

网络出版时间:2022-09-06 11:58

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2023.03.014

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20220905.1756.006.html

低温贮藏时间对黄浆水酸奶稳定性的影响

刘文星,刘忠义,惠丹阳,周 蓉

(湘潭大学 化工学院化学工程与技术系,湖南 湘潭 411105)

[摘 要] 【目的】探索搅拌型黄浆水酸奶的稳定性随贮藏时间延长而变差的主要原因,为提高黄浆水酸奶的稳定性提供参考。【方法】以普通酸奶、大豆多糖酸奶为参照,以还原糖、粗多糖、pH、滴定酸度、持水力、表面疏水性、 δ -电位、粒径、硬度和黏性以及微观结构为指标,将黄浆水酸奶于 4 °C 下贮藏 1,3,5,7,9 d 后,取样分析其理化指标、凝乳结构及其间相互作用的变化,探究黄浆水酸奶的失稳机理。【结果】4 °C 低温贮藏过程中,黄浆水酸奶、大豆多糖酸奶和普通酸奶分别在贮藏的第 5,7 和 9 天出现乳清析出和油脂上浮现象。随贮藏时间延长,3 种酸奶的还原糖含量总体均呈缓慢增加趋势,且在第 7 天开始大豆多糖酸奶及黄浆水酸奶中的还原糖增加幅度均显著高于普通酸奶,而 3 种酸奶中的粗多糖含量总体均始终呈减少趋势且无差异。低温贮藏 1 d 时,大豆多糖酸奶和黄浆水酸奶的 pH 均显著低于普通酸奶($P<0.05$),随贮藏时间延长,3 种酸奶的 pH 均总体呈下降趋势,至第 9 天时均稳定在 4.3 左右。黄浆水酸奶滴定酸度贮藏 1 d 就达 100 °T 以上,显著高于大豆多糖酸奶,且均显著高于普通酸奶;3 种酸奶的滴定酸度均随贮藏时间延长而持续上升,但普通酸奶和大豆多糖酸奶的滴定酸度值均未超过 100 °T,且均显著低于黄浆水酸奶($P<0.05$)。低温贮藏过程中,普通酸奶和黄浆水酸奶持水力均呈先增加后降低趋势,分别在第 5 天和第 3 天达到峰值,大豆多糖酸奶的持水力整体呈升高趋势,且第 7 天起显著高于其余 2 种酸奶($P<0.05$)。大豆多糖酸奶和黄浆水酸奶的疏水性在贮藏 7 d 后仍能保持在 300 以上,且均显著高于普通酸奶($P<0.05$)。大豆多糖酸奶的 δ -电位绝对值始终维持在 6.8 mV 以上,而另外 2 种酸奶在贮藏 3~5 d 后迅速下降到 5 mV 左右。在贮藏过程中,所有酸奶的粒径均呈增长趋势,但黄浆水酸奶和大豆多糖酸奶的粒径均维持在 1 μm 以下,显著低于普通酸奶(1.4~2.0 μm)($P<0.05$)。低温贮藏 1 d 时,大豆多糖酸奶的硬度显著高于另外 2 种酸奶;随贮藏时间延长,普通酸奶的硬度持续增加,而大豆多糖酸奶和黄浆水酸奶的硬度随贮藏时间总体呈波动下降趋势,均于第 9 天达到最低。随贮藏时间延长,普通酸奶的黏性持续上升,黄浆水酸奶和大豆多糖酸奶的黏性呈波动下降,并分别在第 7 和 9 天呈显著下降趋势。【结论】影响黄浆水酸奶稳定性的关键因素是其黏性的显著降低,其次是静电作用和疏水作用的变化。

[关键词] 黄浆水;酸奶;低温贮藏;贮藏品质;酸奶稳定性

[中图分类号] TS252.54

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2023)03-0132-11

Effect of low temperature storage time on stability of tofu whey yogurt

LIU Wenxing, LIU Zhongyi, HUI Danyang, ZHOU Rong

(Chemical Engineering and Technology Department, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan 411105, China)

Abstract: 【Objective】The main reason for stability decrease of stirred tofu whey yogurt with the extension of storage time was explored to provide reference for improving the stability of tofu whey yogurt. 【Method】Taking ordinary yogurt and soybean polysaccharides yogurt as references and using reducing sugar, crude polysaccharide, pH, titrated acidity, water holding capacity, surface hydrophobicity, δ -poten-

[收稿日期] 2022-01-21

[基金项目] 湖南省科技厅农业科技支撑计划重点项目(2017NK2092);广东省天然产物绿色加工与产品安全重点实验室开放基金项目(201610)

[作者简介] 刘文星(1996—),男,重庆巴南人,在读硕士,主要从事食品与生物化工研究。E-mail:13897238984@163.com

[通信作者] 刘忠义(1964—),男,湖南涟源人,教授,硕士生导师,主要从事食品与生物化工研究。E-mail:lzyly08@126.com

tial, particle size, hardness, viscosity and microstructure as indicators, tofu whey yogurt was stored at 4 °C for 1, 3, 5, 7 and 9 days, respectively. The physical and chemical indicators, curd structure and the interactions among them were analyzed to explore the instability mechanism of tofu whey yogurt. 【Result】 During low temperature storage at 4 °C, tofu whey yogurt, soybean polysaccharides yogurt and ordinary yogurt showed whey separation and oil floating phenomenon in days 5, 7 and 9, respectively. With the prolongation of storage time, their reducing sugar contents yogurt showed a slowly increasing trend, and the increases in soybean polysaccharide yogurt and tofu whey yogurt were significantly higher than that in ordinary yogurt since day 7, while their crude polysaccharide contents showed a decreasing trend without difference. After 1 day of low temperature storage, pH of soybean polysaccharide yogurt and tofu whey yogurt was significantly lower than that of ordinary yogurt ($P < 0.05$). As storage time prolonged, their pH showed an overall downward trend, and became stable at 4.3 on day 9. After 1 day of storage, titrated acidity of tofu whey yogurt exceeded 100 °T, which was significantly higher than that of soybean polysaccharide yogurt, and both of them were significantly higher than that of ordinary yogurt. The titrated acidity increased along with storage time, but the titrated acidity values of ordinary yogurt and soybean polysaccharide yogurt did not exceed 100 °T and were significantly lower than that of tofu whey yogurt ($P < 0.05$). During low temperature storage, water holding capacity of ordinary yogurt and tofu whey yogurt increased first and then decreased with peak values on day 5 and 3, respectively. The water holding capacity of soybean polysaccharide yogurt showed an overall increasing trend, which was always higher than those of the other two from day 7 ($P < 0.05$). The hydrophobicity of soybean polysaccharide yogurt and tofu whey yogurt remained above 300 after 7 days of storage, and it was significantly higher than that of ordinary yogurt ($P < 0.05$). The δ -potential value of soybean polysaccharide yogurt remained above 6.8 mV all the time, while that of the other two rapidly dropped to 5 mV after 3—5 days. During storage, grain size of all yogurt types increased, but those of tofu whey yogurt and soybean polysaccharide yogurt remained below 1 μm , significantly lower than that of ordinary yogurt (1.4—2.0 μm) ($P < 0.05$). When stored at low temperature for 1 day, hardness of soybean polysaccharide yogurt was significantly higher than that of others. The hardness of common yogurt continued to increase along with storage time, while that of soybean polysaccharide yogurt and tofu whey yogurt fluctuated and decreased, reaching the lowest on day 9. The viscosity of ordinary yogurt continued to increase with the extension of storage time, while that of tofu whey and soybean polysaccharide yogurt fluctuated and decreased significantly on day 7 and day 9, respectively. 【Conclusion】 The key factor affecting stability of tofu whey yogurt was the significant reduction of viscosity, followed by the changes of electrostatic and hydrophobic action.

Key words: tofu whey; yogurt; low temperature storage; storage quality; steadiness of yogurt

牛奶因营养丰富、易于吸收而为广大消费者所青睐,牛奶发酵形成酸奶后,由于其中的乳糖转化为乳酸,可被乳糖不耐症患者良好利用和吸收^[1],因此酸奶具有更高的食用价值。酸奶中的乳酸菌具有调节胃肠道菌落、改善人体胃肠道功能、维持人体器官微生态平衡、降低胆固醇、提高身体免疫力等多种功能^[2]。

在豆制品加工过程中会产生大量黄浆水,黄浆水既含有蛋白质、低聚糖、可溶性糖类、大豆异黄酮、大豆皂苷及无机盐等丰富的营养物质,也含有胰蛋白酶抑制因子、凝血素、脂酶、豆腥味等大豆特有的

嫌忌成分。黄浆水可以被乳酸菌很好发酵,用于酸浆及风味发酵乳等的生产^[3]。在乳酸菌发酵过程中,黄浆水中的己醛等羰基化合物渐渐转化为有机酸而消减了豆腥臭味,并且产生了类似酸牛乳的香味及柔和的酸味^[3]。

黄浆水酸奶是在传统的酸奶加工工艺基础上,将黄浆水与纯净水混合添加到奶粉中而形成的复原乳,它既弥补了酸奶中缺少的大豆异黄酮、大豆皂苷和大豆多糖等营养成分,又使发酵后的酸奶具有独特的风味和口感。但目前黄浆水酸奶也存在一些不足,如由于营养抑制因子的存在以及糖苷形态的大

豆异黄酮使黄浆水中营养成分不易消化,加入黄浆水后出现令人不喜的豆腥味,黄浆水酸奶酪蛋白凝乳结构稳定性较差等。通过发酵能消减黄浆水中的抗营养因子,也能消除一部分豆腥味,但是较高含量的大豆异黄酮、皂苷等使酸奶仍然存在口味上的缺陷^[4];黄浆水中大豆多糖、低聚糖、蛋白质等的相互作用,会促进微生物的生长繁殖^[5],但同时也会使酸奶凝乳结构易被破坏,导致储存稳定性变差^[3]。因此,与所有豆基酸奶一样,黄浆水酸奶存在风味和稳定性不足的问题。

本试验以普通酸奶、大豆多糖酸奶、黄浆水酸奶为研究对象,通过对酸奶的 pH、滴定酸度、持水力、质构、 δ -电位、疏水性、微观结构等随贮藏时间的变化进行研究,以期从微观层面探讨黄浆水酸奶凝乳稳定性差、储存时间短的原因,进而为进一步提高酸奶的稳定性提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

黄浆水,来自当地豆制品工厂,其蛋白质、粗多糖、还原糖和大豆异黄酮的质量浓度分别为 1.60, 4.50, 1.01 和 0.20 g/L;白砂糖,华坊城食品有限公司;酸奶发酵剂(主要由嗜热链球菌和保加利亚乳杆菌组成),北京川秀国际贸易有限公司;3,5-二硝基水杨酸,国药集团化学试剂有限公司;牛血清白蛋白,上海阿拉丁生化科技有限公司;考马斯亮蓝 G250,天津市光复精细化工研究所;ANS 荧光探针,上海麦克林生化科技有限公司。其他化学试剂均为分析纯或者生化试剂。

1.2 仪器与设备

DL-6M 冷冻离心机,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;ZD-2 自动电位滴定仪,上海康仪仪器有限公司;SPX-250B-D 振荡培养箱,上海博远实业有限公司;BAS224S 电子天平,赛多利斯科技有限公司;UV-VIS 紫外分光光度计,美国安捷伦科技有限公司;DK-98-II A 电热恒温水浴锅,天津市泰斯邦仪器有限公司;F97pro 荧光分光光度计,上海棱光技术有限公司;UniversalTA 质构仪,上海腾拔仪器科技有限公司;MIRA3 TESCANA 电子扫描显微镜,北京亚科晨旭科技有限公司;Zetasizer nano ZS90 电位粒度仪,英国马尔文仪器公司;SXXW 数显控温电热套,北京市永光明医疗仪器有限公司。

1.3 酸奶的制作

参照吴小艳等^[6]的方法,确定普通酸奶的发酵

工艺为:将奶粉和水按质量比 1:8 混合溶解形成复原乳,将酸奶质量 8% 的白砂糖加热搅拌溶解后加入复原乳中,在 60 MPa 的工作压力下均质 10 min 后倒入圆底烧瓶内,于电热套内控温 95 °C 灭菌 5 min,倒入烧杯冷却至 45 °C,再添加酸奶发酵剂搅拌均匀后密封,置于 43 °C 下发酵 10 h 后取出,待冷却至室温后,1 000 r/min 搅拌 5 min,密封后置于 4 °C 冰箱中后熟 24 h,即得普通酸奶。大豆多糖酸奶的制作是,先将酸奶质量 1.5% 的大豆多糖(根据黄浆水中多糖含量换算所得)与酸奶质量 8% 的白砂糖混合,再与水混合溶解,然后再与奶粉混合溶解,其余步骤与普通酸奶发酵工艺一致。黄浆水酸奶的制作是,在普通酸奶发酵工艺的基础上,按黄浆水和纯净水的体积比 0.4:0.6 混合,再与奶粉混合溶解形成复原乳,其余步骤与普通酸奶发酵工艺一致。随后,将酸奶于 4 °C 冰箱中贮藏,开始进行贮藏稳定性试验。

1.4 酸奶贮藏稳定性观察及理化指标的测定

1.4.1 贮藏稳定性观察 将酸奶置于 4 °C 冰箱中开始计时,分别于贮藏 1,3,5,7,9 d 后,直接从冰箱中取出置于白色背景下,使酸奶杯倾斜并始终与桌面保持 60° 的倾斜角度,肉眼观察酸奶中油脂上浮、乳清析出、凝乳状态的变化情况。贮藏稳定性观察后的酸奶分 2 次均称取 10 g,分别用于 pH、滴定酸度和持水力的测定以及质构分析。

1.4.2 还原糖和粗多糖含量测定 还原糖含量测定采用二硝基水杨酸(DNS)法,具体参考 Alexander 等^[7]的方法。粗多糖含量测定参考 SN/T 4260—2015 中出口植物源食品中粗多糖的测定^[8]方法。

1.4.3 pH 和滴定酸度 pH 测定采用 ZD-2 自动电位滴定仪。滴定酸度测定参考 GB 5009.239—2016 中食品酸度的测定^[9]方法。

1.4.4 持水力 持水力测定参考吴小艳等^[6]的方法。

1.4.5 表面疏水性 蛋白质表面疏水性的测定参考刘鹏等^[10]的 ANS 荧光探针方法。

1.4.6 酸奶 δ -电位及粒径 酸奶 δ -电位和粒径的测定参考刘鹏等^[10]的方法:分别称取 4 °C 下贮藏 1, 3, 5, 7, 9 d 的酸奶样品各 1 g,根据测定酸奶的蛋白质含量,用去离子水稀释,得到质量浓度为 10 g/L 的蛋白溶液,在 20 °C 下用 Zetasizer nano ZS90 电位粒度仪测定。

1.5 酸奶质构分析

参考吴小艳等^[11]的方法,将贮藏稳定性观察后

的酸奶直接进行质构分析。选用 P/BE 反挤压装置,压力盘直径为 35 mm。测定参数设置:下降速度和测试速度均为 1.0 mm/s,提升速度为 10.0 mm/s,测试深度 15.0 mm,记录探入过程中所需的硬度及黏性。

1.6 酸奶微观结构观察

参考吴小艳等^[11]的方法,将在 4℃下分别贮藏 1,3,5,7,9 d 的酸奶样品均匀薄涂在培养皿内壁上,在液氮中冷冻后迅速放入真空冷冻干燥机中进行干燥处理,然后采用离子溅射法镀金,而后进行扫描电镜(SEM)制片,最后在 10 kV 电压和 6 000 倍的放大倍率下进行观察并拍照。

1.7 数据处理

所有试验均进行 3 次平行,试验数据采用软件 SPSS 17.0 的 One-way ANOVA 程序进行均值计算与方差分析;采用 Duncan's multiple range test 方法进行差异显著性分析,以 $P<0.05$ 表示存在显著性差异;数值以“平均值±标准差”表示,采用 Origin8.0 软件绘图。

2 结果与分析

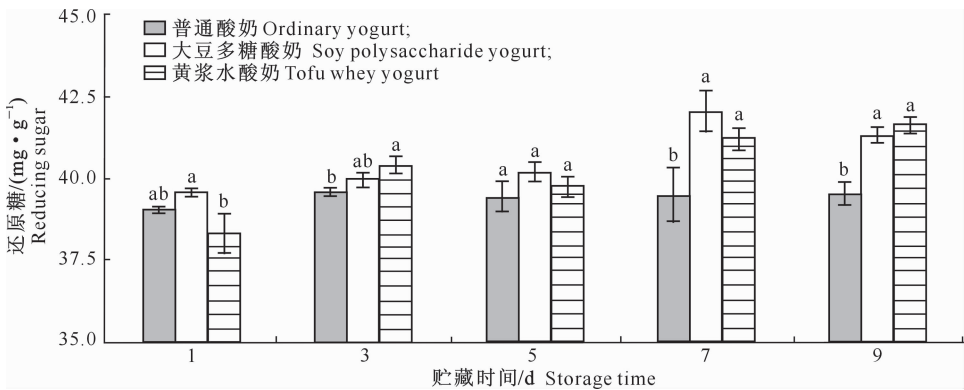
2.1 酸奶贮藏稳定性观察

观察发现,黄浆水酸奶在贮藏第 5 天即出现乳清析出和油脂上浮现象,至第 9 天乳清析出严重,肉眼可见凝乳变稀;大豆多糖酸奶和普通酸奶分别在贮藏的第 7 和 9 天出现乳清析出和油脂上浮现象,且大豆多糖酸奶在贮藏第 9 天时有乳清明显析出。三者相比,普通酸奶的贮藏稳定性最好,大豆多糖酸奶次之,黄浆水酸奶贮藏稳定性最差。

2.2 贮藏时间对酸奶还原糖和粗多糖含量的影响

由图 1 可知,随着贮藏时间的延长,3 种酸奶中的还原糖含量总体均呈缓慢增加趋势,但从贮藏第 3 天开始,大豆多糖酸奶和黄浆水酸奶中的还原糖增加幅度均高于普通酸奶,且在贮藏后期(贮藏第 7 天后)存在显著差异($P<0.05$)。Wang 等^[12]的研究表明,酸奶中粗多糖被乳酸菌分解成还原糖而导致还原糖含量持续增加。

贮藏时间对不同酸奶粗多糖含量的影响见图 2。



图柱上标不同小写字母表示同一贮藏时间不同酸奶样品间差异显著($P<0.05$)。下图同
Different lowercase letters mean significant difference among samples at same storage time ($P<0.05$). The same below

图 1 贮藏时间对不同酸奶还原糖含量的影响

Fig. 1 Effect of storage time on reducing sugar contents of different yogurt

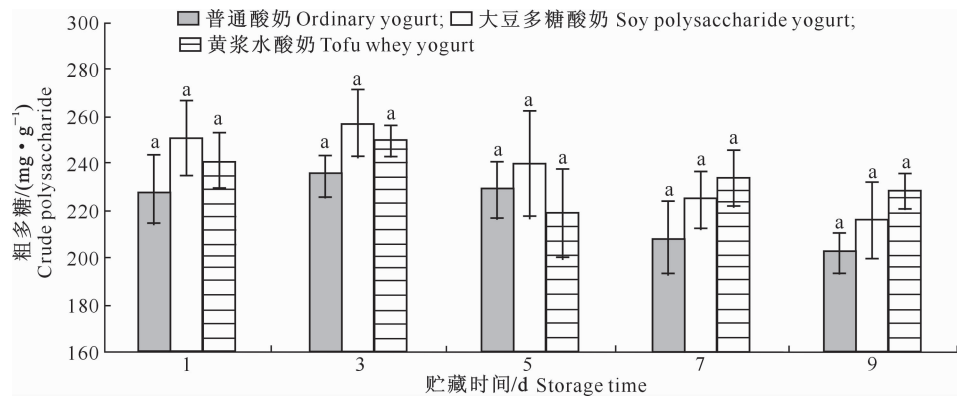


图 2 贮藏时间对不同酸奶粗多糖含量的影响

Fig. 2 Effect of storage time on crude polysaccharide contents of different yogurt

图 2 表明,随贮藏时间的延长,3 种酸奶中的粗多糖含量总体均呈减少趋势,且三者之间差异均不显著。这与酸奶还原糖含量随贮藏期延长而增加的结果相吻合,也与 Wang 等^[12]的研究结果基本一致。酸奶中粗多糖含量的降低以及还原糖含量的增加表明,即使是在 4℃ 的低温条件下后熟及贮藏,酸奶中的乳酸菌依然在继续发生作用,这一结果也为 Luzzi 等^[13]所证实。

2.3 贮藏时间对酸奶 pH 和滴定酸度的影响

从表 1 可以看出,随贮藏期延长,3 种酸奶的 pH 总体均呈降低趋势。在贮藏开始的第 1 天,普通酸奶的 pH 显著高于其余 2 种酸奶($P<0.05$);在贮藏第 3 天时,3 种酸奶间 pH 差距减小,但普通酸奶和大豆多糖酸奶之间仍然存在显著差异($P<$

0.05);在贮藏第 5 天,普通酸奶 pH 下降明显,显著低于大豆多糖酸奶,又都显著低于黄浆水酸奶($P<0.05$);在贮藏第 7 天时,黄浆水酸奶的 pH 显著高于其余 2 种酸奶($P<0.05$);至贮藏第 9 天,3 种酸奶 pH 值均略有回升,且大豆多糖酸奶的 pH 显著高于其余 2 种酸奶($P<0.05$)。分析其原因是糖类分解过快,导致碳氮比过低,氨基氮释放,引起 pH 升高^[14]。随酸奶贮藏时间延长,其中的乳酸菌持续发酵,导致 pH 持续降低,但基本在贮藏 5 d 后趋于稳定,发酵速度减缓。这说明在低温后熟和贮藏过程中,酸奶的酸度一直在发生缓慢的变化。周连玉等^[15]对晒酸奶的贮藏研究中也发现了相同的变化规律。

表 1 贮藏时间对不同酸奶 pH 的影响

Table 1 Effect of storage time on pH of different yogurt

贮藏时间/d Storage time	普通酸奶 Ordinary yogurt	大豆多糖酸奶 Soy polysaccharide yogurt	黄浆水酸奶 Tofu whey yogurt	贮藏时间/d Storage time	普通酸奶 Ordinary yogurt	大豆多糖酸奶 Soy polysaccharide yogurt	黄浆水酸奶 Tofu whey yogurt
1	4.50±0.03 a	4.40±0.02 b	4.43±0.01 b	7	4.29±0.01 b	4.29±0.01 b	4.32±0.01 a
3	4.42±0.10 a	4.38±0.01 b	4.40±0.01 ab	9	4.31±0.01 b	4.37±0.01 a	4.33±0.02 b
5	4.30±0.01 c	4.34±0.01 b	4.36±0.01 a				

注:同行数据后标不同小写字母表示同一贮藏时间不同酸奶样品间差异显著($P<0.05$)。下表同。
Note: Different lowercase letters mean significant difference among samples at same storage time ($P<0.05$). The same below.

图 3 是酸奶贮藏过程中滴定酸度的变化情况。由图 3 可以看出,随贮藏时间延长,3 种酸奶的滴定酸度总体均呈持续增加趋势,这与 pH 呈下降趋势相关联,与吴小艳等^[11]的研究结果一致。在 3 种酸奶贮藏过程中,其酸度一直表现为黄浆水酸奶>大豆多糖酸奶>普通酸奶,大豆多糖酸奶的酸度在贮

藏的前 3 d 显著大于普通酸奶($P<0.05$),之后二者差异不显著($P>0.05$);而黄浆水酸奶的酸度一直显著大于其余 2 种酸奶($P<0.05$),这与 3 种酸奶 pH 的变化规律略有差异,表明大豆多糖能促进酸奶中微生物的生长,同时黄浆水中一些其他营养因子也具有促进作用^[3]。

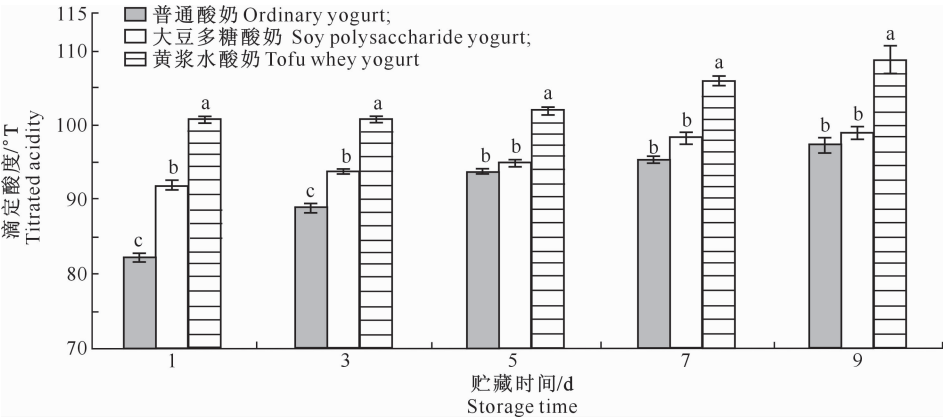


图 3 贮藏时间对不同酸奶滴定酸度的影响

Fig. 3 Effect of storage time on titrated acidity of different yogurt

2.4 贮藏时间对酸奶持水力的影响

图 4 是酸奶贮藏过程中持水力的变化情况。由图 4 可见,贮藏第 1 天时,大豆多糖酸奶持水力显著

高于其余 2 种酸奶($P<0.05$)。随贮藏时间延长,3 种酸奶持水力的变化趋势完全一致,均呈先上升后下降并逐渐趋于稳定的趋势,只是达到峰值的时间

稍有不同。其中黄浆水酸奶在贮藏第 3 天达到峰值,然后逐步降低;大豆多糖酸奶在贮藏第 5 天时达到峰值,随后基本稳定,且从第 7 天起显著高于其余 2 种酸奶($P<0.05$);普通酸奶也在贮藏第 5 天达到峰值,随后持续下降,且之后一直高于黄浆水酸奶,但二者之间差异不显著($P>0.05$)。这说明随贮藏时间的延长,发酵持续进行,持水力上升,酪蛋白胶

束凝结,稳定性进一步提升,酪蛋白-多糖络合物结合更加紧密;随贮藏时间的进一步延长,贮藏后期持水力的下降引起了酸奶结构的变化,酸奶脱水缩合,稳定性下降,这一现象与 Sofia 等^[16]的研究结果相一致。持水力的变化规律暴露出黄浆水酸奶贮藏稳定性不好的缺陷,故推测黄浆水中其他营养因子对酸奶持水力有一定的影响^[17]。

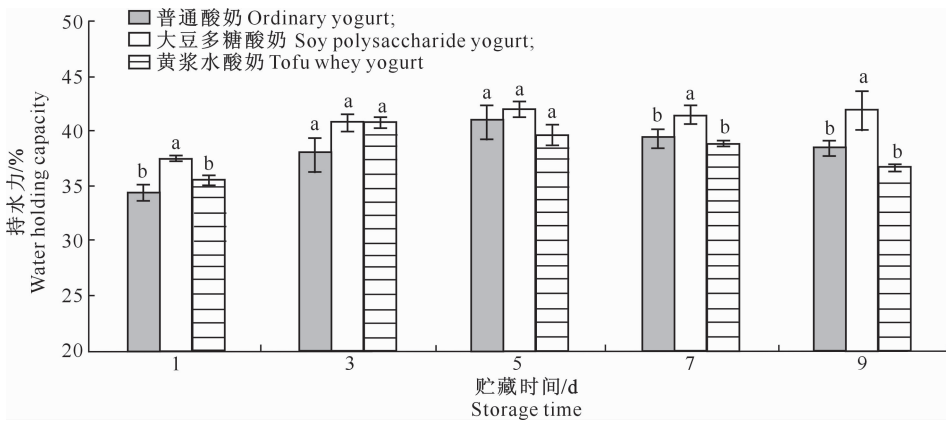


图 4 贮藏时间对不同酸奶持水力的影响

Fig. 4 Effect of storage time on water holding capacity of different yogurt

2.5 贮藏时间对酸奶表面疏水性的影响

在不同贮藏时间 3 种酸奶表面疏水性的测定结果见表 2。由于仪器故障导致贮藏第 9 天数据异常,故舍去。从表 2 可以看出,随贮藏时间延长,前期 3 种酸奶的表面疏水性均有所增加,普通酸奶和黄浆水酸奶在贮藏第 3 天达到峰值,而大豆多糖酸奶在贮藏第 5 天达到峰值,随后 3 种酸奶的疏水性均开始下降,贮藏前 5 d,3 种酸奶均无显著性差异($P>0.05$),贮藏第 7 天时普通酸奶显著低于其余 2 种酸奶($P<0.05$)。由 David 等^[18]的报道可知,表面疏水性是蛋白质分子为减少氢键的损失,水分子

在疏水表面形成的与水相主体不同的独特形态,即“水笼”或“溶剂化层”,表面疏水性越强,酪蛋白凝乳分子间排斥力越大,凝乳结构越稳定。本试验中,随贮藏时间延长,普通酸奶和黄浆水酸奶的表面疏水性在第 3 天后开始降低,而大豆多糖酸奶在第 5 天后开始降低。表面疏水性降低,即蛋白质为胶粒提供的阻止其聚结的能力减弱,导致凝乳结构出现变化,可以看出普通酸奶的表面疏水性变化最为明显,故表面疏水性降低只是酸奶凝乳结构变差的原因之一,可能还存在其他导致黄浆水酸奶稳定性变差的原因。

表 2 贮藏时间对不同酸奶表面疏水性的影响

Table 2 Effect of storage time on surface hydrophobicity of different yogurt

贮藏时间/d Storage time	普通酸奶 Ordinary yogurt	大豆多糖酸奶 Soy polysaccharide yogurt	黄浆水酸奶 Tofu whey yogurt	贮藏时间/d Storage time	普通酸奶 Ordinary yogurt	大豆多糖酸奶 Soy polysaccharide yogurt	黄浆水酸奶 Tofu whey yogurt
1	326.48±15.36 a	319.43±19.21 a	307.31±13.49 a	5	282.60±0.24 a	342.92±26.92 a	342.81±29.27 a
3	355.48±26.16 a	314.83±44.26 a	364.02±26.73 a	7	234.60±4.43 b	308.83±15.09 a	314.30±3.33 a

2.6 贮藏时间对酸奶电位的影响

从表 3 可以看出,贮藏刚开始时普通酸奶和黄浆水酸奶 δ -电位的绝对值均较大,随贮藏时间延长,3 种酸奶 δ -电位的绝对值均总体呈下降趋势,且在后期逐渐趋于稳定,但大豆多糖酸奶 δ -电位的绝对值在第 5 天和第 7 天显著高于黄浆水酸奶($P<0.05$),在第 7 天和第 9 天显著高于普通酸奶($P<0.05$)。

Sun 等^[19]认为, δ -电位绝对值越大,酸奶结构越稳定。由表 3 可见,贮藏刚开始时,普通酸奶和黄浆水酸奶的结构比较稳定,但随贮藏时间延长,普通酸奶和黄浆水酸奶 δ -电位的绝对值下降更为迅速且下降幅度更大,至第 5 天后大豆多糖酸奶 δ -电位的绝对值变为最大且很稳定,故推测大豆多糖的加入能延长酸奶的贮藏时间,这与 Liu 等^[20]的研究结果相一致。分析其原因,Namita 等^[21]认为,酸奶发酵中

阴性多糖和酪蛋白产生静电交互形成络合物(一个粒子或者大分子上的正电荷可以同另一个粒子或大分子上的负电荷发生作用,形成盐桥),能有效防止蛋白质沉淀。同时,依据 Chen 等^[22]的报道,静电相互作用取决于表面电势,是受 pH 影响的稳定酪蛋白结构的重要作用力。结合前面的试验结果表明,

表 3 贮藏时间对不同酸奶 δ-电位的影响

Table 3 Effect of storage time on potential of different yogurt				mV			
贮藏时间/d Storage time	普通酸奶 Ordinary yogurt	大豆多糖酸奶 Soy polysaccharide yogurt	黄浆水酸奶 Tofu whey yogurt	贮藏时间/d Storage time	普通酸奶 Ordinary yogurt	大豆多糖酸奶 Soy polysaccharide yogurt	黄浆水酸奶 Tofu whey yogurt
1	-11.54±2.02 b	-8.04±0.18 a	-10.47±1.15 b	7	-4.75±0.58 a	-7.21±0.16 b	-4.53±0.27 a
3	-8.35±0.11 a	-7.19±0.16 a	-4.90±0.43 a	9	-4.71±1.60 a	-7.19±0.16 b	-4.90±0.43 ab
5	-5.22±1.34 ab	-6.81±0.02 b	-3.82±0.18 a				

2.7 贮藏时间对酸奶粒径的影响

由图 5 可知,与普通酸奶相比,添加大豆多糖和黄浆水后发酵酸奶的粒径从普通酸奶的 1.4~2.0 μm 减小到 0.35~1.0 μm,且在不同贮藏时间其影响均达到显著水平($P<0.05$),同时大豆多糖酸奶粒径在贮藏前 5 d 也显著低于黄浆水酸奶($P<0.05$)。随贮藏时间延长,3 种酸奶的粒径均有所增加。据 Abesinghe 等^[23]报道,酸奶发酵过程中胶束运动发生碰撞产生凝胶。故分析黄浆水酸奶粒径变小的原因可能是,表面疏水作用使胶束碰撞频率降

随着贮藏时间延长,酸奶的 pH 值缓慢降低,这与 δ-电位绝对值的缓慢下降之间具有一定程度的关联性。同时也能看出,黄浆水中存在的其他营养成分会影响酸奶的 δ-电位,这也是黄浆水酸奶持水力较差的原因之一^[22]。

低,而大豆多糖酸奶样品的粒径最小,是静电斥力及表面疏水性共同作用的结果。Sinaga 等^[24]指出,酸奶凝乳结构随贮藏时间延长而聚集,会导致酸奶粒径变大,这也是酸奶结构出现不稳定状态的原因。粒径大的粒子在外力作用下更易变形甚至破碎,分散体系变成不均匀状态的时间越短。由于沉降速度、外力作用、粒子间作用力等,酸奶胶束粒子粒径越小,分离难度越大,这也与前面大豆多糖酸奶持水力的变化规律相符合。

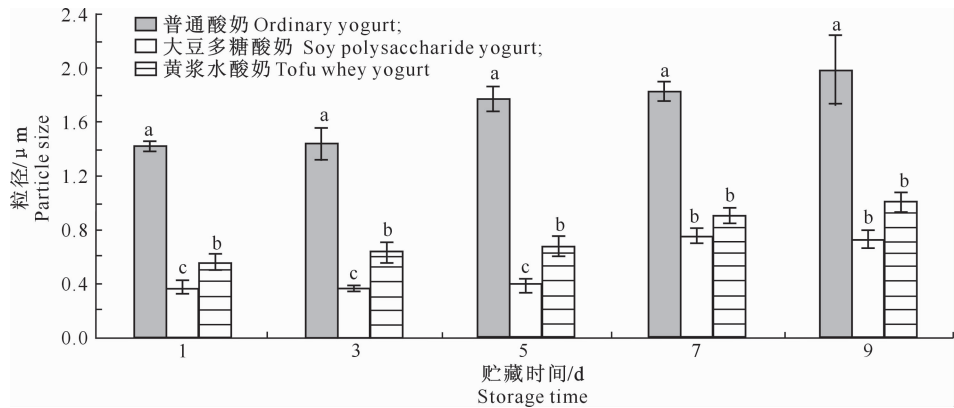


图 5 贮藏时间对不同酸奶粒径的影响

Fig. 5 Effect of storage time on particle size of different yogurt

2.8 贮藏时间对酸奶硬度和黏性的影响

由图 6 可知,刚开始时,与普通酸奶相比,添加大豆多糖后酸奶的硬度显著增加($P<0.05$),而添加黄浆水后酸奶的硬度虽略有增加,但差异不显著($P>0.05$)。根据 Sun 等^[19]的报道,这可能是因为普通酸奶和黄浆水酸奶前期 δ-电位绝对值较大,静电斥力大,酸奶体系分布均匀,凝乳颗粒不易聚集,故酸奶硬度不大。随着贮藏时间的延长,普通酸奶的硬度持续增加,于贮藏第 9 天达到最大;而大豆多

糖酸奶和黄浆水酸奶的硬度随贮藏时间的延长总体呈波动下降趋势,均于贮藏第 9 天达到最低,这与 Mousavi 等^[25]的研究结果一致。表 4 是酸奶黏性随贮藏时间的变化情况。由表 4 可知,刚开始时,大豆多糖酸奶的黏性显著高于普通酸奶($P<0.05$),而黄浆水酸奶的黏性只略高于普通酸奶($P>0.05$)。随着贮藏时间延长,酸奶持续发酵,普通酸奶的黏性持续增大,这与 Sinaga 等^[24]的研究结果一致;大豆多糖酸奶的黏性在贮藏

前期较为稳定,到贮藏第 9 天黏性急速下降,凝乳结构可能在此时发生变化;而黄浆水酸奶的黏性在贮藏第 7 天已降至 0.01 N·mm 以下,结合 Victoria 等^[26]的研究结果,说明黄浆水酸奶在贮藏第 7 天

时,凝乳结构不稳定现象明显,这与 2.1 节贮藏期间稳定性观察结果一致。黏性和硬度的急速下降,是黄浆水酸奶蛋白质吸附作用遭到破坏的表现。

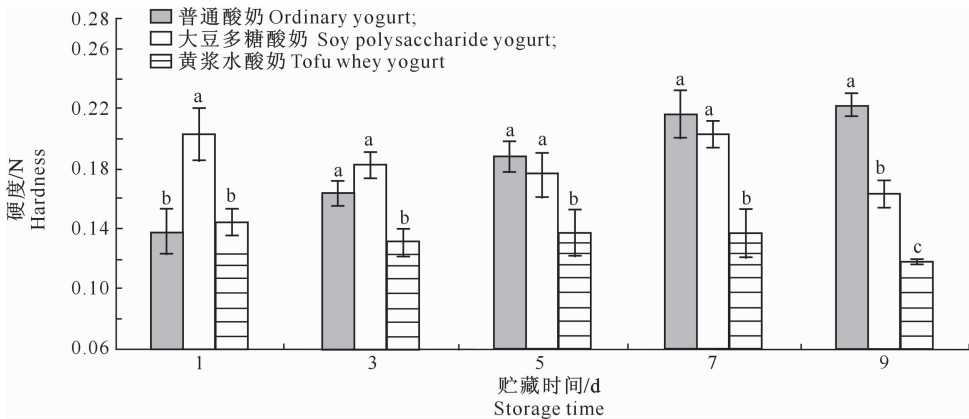


图 6 贮藏时间对不同酸奶硬度的影响

Fig. 6 Influence of storage time on hardness of different yogurt

表 4 贮藏时间对不同酸奶黏性的影响

Table 4 Influence of storage time on viscosity of different yogurt				N·mm			
贮藏时间/d Storage time	普通酸奶 Ordinary yogurt	大豆多糖酸奶 Soy polysaccharide yogurt	黄浆水酸奶 Tofu whey yogurt	贮藏时间/d Storage time	普通酸奶 Ordinary yogurt	大豆多糖酸奶 Soy polysaccharide yogurt	黄浆水酸奶 Tofu whey yogurt
1	0.145±0.026 b	0.363±0.058 a	0.161±0.009 b	7	0.354±0.032 a	0.329±0.071 a	0.007±0.000 b
3	0.165±0.016 b	0.292±0.041 a	0.095±0.023 b	9	0.502±0.099 a	0.162±0.000 b	0.007±0.000 c
5	0.368±0.024 a	0.362±0.024 a	0.196±0.026 b				

2.9 贮藏时间对酸奶微观结构的影响

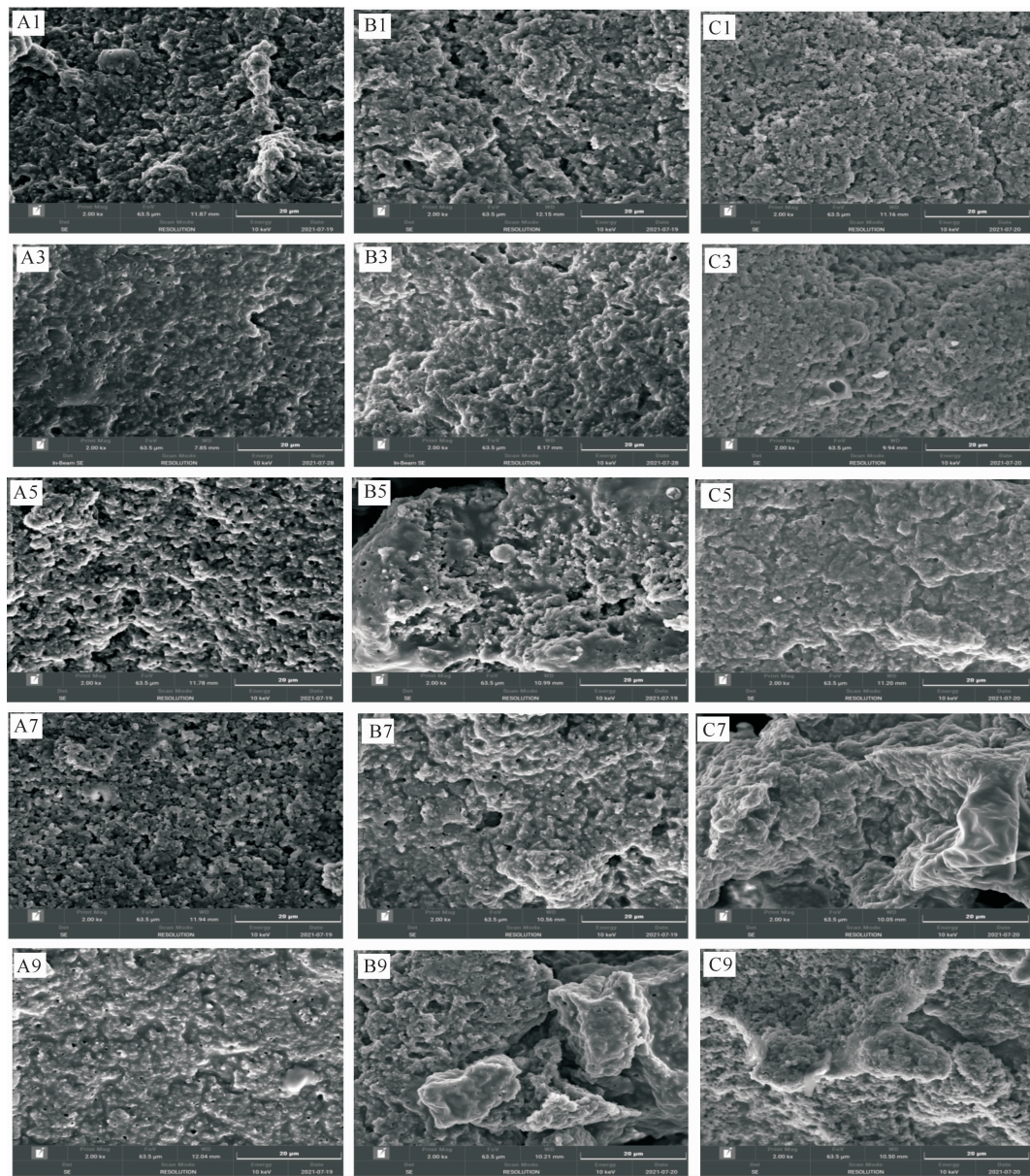
不同贮藏时间 3 种酸奶微观结构的显微观察结果见图 7。由图 7 可以看出,随贮藏时间延长,3 种酸奶的凝乳结构均发生了变化,酪蛋白胶束粒子脱水收缩,空间网状结构遭到破坏,酸奶稳定性变差。但不同酸奶结构变化的速度不同,黄浆水酸奶变化最快,普通酸奶变化最慢。贮藏 1 d 后(图 7-A1、B1、C1),普通酸奶酪蛋白胶束粒子粒径更大,颗粒聚集且不均匀,空隙间隔在 1~5 μm,支链粗且短,酪蛋白胶束之间连接不紧密;大豆多糖酸奶的凝乳结构更加紧密,颗粒相互聚集,空隙较小,故酸奶的持水力也最大;黄浆水酸奶凝乳结构连接紧密,酪蛋白胶束粒子粒径小(1~2 μm),空隙更加均匀,大小一致,组织分布更加均匀,支链细长且游离末端较少,呈交叉连接且网状结构稳定^[11]。可见黄浆水和大豆多糖的加入使酸奶能更快地形成稳定的凝乳结构,这与 Wang 等^[12]的研究结果相符。

由图 7 可以看出,随贮藏时间的延长(图 7-A3、B3、C3、A5、B5、C5、A7、B7、C7),普通酸奶的凝乳结构有了较大改善,大颗粒凝乳胶束数量明显减少,酪蛋白颗粒粒径均匀,分子之间交错连接,组织结构更

加稳定,持水力随之增加,这与 Sinaga 等^[24]的研究结果一致。大豆多糖酸奶的凝乳出现局部聚集情况,出现粒径较大的酪蛋白胶束,这可能是由于凝胶微脱水收缩所致,酸奶凝乳颗粒聚集,同时酸奶表面疏水性降低,导致酸奶部分区域结构稠密,而另一部分稀疏^[27]。黄浆水酸奶空隙逐渐变小,凝乳结构收缩紧密,酪蛋白逐渐聚集成大颗粒,渗透压上升,粒子间连成一片,但支链连接较为简单,导致酸奶中部分结合水被排出,持水力降低,乳清析出,故凝乳虽然收缩成团但空间网状结构反而不稳,脱水收缩现象明显。据 David 等^[18]报道,作为表面活性剂是蛋白质的功能之一。从图 7 可以看出,部分支链变短,导致其疏水性变弱,蛋白质在油脂中的溶解度降低,导致酸奶中油脂上浮,凝乳部分大分子聚集,酸奶结构被破坏。

由图 7 可以看出,贮藏 9 d 后(图 7-A9、B9、C9),普通酸奶出现空隙变小、渗透压升高、凝乳结构连成一片的现象,黏性下降,与 Sofia 等^[16]的研究结果相似,这预示酸奶即将发生脱水收缩。而大豆多糖酸奶和黄浆水酸奶由于黏性显著下降,导致部分蛋白质解聚,脱水收缩导致粒子网络结构重排等

交互影响,大豆多糖与蛋白质间相互作用力减弱,空位层变薄,体系失稳,酸奶结构破坏严重,这与陈晓霞等^[28]的研究结果一致。



A、B、C 分别为普通酸奶、大豆多糖酸奶、黄浆水酸奶,其后面的数字 1,3,5,7,9 分别表示贮藏 1,3,5,7,9 d
A,B 和 C are ordinary yogurt,soybean polysaccharide yogurt and tofu whey yogurt;Behind it,the number 1,3,5,7 and 9 represents storage time of 1,3,5,7 and 9 d,respectively

图 7 不同贮藏时间酸奶样品的扫描电镜观察

Fig.7 Scanning electron microscope observation of yogurt samples at different storage times

3 讨论与结论

本研究中 3 种酸奶贮藏期还原糖和粗多糖含量的变化,以及吴小艳等^[11]的研究结果均证实,在酸奶贮藏过程中,乳酸菌持续发生作用,酸奶 pH 降低,滴定酸度增加,进而导致静电作用以及表面疏水性发生变化。随贮藏时间的延长,酸奶的持水力、表

面疏水性均先增加后减小,这表明酸奶在贮藏期的稳定性变化也是先趋于稳定随后凝乳结构发生变化,这与电镜观察到的微观结构的变化一致。

Sofia 等^[16]、Sun 等^[19] 和 Chen 等^[22] 认为,受 pH 影响的静电作用力影响乳蛋白或大豆蛋白的结构和相互作用,从而影响蛋白质体系的乳化性质及稳定性;David 等^[18] 推测,疏水相互作用会影响蛋白

质体系的功能;Abesinghe 等^[23]和 Sinaga 等^[24]认为,蛋白质相互作用以及蛋白质与多糖的相互作用会引起酸奶凝乳的粒径变化,最终影响酸奶的稳定性;Sinaga 等^[24]和 Victoria 等^[26]的研究表明,酸奶的黏性会随 pH、温度、蛋白质溶解度、多糖交互作用等因素发生变化,进而影响酸奶的稳定性。

纵观本研究结果,从表面疏水作用、 δ -电位值及质构结果分析可知,导致酸奶脱水收缩的原因是贮藏后期酸奶 δ -电位绝对值变小,多糖与蛋白质间静电相互作用减弱,蛋白质表面疏水性下降,同时酸奶黏度、硬度变差,使得酪蛋白分子聚集,酸奶凝乳颗粒粒径变大,凝乳空隙的结合水被排出,最终导致乳清析出。

从表面疏水作用、 δ -电位值和酸奶粒径的测定结果及其变化分析可以发现,大豆多糖酸奶中多糖与蛋白质之间静电相互作用、蛋白质表面疏水作用均最大,黄浆水酸奶次之,普通酸奶相互作用最小;但结合酸奶的电镜观察及贮藏期稳定性观察结果可知,普通酸奶稳定性最好,黄浆水酸奶的稳定性不如大豆多糖酸奶,这说明静电相互作用和表面疏水作用不是影响黄浆水酸奶稳定性的最主要作用力。

从酸奶质构变化发现,随贮藏时间延长,普通酸奶黏性逐渐增加,大豆多糖酸奶黏性波动下降,而黄浆水酸奶黏性也有明显降低,故黏性降低可能是影响黄浆水酸奶凝乳结构变差的主要原因。

大豆多糖和黄浆水的添加,增加了酸奶结构的静电作用和疏水作用,降低了凝乳颗粒粒径,促进了酸奶发酵及凝乳的形成。酸奶贮藏过程中仍在持续发酵,黄浆水的添加显著降低了酸奶的黏性,这可能是黄浆水酸奶贮藏稳定变差的主要原因,因此要改善黄浆水酸奶凝乳结构稳定性首先应提高其黏性,并使酸奶黏性、疏水作用和静电相互作用达到某种平衡。探索提高黄浆水酸奶稳定性的方法和技术将是下一步研究的主要方向。

[参考文献]

[1] 张小平,师俊玲,李巨秀,等. 苹果果肉型酸奶生产工艺研究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2002,30(1):107-109.
Zhang X P, Shi J L, Li J X, et al. Processing procedure of producing yogurt mixed with apple pulp [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2002, 30(1): 107-109.

[2] 孙文凯. 乳酸菌与酵母菌共发酵乳的研制 [D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2016.

Sun W K. Development of co-fermented milk by lactic acid bacteria and yeast [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2016.

[3] 于璐. 利用豆腐黄浆水生产功能性风味发酵乳的研究 [D]. 山东青岛:中国海洋大学,2013.
Yu L. Study on functional flavor fermented milk made from bean curd yellow serofluid [D]. Qingdao, Shandong: Ocean University of China, 2013.

[4] Nishinari K, Fang Y, Nagano T, et al. Soy as a food ingredient [M]//Yada R. Proteins in food processing. 2nd ed. Kingdom: Woodhead Publishing, 2018:149-186.

[5] Cai Y, Cai B, Ikeda S. Stabilization of milk proteins in acidic conditions by pectic polysaccharides extracted from soy flour [J]. Journal of Dairy Science, 2017, 100(10):7793-7801.

[6] 吴小艳,刘文星,刘忠义,等. 芒果酸奶发酵及后熟过程中乳酸菌素的产生及其抑菌作用 [J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(7): 183-188.
Wu X Y, Liu W X, Liu Z Y, et al. Production and bacteriostasis of lactobacillin during the fermentation and ripening of mango yoghurt, and its bacteriostasis [J]. Journal of Food and Fermentation Industry, 2021, 47(7): 183-188.

[7] Alexander G, Elena K, Arkady S. Comparison of two methods for assaying reducing sugars in the determination of carbohydrate activities [J]. International Journal of Analytical Chemistry, 2011, 2011(5):1-4.

[8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 出口植物源食品中粗多糖的测定 苯酚-硫酸法:SN/T 4260—2015 [S]. 北京:中国标准出版社,2015.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Determination of crude polysaccharides in exported vegetable derived foods phenol sulfuric acid method:SN/T 4260—2015 [S]. Beijing, China Standards Press, 2015.

[9] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品酸度的测定:GB 5009. 239—2016 [S]. 北京:中国标准出版社,2016.
The State Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard determination of acidity in food:GB 5009. 239—2016 [S]. Beijing:China Standards Press, 2016.

[10] 刘鹏,先于王翘,邵信儒,等. 高压均质处理对大豆蛋白-乳清蛋白混合乳液性质的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(9):147-154.
Liu P, Xian Y W Q, Shao X R, et al. Effects of high pressure homogenization on properties of soybean protein-whey protein mixed emulsion [J]. Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Edi), 2020, 48(9):147-154.

[11] 吴小艳,刘忠义,刘文星,等. 复配稳定剂稳定芒果酸奶凝乳结构的作用机理 [J]. 浙江农业学报, 2020, 32(6):1082-1091.
Wu X Y, Liu Z Y, Liu W X, et al. Mechanism of compound stabilizer stabilizing curd structure of mango yogurt [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2020, 32(6):1082-1091.

- [12] Wang Y, Wu J, Lv M, et al. Metabolism characteristics of lactic acid bacteria and the expanding applications in food industry [J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2021, 9(5): 1-19.
- [13] Luzzi G, Brinks E, Fritsche J, et al. Microbial composition of sweetness-enhanced yoghurt during fermentation and storage [J]. *AMB Express*, 2020, 10(1): 1-7.
- [14] 黄莉. 浅析发酵过程中 pH 的影响与控制 [J]. *健康前沿*, 2017, 26(7): 266.
Huang L. Influence and control of pH in fermentation process [J]. *Health Frontier*, 2017, 26(7): 266.
- [15] 周连玉, 焦璐, 钟睿, 等. 硒多糖酸奶贮藏期间的理化特性研究 [J]. *食品与发酵科技*, 2020, 56(1): 44-47.
Zhou L Y, Jiao L, Zhong R, et al. Study on the physicochemical properties of selenium polysaccharide yogurt during storage [J]. *Food and Fermentation Technology*, 2020, 56(1): 44-47.
- [16] Sofia L, Hani E, Konstantinos G. Incorporation of water-in-oil-water (W1/O/W2) double emulsion in a set-type yogurt model [J]. *Food Research International*, 2017, 100(2): 122-131.
- [17] 王欣欣. 利用黄浆水制备富含苷元型大豆异黄酮发酵乳的研究 [D]. 山东青岛: 中国海洋大学, 2014.
Wang X X. Study on production of soybean whey-yogurt rich with isoflavone aglycogenes [D]. Qingdao, Shandong: Ocean University of China, 2014.
- [18] David J M, Cansu E G. Natural emulsifiers-biosurfactants, phospholipids, biopolymers, and colloidal particles: molecular and physicochemical basis of functional performance [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2016, 234: 3-26.
- [19] Sun N X, Liang Y, Yu B, et al. Interaction of starch and casein [J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 60(10): 572-579.
- [20] Liu Q R, Qi J R, Yin S W, et al. Preparation and stabilizing behavior of octenyl succinic esters of soybean soluble polysaccharide in acidified milk beverages [J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 63(2): 421-428.
- [21] Namita J, Jasvirinder S K. Microbial polysaccharides in food industry [M]// Alexandru M G, Alina M H. *Biopolymers for food design*. New York: Academic Press, 2018: 95-123.
- [22] Chen Y, Hu J, Yi X, et al. Interactions and emulsifying properties of ovalbumin with tannic acid [J]. *LWT*, 2018, 95(9): 282-288.
- [23] Abesinghe N, Islam N, Vidanarachchi J, et al. Effects of ultrasound on the fermentation profile of fermented milk products incorporated with lactic acid bacteria [J]. *International Dairy Journal*, 2019, 90(3): 1-14.
- [24] Sinaga H, Bansal N, Bhandari B. Effects of milk pH alteration on casein micelle size and gelation properties of milk [J]. *International Journal of Food Properties*, 2016, 20(1): 179-197.
- [25] Mousavi M, Heshmati A, Garmakhany A D, et al. Texture and sensory characterization of functional yogurt supplemented with flaxseed during cold storage [J]. *Food Science, Nutrition*, 2019, 7(3): 907-917.
- [26] Victoria F, Antonio J T, Buenaventura G, et al. Physical characteristics during storage of soy yogurt made from ultra-high pressure homogenized soymilk [J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 92(1): 63-69.
- [27] 周洋, 陈雄, 陈勤勤, 等. 多重乳液-水凝胶复合包埋刺梨中维生素 C 在酸奶中的应用 [J]. *饮料工业*, 2021, 24(4): 36-41.
Zhou Y, Chen X, Chen Q Q, et al. Application of vitamin C in roxburghii embedded by emulsion-hydrogel composite in yoghurt [J]. *Beverage Industry*, 2021, 24(4): 36-41.
- [28] 陈晓霞, 陆利霞, 林丽军, 等. 抗性糊精对凝固型酸奶品质的影响 [J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(9): 91-97.
Chen X X, Lu L X, Lin L J, et al. Effect of resistant dextrin on quality of set yogurt [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2016, 42(9): 91-97.