streptococcus thermophilus*)S10 和德氏乳杆菌保加利亚亚种 (*Lactobacillus delbrueckii* ssp. *Bulgaricus*)MGB58-5,由乳品生物技术与工程教育部重点实验室乳酸菌菌种资源库提供。

## 1.2 仪器与设备

博勒飞 DV-2T 粘度计,美国博勒飞公司;FE28 型 pH 计,梅特勒(上海)有限公司;Rheolaser Master 型微流变分析仪,法国 Formu-laction 仪器公司;SJ-CJ-2FDQ 超净工作台,苏州苏洁净化设备有限公司;恒温水浴锅,上海一恒科技有限公

司;SRH60-70 高压均质机,上海申鹿均质机有限公司;TA-XT plus 质构仪,英国稳定微系统公司。

## 1.3 方法

1.3.1 发酵乳样品的制备 按照表 1 的配方,分别将白砂糖、纯净水、MPC-80 完全溶解于纯牛乳中,作为发酵乳基料,分为 3 组,加热至 62 ℃,在 20 MPa 条件下均质,95 ℃、5 min 杀菌后,在冰水冷却至 42 ℃,以 0.03%接种量接种发酵剂。样品接种后于 42 ℃恒温培养,至 pH 4.6 以下为终点,立即冰水浴冷却,然后搅拌无菌分装。置于 4 ℃后熟 24 h 后于 10 ℃条件下贮存 21 d,贮藏期间每隔 7 d 取样检测。

表 1 不同蛋白含量发酵乳配料信息

Table 1 Ingredients information of fermented milk with different protein content

分组	纯牛奶/%	白砂糖/%	纯净水/%	MPC-80/%
蛋白含量 2.4%组	80.0	6.0	14.0	-
蛋白含量 2.8%组	94.0	6.0	-	-
蛋白含量 3.2%组	93.4	6.0	-	0.5

注:“-”表示不添加。

1.3.2 发酵过程中流变学特性测定 利用光学微流变仪测定样品发酵过程中的流变学特性。在提前灭菌过的配套微流变仪样品瓶中,把接种发酵剂后的牛乳倒入,要维持样品瓶壁的干净,防止造成光学误差<sup>[9]</sup>。流变仪提前设置温度为 42 ℃,将样品放入测定槽。每 5 min 测量一次,至发酵终点。根据 MSD 的曲线,能计算出来反映样品结构特征的 4 种因子,即固液平衡因子 (Solid liquid balance, SLB)、黏度因子 (Macroscopic viscosity index, MVI)、弹性因子 (Elastic index, EI) 和流动因子 (Fluidity index, FI)。

1.3.3 质构特性分析 利用质构仪测定发酵乳在贮藏期间的稠度 (Consistency)、硬度 (Firmness)、黏度指数 (Viscosity index) 和内聚性 (Cohesiveness) 的变化情况。发酵乳样品用 5 kg 测压元件进行压缩循环试验<sup>[10]</sup>。探头选用 A/BE,试验中穿透深度为 30 mm,速度固定为 1 mm/s。样品从在 10 ℃取出后恢复至室温后测定,每组平行设定为 3 个<sup>[9]</sup>。

## 1.3.4 贮藏期稳定性分析

1.3.4.1 酸度测定<sup>[9]</sup> pH 值采用 FE28 型 pH 计直接测定;滴定酸度参照国家标准 GB 5009.239-2016《食品安全国家标准 食品酸度的测定滴定酸度》中“酚酞指示剂法”进行测定,每个样品测定 3 组平行。

1.3.4.2 黏度测定<sup>[11]</sup> 利用黏度仪测定发酵乳样品的黏度,使用 4 号转子,扭矩设置为 10%~100%,调节转子的转速为 100 r/min,测定时间为 30 s。每组测 3 个平行。

1.3.4.3 持水性测定<sup>[11]</sup> 在铺好有定量滤纸的漏斗中,倒入发酵乳样品,然后准确称取样品 20.0 g,在室温的条件下放置 2 h 后收集滤液并立即称量滤液的质量(g)。按如下公式计算:

$$\text{持水性}(\%) = [1 - (\text{滤液质量} / \text{样品质量})] \times 100$$

## 1.4 感官评价<sup>[12]</sup>

感官评价挑选 10 名专业的成员组成评价小组,分别从发酵乳的组织状态、口感、风味、色泽、喜爱程度 5 个方面对产品进行感官评定,每一项 20 分,满分为 100 分,具体评价打分的标准见表 2。

表 2 酸奶的感官打分标准  
Table 2 Sensory scoring standard of yogurt

评价项目	评价标准	分值/分
组织状态(20分)	状态均匀细腻,不分层,无气泡,无乳清析出	15~20
	状态较均匀,基本不分层,有少量乳清析出	10~15
	状态不均匀,有凝乳块或颗粒,明显分层,有大量的乳清析出	0~10
口感(20分)	酸度适中,口感细腻润滑	15~20
	酸度过量或不足,口感较为细腻润滑	10~15
	无酸味,口感较为粗糙,有粒状或沙状	0~10
风味(20分)	有醇香酸奶气味,无其它异味	15~20
	酸甜较适宜,酸奶香气平淡,无异味	10~15
	酸甜失衡,无酸奶香味,有异味	0~10
色泽(20分)	颜色非常均一,表现乳白色或微黄色	15~20
	颜色较为均一,表现淡黄色或浅灰色	10~15
	颜色呈现灰黑色,不均一,出现怪异颜色	0~10
喜爱程度(20分)	非常喜爱	15~20
	一般喜爱	10~15
	不喜爱	0~10

## 1.5 统计分析

利用 Rheolaser Master 型光学法微流变分析仪中所安装的 Smart 软件对微流变数据进行处理分析。利用 Origin 2018 软件绘制文中的图表。试验数据利用 SPSS 软件分析各样本间的差异,  $P < 0.05$  表示差异显著。

## 2 结果与讨论

### 2.1 发酵过程中微流变学特性

在流变学的范畴里,微流变学是一个崭新的模块,能够在微米的尺度研究样品的黏弹性特征。样品的构成可以通过微粒的运动痕迹来反馈。牛乳发酵过程中的微流变学是根据颗粒在乳液环境中的体积和运动情况来分析其流变特性的,在乳中接种发酵剂后,在最适的温度下,随着发酵的不断进行,乳环境中的酸度渐渐下降,这时候会使乳环境中原有的凝集体产生变化,酪蛋白颗粒会发生聚集,然后形成彼此有间隙的结构,最后会产生以酪蛋白胶体颗粒为基本构成的凝胶结构<sup>[13-14]</sup>。

**2.1.1 SLB 变化** SLB 是指发酵乳在发酵过程中不同时间点所具有固态和液态特征的比值<sup>[15]</sup>,计算方法是依据 MSD 平台的斜率进行的,表示微粒从进入空间到冲出空间的过程中的运动状态,斜率愈大对应着 SLB 指数也愈大,表征微粒更具有

液体属性<sup>[5]</sup>。SLB 与发酵乳样品的黏弹性呈现正相关的变化,可以表示产品的状态(倾斜于液态或固态)与时间对应的一种函数关系<sup>[11]</sup>,当  $0 < \text{SLB} < 0.5$  时,此时呈现出弹性模量,样品倾向于固体状态;  $0.5 < \text{SLB} < 1$  时,此时表征出黏性模量,样品倾向于液体状态<sup>[15]</sup>。

发酵过程中 SLB 的变化如图 3 所示,从发酵开始直至 4.0 h,各组发酵乳样品的 SLB 处于波动状态,此时样品为液体性质<sup>[16]</sup>。4 h 后,由于菌株持续产酸,酸度持续下降,出现 SLB 拐点,表明单体酪蛋白重新聚集形成胶状颗粒,溶解度降低,黏度增加,达到样品的凝胶点。凝胶结构使样品的状态趋于固体,说明体系中胶体颗粒的迁移受到了酪蛋白聚集的影响。发酵接近尾声时,SLB 逐渐增加,然后趋于平稳,酪蛋白胶束最终凝结成三维网络结构<sup>[16]</sup>。

各组到达凝胶点由快到慢分别是蛋白含量 3.2%, 2.8% 和 2.4% 组,说明蛋白含量增加有助于缩短到达凝胶点的时间。发酵终点时,发酵乳的 SLB 从大到小排序依次为:蛋白含量 3.2%, 2.8% 和 2.4% 组,蛋白含量 3.2% 组的 SLB 最高,且 3 组发酵乳 SLB 在发酵终点时均  $< 0.5$ , 因此到发酵终点时,3 组发酵乳表现出较强的固体性质,而蛋白含量 3.2% 组发酵乳黏弹性更大。该结果表明,在

一定范围内,蛋白含量越高的发酵乳样品对应的SLB越大。

**2.1.2 EI变化** EI体现弹性随时间发生变化的程度,根据MSD曲线中平台高度的倒数求得,描述样品弹性特征,可快速、简便地表征一个样品的弹性模量。“笼”的减小对应着MSD平台高度的下降,代表着网络结构构成得越为紧凑,表现的EI值更高。MSD平台的高度能够反映产品的弹性特征,EI与样品的弹性模量 $G'$ 成正比<sup>[5]</sup>。EI值越大,凝胶的弹性越强,EI与凝胶的性质有关<sup>[17]</sup>。

发酵过程中EI变化如图2所示,从0h到4h左右,3组样品的EI维持在一个水平下,差异不明显,因为此时酪蛋白没有形成网状凝胶结构。随着发酵时间的增加,4h后,样品逐渐出现凝乳状态,蛋白含量3.2%组的弹性因子先出现拐点,接着蛋白含量2.8%组、2.4%组依次出现拐点,此时为凝胶点。这说明蛋白含量的增加在一定程度上可以到达加快凝胶点的时间,与SLB结果对应。随发酵时间增加,3组发酵乳EI先增加到最大值,这是因为发酵乳中酪蛋白完全解离并迅速聚集形成凝胶结构,使EI达到最大<sup>[18]</sup>,有研究表明<sup>[19]</sup>酪蛋白胶束粒子的排空层会开始重叠,在两个粒子相互靠近时,在颗粒间的重叠区域中聚合物被排除出,粒子重叠区域间和溶液中的聚合物的浓度有差异,从而导致酪蛋白胶束粒子间的有效吸引增强,进而表现为EI增加。最后各组EI基本保持平稳状态直到发酵终点,该过程中蛋白含量3.2%组EI始终低于另外两组,蛋白含量2.4%组的EI略高于蛋白含量2.8%组。EI与凝胶弹性变化呈正比,因此蛋白含量2.8%组、2.4%组的凝胶弹性较强。该结果表明,在一定范围内,蛋白含量越高的发酵乳样品对应的EI反而较低。

**2.1.3 MVI变化** MVI反应样品在微米尺度的黏度特征<sup>[20]</sup>,通过MSD最后部分的斜率计算,MVI与样品宏观黏度成正比,因此直接反映发酵乳黏度的变化<sup>[15]</sup>。

样品在发酵过程中的黏度因子的变化趋势示意图如图3所示,从发酵开始到发酵进行到4h左右,由于酪蛋白没有形成凝胶网络结构,所

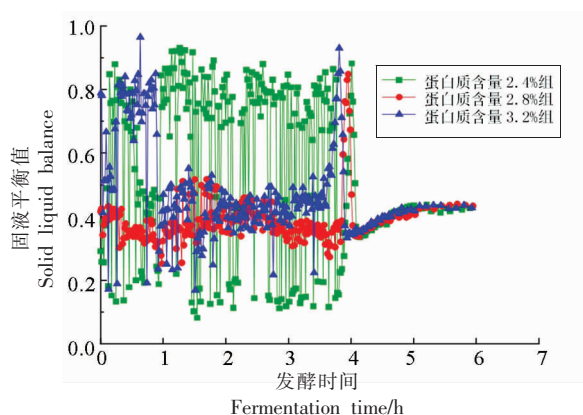


图1 不同蛋白含量酸奶在发酵过程中SLB示意图

Fig.1 Schematic diagram of solid-liquid balance of yogurt with different protein content during fermentation

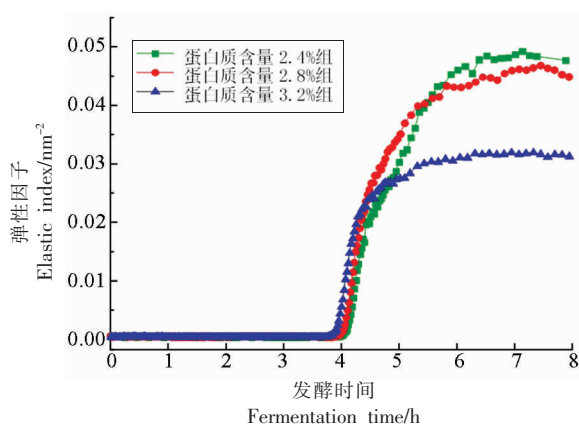


图2 不同蛋白含量发酵乳在发酵过程中EI示意图

Fig.2 Schematic diagram of elasticity index of yogurt with different protein content during fermentation

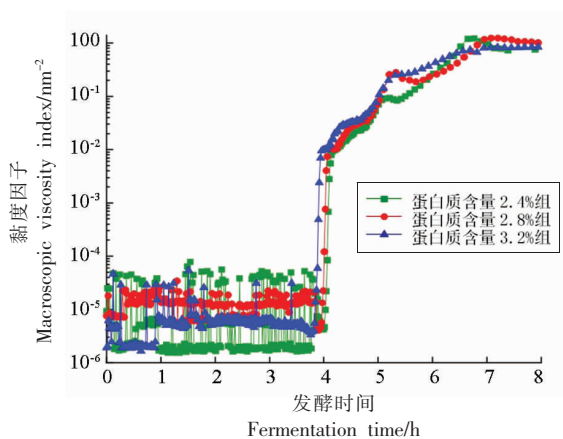


图3 不同蛋白含量发酵乳在发酵过程中MVI示意图

Fig.3 Schematic diagram of macroscopic viscosity index of yogurt with different protein content during fermentation

以这 3 组的 MVI 呈现波动的状态<sup>[8]</sup>。随后蛋白质含量 3.2% 组先出现拐点, 蛋白含量 2.8% 组和 2.4% 组紧接着依次出现拐点, 3 组样品的 MVI 迅速升高然后缓和升高, 达到最高值后基本维持稳定水平<sup>[12]</sup>。这是因为酪蛋白胶粒解离, 凝胶在乳中逐渐开始形成, 进入黏度迅速变化的范围, 随后各组发酵乳样品的 MVI 迅速上升至最大值, 进入高黏度<sup>[21]</sup>阶段, 使整个发酵乳形成相对稳定的凝胶系统。由图 3 可知, 发酵乳网络结构形成后各组最终形成了稳定的凝胶结构。发酵过程中蛋白含量 3.2% 组的 MVI 大, 而发酵终点时, 蛋白含量 2.8% 组的 MVI 最大, 此时该组黏度最高, 而蛋白含量 2.4% 组的黏度达最大值后又有小范围的降低, 可能是因为形成的凝胶结构不稳定。

**2.1.4 FI 变化** FI 变化能反映发酵乳样品中微观粒子运动的快慢, 一种根据粒子运动的特征时间  $\tau$  计算的因子。液体试验开始时, 颗粒的堆积结构被破坏。随着老化时间的增加, 颗粒逐渐回到网络结构的老化过程, 在流动性曲线上表现为逐渐下降和 FI 因子平台的出现<sup>[5]</sup>。

高流动因子 (约  $>10$  Hz) 表示此时样品为液态, 低流动因子 (约  $<10^{-2}$  Hz) 说明样品为固态, 与固液平衡点的结果对应<sup>[12]</sup>。FI 与粒子运动呈正相关, 前者越大则后者运动越快, 流动性越强<sup>[22]</sup>, 样品发酵过程中 FI 的示意图见图 4, 从发酵开始到 4.0 h, 3 组样品的流动因子呈现波动的情况, 此时属于液体特性。4.0 h 后蛋白含量 3.2% 组先出现拐点, 说明其粒子运动较快, 蛋白含量 2.8% 组和蛋白含量 2.4% 组紧接着出现拐点。前 4 h 流动因子在  $10^2 \sim 10^3$  Hz 之间波动, 4 h 后流动因子垂直降低到接近  $10^{-1}$  Hz, 然后接着缓和降低, 降到  $10^{-2}$  Hz 后基本维持在这个范围不变, 此时, 发酵乳样品拥有高黏性液态的特点。到发酵终点, 蛋白含量 2.4% 组的 FI 最低, 与 MVI 结果相应。7 h 以后, 各组 FI 都比较接近, 说明此时发酵乳样为固态性质。

## 2.2 贮藏期稳定性分析

**2.2.1 质构特性变化** 本研究对 3 种发酵乳样品在贮藏期的质构进行测定, 以评价添加不同含量蛋白对发酵乳质地的影响 (表 2)。测定参数包括内聚性、稠度、黏度指数和硬度。在本研究中, 蛋白含量 2.8% 组发酵乳在贮藏 21 d 内始终具有最高

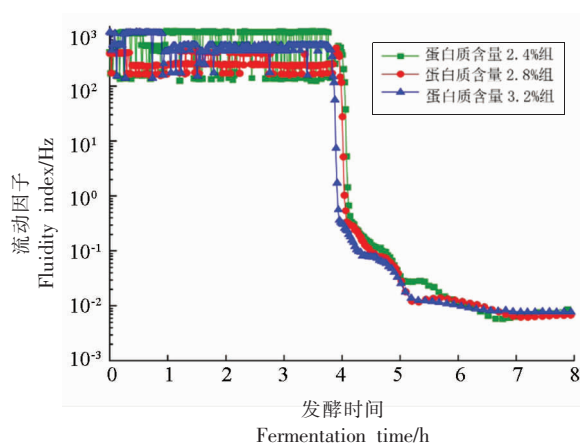


图 4 不同蛋白含量发酵乳在发酵过程中 FI 示意图  
Fig.4 Schematic diagram of fluidity index of yogurt with different protein content during fermentation

的硬度, 然后为蛋白含量 3.2% 组, 最低是蛋白含量 2.4% 组, 差异显著 ( $P < 0.05$ )。发酵乳的高稠度是指高密度的黏性产品, 蛋白含量 2.8% 组稠度在贮藏期间始终显著高于另外两组 ( $P < 0.05$ ), 蛋白含量 3.2% 组次之, 蛋白含量 2.4% 组稠度最低; 贮藏期间, 蛋白含量 2.8% 组内聚性最高 ( $P < 0.05$ ), 接下来是蛋白含量 3.2% 组、蛋白含量 2.4% 组, 有研究表明发酵乳的凝胶组成强弱与内聚性是相关的, 能够反映发酵乳保持水分的能力<sup>[23]</sup>; 蛋白含量 2.8% 组的黏度指数在贮藏期间显著高于另外两组 ( $P < 0.05$ )。可以看出, 蛋白含量 2.8% 组发酵乳质构状态最佳, 而蛋白含量 2.4% 组发酵乳质构状态最差。

**2.2.2 pH 值和滴定酸度变化** 发酵乳的后酸直接影响成品的质量、风味与口感, 产酸是酸奶发酵剂的主要功能<sup>[24]</sup>。pH 值和滴定酸度 (TA) 可反应发酵乳的酸度变化和后酸化的程度。

发酵乳在  $10^\circ\text{C}$  贮藏过程中酸度的变化由图 5 可知, 贮藏过程中各组 pH 值均呈下降趋势, 滴定酸度呈上升趋势。贮藏期间发酵乳 pH 值均匀下降, 蛋白含量 3.2% 组在贮藏期间的 pH 值始终高于其它两组, 同时因为蛋白含量越高, 游离的氨基酸越多, 所以滴定酸度越高, 第 14 天后 3 组发酵乳滴定酸度值差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

**2.2.3 黏度变化** 黏度能够反映酸奶的质量, 其是乳成分在发酵及贮藏过程中发生变化的映射。它直接影响发酵乳的口感, 良好的感官品质离不

表3 酸奶贮藏期间质构参数分析  
Table 3 Analysis of texture parameters of yoghurt during storage

指标	分组	贮藏时间/d			
		1	7	14	21
硬度/g	蛋白含量 2.4%组	36.34 ± 0.09 <sup>c</sup>	39.18 ± 1.24 <sup>c</sup>	43.76 ± 0.45 <sup>b</sup>	46.84 ± 0.75 <sup>b</sup>
	蛋白含量 2.8%组	53.95 ± 0.66 <sup>a</sup>	74.94 ± 7.04 <sup>a</sup>	53.37 ± 0.48 <sup>a</sup>	59.54 ± 1.52 <sup>a</sup>
	蛋白含量 3.2%组	45.03 ± 0.67 <sup>b</sup>	57.41 ± 4.88 <sup>b</sup>	49.86 ± 0.92 <sup>ab</sup>	58.49 ± 5.59 <sup>a</sup>
稠度/g·s <sup>-1</sup>	蛋白含量 2.4%组	286.22 ± 3.36 <sup>c</sup>	310.81 ± 12.05 <sup>c</sup>	343.33 ± 0.78 <sup>c</sup>	370.68 ± 16.43 <sup>c</sup>
	蛋白含量 2.8%组	428.50 ± 7.08 <sup>a</sup>	581.90 ± 46.22 <sup>a</sup>	423.21 ± 6.45 <sup>a</sup>	465.96 ± 17.02 <sup>a</sup>
	蛋白含量 3.2%组	351.50 ± 7.03 <sup>b</sup>	447.97 ± 39.09 <sup>b</sup>	394.06 ± 8.44 <sup>b</sup>	434.56 ± 42.99 <sup>b</sup>
内聚性/g	蛋白含量 2.4%组	33.91 ± 0.72 <sup>c</sup>	37.49 ± 3.26 <sup>c</sup>	42.32 ± 1.36 <sup>b</sup>	46.63 ± 1.98 <sup>c</sup>
	蛋白含量 2.8%组	60.71 ± 1.69 <sup>a</sup>	90.61 ± 14.94 <sup>a</sup>	53.71 ± 1.65 <sup>a</sup>	63.42 ± 1.93 <sup>a</sup>
	蛋白含量 3.2%组	41.63 ± 1.30 <sup>b</sup>	56.12 ± 5.43 <sup>b</sup>	48.43 ± 0.81 <sup>b</sup>	52.03 ± 8.51 <sup>b</sup>
黏度指数/g·s <sup>-1</sup>	蛋白含量 2.4%组	40.40 ± 0.41 <sup>c</sup>	41.38 ± 2.78 <sup>c</sup>	50.99 ± 1.25 <sup>c</sup>	54.65 ± 1.64 <sup>c</sup>
	蛋白含量 2.8%组	70.18 ± 1.64 <sup>a</sup>	100.27 ± 14.78 <sup>a</sup>	65.74 ± 0.25 <sup>a</sup>	76.11 ± 1.36 <sup>a</sup>
	蛋白含量 3.2%组	49.46 ± 1.08 <sup>b</sup>	67.07 ± 6.28 <sup>b</sup>	58.03 ± 2.10 <sup>b</sup>	67.09 ± 6.95 <sup>b</sup>

注：不同小写字母代表差异显著性,  $P < 0.05$ 。

开适宜的黏度<sup>[25]</sup>。

在贮藏过程中酸奶黏度的变化情况如下图所示,在贮藏 21 d 的过程中,蛋白含量 2.8%组的黏度均显著高于另外两组 ( $P < 0.05$ ),这与发酵过程中 MVI 变化结果所对应,而整体来看,随着贮藏

时间的延长,3 组发酵乳的黏度在贮藏第 14 天上升到最大后下降,而蛋白含量 2.8%组的黏度始终最高,蛋白含量 3.2%组黏度略大于蛋白含量 2.4%组,差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

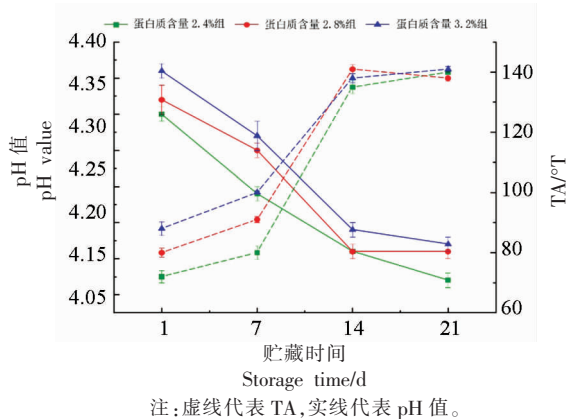
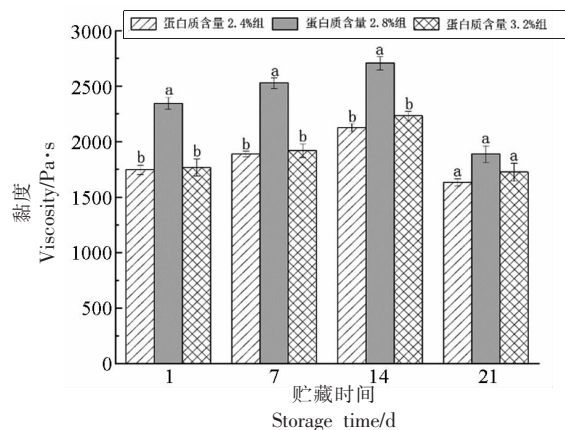


图5 酸奶在贮藏过程中酸度的变化情况

Fig.5 Changes of acidity of yogurt during storage

2.2.4 持水力变化 发酵乳的持水性就是发酵乳的蛋白凝胶网络对水的保持能力,能力弱,则易发生乳清析出,酸奶质地差。酸奶的持水力能侧面反映凝胶网络的致密性及酸奶的质地,一般是呈正相关<sup>[26]</sup>。

贮藏期间发酵乳持水性的变化如图 7 所示,



注:不同小写字母表示代表显著性差异,  $P < 0.05$ 。

图6 酸奶在贮藏过程中黏度的变化情况

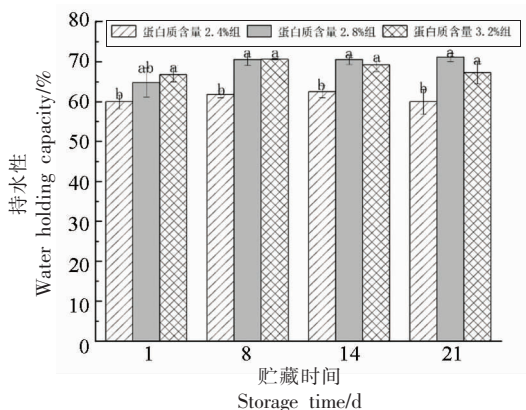
Fig.6 Changes of viscosity of yogurt during storage

贮藏期间,蛋白质含量 2.4%组发酵乳持水性最低,显著低于其它两组 ( $P < 0.05$ ),蛋白质含量 2.8%组和蛋白含量 3.2%组持水性差异不显著 ( $P > 0.05$ ),提示蛋白含量 2.4%组发酵乳产品凝胶结构弱,持水性较差,而蛋白含量 2.8%组和蛋白含量 3.2%组的发酵乳持水性较好,组织状态好。

### 2.3 感官评定

发酵乳感官评定结果见图 8, 蛋白含量 2.4% 组的发酵乳和另外两组发酵乳在外观、口感、风味、组织状态和喜爱程度方面存在差异。蛋白含量 2.4% 组的发酵乳口感、风味、组织状态较差; 而蛋

白含量 2.8% 组和蛋白含量 3.2% 感官各项评分较高且喜爱程度较接近, 整体来看组织状态均匀, 口感顺滑细腻。蛋白含量 3.2% 组发酵乳口感稍偏酸, 但酸奶醇香, 黏稠丝滑; 而蛋白含量 2.8% 组的发酵乳的口感最好, 风味最佳, 且质地醇厚。



注: 不同小写字母代表显著性差异,  $P < 0.05$ 。

图 7 酸奶在贮藏过程中持水性的变化情况

Fig.7 Changes of water holding capacity of yogurt during storage

### 3 结论

本研究采用多频扩散波谱法分析蛋白含量 2.4%、2.8% 和 3.2% 对搅拌型发酵乳发酵过程中微流变特性的影响, 同时对其贮藏期间质构特性、稳定性和感官特性进行评价。微流变结果发现: 蛋白含量越高, 发酵乳越早出现拐点到达凝胶点, 缩短了到达凝胶点的时间; 随蛋白质含量的增加发酵乳具有较高的 SLB 和较低的 EI, 对 FI 没有显著影响, 发酵终点时的 MVI 变化显示蛋白含量 2.8% 组发酵乳黏度最高。贮藏期间的质构特性、黏度可以看出, 蛋白含量 2.8% 组发酵乳具有最佳的质构状态, 蛋白含量 3.2% 组的 pH 值始终高于另外两组, 蛋白含量 2.4% 组持水力显著低于另外两组, 蛋白含量 2.8% 组和蛋白含量 3.2% 的发酵乳感官评分较高且较为接近。综上, 不同蛋白含量的牛乳在发酵及贮藏过程表现出不同的特性, 本研究对不同蛋白含量的相关发酵乳开发提供了理论指导和一定的科学参考。

### 参 考 文 献

[1] 康志远, 蒋灿明, 周雪松, 等. 浓缩牛奶蛋白对发酵酸奶品质的影响[J]. 中国食品添加剂, 2013(5):

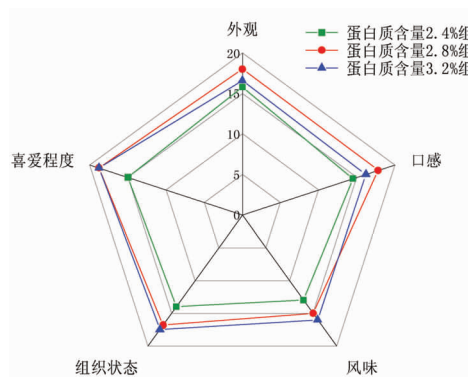


图 8 发酵乳感官评定直观图

Fig.8 Direct view of sensory evaluation of fermented milk

156-160.

KANG Z Y, JIANG C M, ZHOU X S, et al. Effect of concentrated milk protein on the quality of fermented yogurt [J]. China Food Additives, 2013 (5): 156-160.

[2] CERNING J, BOUILLANNE C, LANDON M, et al. Isolation and characterization of exopolysaccharides from slime-forming mesophilic lactic acid bacteria[J]. Journal of Dairy Science, 1992, 75(3): 692-699.

[3] TITAPICCOLO G I, CORREDIG M, ALEXANDER M. Acid coagulation behavior of homogenized milk: Effect of interacting and non-interacting droplets observed by rheology and diffusing wave spectroscopy [J]. Dairy Science & Technology, 2011, 91 (2): 185-201.

[4] 李荣华. 乳蛋白对凝固型酸奶流变学特性及微观结构的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2008.

LI R H. Effect of milk protein on rheological properties and microstructure of solidified yogurt [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2008.

[5] 李跃, 邱藤, 郭隆海, 等. 用光学微流变研究硅烷偶联剂改性乳胶的流变性及稳定性[J]. 涂料工业, 2021, 51(2): 35-41.

LI Y, QIU T, GUO L H, et al. Study on rheology and stability of latex modified by silane coupling a-

- gent by optical micro-rheology[J]. Coatings Industry, 2021, 51(2): 35-41.
- [6] ZHAN S N, FANG H, FU J M, et al. Gold nanoflower-enhanced dynamic light scattering immunosensor for the ultrasensitive no-wash detection of *Escherichia coli* O157:H7 in milk[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(32): 9104-9111.
- [7] HEMAR Y, SINGH H, HORNE D S. Determination of early stages of rennet-induced aggregation of casein micelles by diffusing wave spectroscopy and rheological measurements[J]. Current Applied Physics, 2004, 4(2/4): 362-365.
- [8] 孙健, 牛天骄, 常圆圆, 等. 琼脂-牛乳蛋白酸凝胶微流变特征研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 334-338.
- SUN J, NIU T J, CHANG Y Y, et al. Study on micro-rheological characteristics of agar-milk protein acid gel[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 334-338.
- [9] 白梅, 黄天, 郭帅, 等. 益生菌干酪乳杆菌 Zhang 和乳双歧杆菌 V9 发酵乳胞外多糖含量对流变学特性、质构和稳定性的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(4): 193-202.
- BAI M, HUANG T, GUO S, et al. Effects of extracellular polysaccharide in yogurt produced by the probiotic bacteria, *Lactobacillus casei* Zhang and *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* V9 on rheological properties, texture and stability[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(4): 193-202.
- [10] YILDIZ E, OZCAN T. Functional and textural properties of vegetable - fibre enriched yoghurt[J]. International Journal of Dairy Technology, 2018, 72(2): 199-207.
- [11] 苗壮壮, 杨淑娟, 刘凯龙, 等. 乳双歧杆菌 Probio-M8 和副干酪乳杆菌 PC-01 对发酵乳微流变学特性及稳定性的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(3): 103-110.
- MIAO Z Z, YANG S J, LIU K L, et al. Effects of *Bifidobacterium lactis* Probio-M8 and *Lactobacillus paracasei* PC-01 on the multi-speckle diffusing wave spectroscopy and stability of fermented milk[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(3): 103-110.
- [12] 陈美瑄. 母乳中益生乳杆菌和双歧杆菌的初步筛选及特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
- CHEN M X. Preliminary screening and characterization of probiotic *Lactobacillus* and *Bifidobacterium* isolated from human breast milk[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020.
- [13] PANG Z, DEETH H, PRAKASH S, et al. Development of rheological and sensory properties of combinations of milk proteins and gelling polysaccharides as potential gelatin replacements in the manufacture of stirred acid milk gels and yogurt[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 169(5): 27-37.
- [14] 泰米迈, 罗宾逊. 酸乳科学与技术[M]. 姜茂竹, 译. 2版. 北京: 中国农业出版社, 2003: 64-67.
- TAMIMAI, ROBINSON. Yogurt science and technology[M]. JIANG M Z, translated. 2 Ed. Beijing: China Agriculture Press, 2003: 64-67.
- [15] ROHART A, MICHON C, CONFAC J, et al. Evaluation of ready-to-use SMLS and DWS devices to study acid-induced milk gel changes and syneresis[J]. Dairy Science and Technology, 2016, 96(4): 459-475.
- [16] LAZARIDOU A, SERAFEIMIDOU A, BILIADERIS C G, et al. Structure development and acidification kinetics in fermented milk containing oat  $\beta$ -glucan, a yogurt culture and a probiotic strain[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 39: 204-214.
- [17] 刘贺, 庚平, 万娇, 等. 蛋白酶对豆浆凝胶过程微流变性质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(3): 1-5.
- LIU H, GENG P, WAN J, et al. Effect of protease on micro-rheological properties of soybean milk during gelation[J]. Food Science, 2016, 37(3): 1-5.
- [18] 王雅楠, 韩育梅, 何君. 添加益生元对酸乳凝胶过程及微观结构的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(15): 100-105.
- WANG Y N, HAN Y M, HE J. Effect of adding prebiotics on gel process and microstructure of yogurt[J]. Food Science, 2019, 40(15): 100-105.
- [19] DOUBLIER J L, GARNIER C, RENARD D, et al. Protein-polysaccharide interactions[J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 1979, 5(3): 202-214.
- [20] ZHU Q M, QIU S, ZHANG H W, et al. Physical stability, microstructure and micro-rheological properties of water-in-oil-in-water (W/O/W) emulsions stabilized by porcine gelatin[J]. Food Chemistry, 2018, 253: 63-70.



- [21] ZHANG Y, LI Y, WANG P J, et al. Rennet-induced coagulation properties of yak casein micelles: A comparison with cow casein micelles[J]. *Food Research International*, 2017, 102: 25–31.
- [22] 罗天洪, 蔡森, 张敏, 等. 辅助发酵菌株对发酵乳品质的影响[J]. *乳业科学与技术*, 2019, 42(3): 1–8.
- LUO T Q, CAI M, ZHANG M, et al. Effects of auxiliary fermentation strains on the quality of fermented milk[J]. *Journal of Dairy Science and Technology*, 2019, 42(3): 1–8.
- [23] DELIKANLI B, OZCAN T. Effects of various whey proteins on the physicochemical and textural properties of set type nonfat yoghurt[J]. *International Journal of Dairy Technology*, 2015, 67(4): 495–503.
- [24] MISHRA S, MISHR H N. Effect of synbiotic interaction of fructooligosaccharide and probiotics on the acidification profile, textural and rheological characteristics of fermented soy milk[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, 6(11): 3166–3176.
- [25] 杨爱君, 方培生, 余保宁, 等. 影响发酵酸奶粘度的因素及控制[C]// 第四届“益生菌, 益生元与健康”国际研讨会论文集. 广州: 广东省食品学会, 2005: 51–53.
- YANG A J, FANG P S, YU B N, et al. Factors affecting the viscosity of fermented yogurt and their control[C]// *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on Probiotics, Prebiotics and Health*. Guangzhou: Guangdong Institute of Food Science and Technology, 2005: 51–53.
- [26] 魏光强, 陈越, 卓加珍, 等. 酸奶发酵和冷藏过程中品质评价及主要风味成分变化分析[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(18): 113–119.
- WEI G Q, CHEN Y, ZHUO J Z, et al. Quality evaluation and change analysis of main flavor components during yogurt fermentation and cold storage[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2019, 45 (18): 113–119.

### Effect of Protein Content on Micro-rheology and Storage Characteristics of Stirred Fermented Milk

Yang Shujuan, Shi Jiaqi, Sun Yuexin, Li Jing, Liu Junxia, Yang Zhihui, Sun Zhihong, Bai Mei\*  
(Key Laboratory of Dairy Biotechnology and Engineering, Ministry of Education, Key Laboratory of Dairy Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018)

**Abstract** The change of protein content will affect the characteristics of fermented milk, and then determine the quality of fermented milk. In this study, the effects of protein content of 2.4%, 2.8% and 3.2% on the micro-rheological properties of fermented milk during fermentation were analyzed by multi-frequency diffusion spectroscopy, and the texture characteristics and stability of fermented milk with different protein content during storage were analyzed, and sensory evaluation was also made. The results of micro-rheological analysis showed that the milk gel formed by the increase of protein content had higher solid-liquid equilibrium value and lower elastic factor, and had no effect on flow factor, but the time to reach gel point was shorter, which shortened the fermentation time. It was speculated that the increase of protein content accelerated the aggregation of casein particles. At the end of fermentation, the viscosity factor of fermented milk with protein content of 2.8% was the highest. During storage, the viscosity, consistency and cohesion of fermented milk with protein content of 2.8% were significantly higher than those of the other two groups ( $P < 0.05$ ), and the texture state was the best. The water holding capacity of fermented milk with protein content of 2.4% was significantly lower than that of protein content of 2.8% and protein content of 3.2% ( $P < 0.05$ ). The pH value and titration acidity increased with the increase of protein content, and the pH value and titration acidity of fermented milk in three groups changed uniformly ( $P > 0.05$ ), but the pH value of 3.2% protein group was always higher than the other two groups, and the higher the protein content, the higher the titration acidity. Sensory evaluation showed that the scores of fermented milk with protein content of 2.8% and 3.2% were close to each other, which was better than that with protein content of 2.4%. This study provides data support and theoretical reference for the development of fermented milk with different protein content, and has certain guiding significance for the development of diversified fermented milk products.

**Keywords** protein content; fermented milk; micro-rheology; texture