

乳清蛋白粉对凝固型酸奶品质的影响

付丽¹, 刘旖旎², 陈丹雅¹, 申晓琳^{1,*}

(1. 河南牧业经济学院食品与生物工程学院, 河南郑州 450046;

2. 东北农业大学食品学院, 黑龙江哈尔滨 150000)

摘要:为提高凝固型酸奶的品质及安全性,将1%、1.5%、2%、2.5%、3%、4%、5%乳清蛋白粉(Whey protein powder, WPP)加入全脂乳粉中生产酸奶,以不添加WPP的凝固型酸奶为对照组,测定酸奶酸度、持水力(WHC)、脱水收缩敏感性(STS)、质构特性、流变学特性和微观结构变化,并进行感官评定,研究不同添加量乳清蛋白粉对凝固型酸奶品质特性的影响,以确定WPP最适添加量。结果表明:随着乳清蛋白粉添加量的增加,酸奶的滴定酸度、持水力、乳酸菌总数、硬度、胶着性、粘弹性、凝胶性逐渐增加,脱水收缩敏感性(STS)逐渐减小;当WPP添加量为2%时,酸奶的持水力、粘弹性都明显提升,STS明显降低,且具有较好的口感、更连续的网络结构,与对照组相比综合品质得到明显提高。

关键词:凝固型酸奶,凝胶微观结构,乳清蛋白,脱水收缩敏感性(STS)

Effect of Whey Protein Powder on the Quality of Solidified Yogurt

FU Li¹, LIU Yi-ni², CHEN Dan-ya¹, SHEN Xiao-lin^{1,*}

(1. College of Food and Biological Engineering, Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450046, China;

2. College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150000, China)

Abstract: In order to improve the quality and safety of the solidified yoghurt, 1%, 1.5%, 2%, 2.5%, 3%, 4%, 5% whey protein powder (WPP) was added to the whole milk powder. In the production of yoghurt, the coagulation yoghurt without WPP was used as a control group, and the acidity, water holding capacity (WHC), syneresis sensitivity (STS), texture characteristics, rheological properties and microstructure changes of the yoghurt were measured and sensed. The effect of different amounts of whey protein powder on the quality characteristics of solidified yogurt was evaluated to determine the optimum amount of WPP. The results showed that, with the increase of the amount of whey protein powder, the titration acidity, water holding capacity, total number of lactic acid bacteria, hardness, adhesiveness, viscoelasticity and gelation of yogurt increased gradually, and the syneresis sensitivity (STS) decreased gradually. When the amount of WPP was 2%, the water holding capacity and viscoelasticity of yogurt significantly increased, the STS significantly reduced, and it had a better taste and a more continuous network structure. Compared with the control group, the overall quality was significantly improved.

Key words: solidified yogurt; gel microstructure; whey protein; syneresis sensitivity (STS)

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2020)13-0039-07

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020.13.007

引文格式: 付丽, 刘旖旎, 陈丹雅, 等. 乳清蛋白粉对凝固型酸奶品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(13): 39-45.

酸奶具有独特的风味、细腻的口感, 不仅营养丰富, 而且有助于肠胃蠕动, 已成为世界上最受欢迎的发酵乳制品之一, 对全球乳制品行业的发展起到了重要的推动作用。凝固型酸奶凝乳完整, 组织光滑细腻, 其组织状态是消费者选购的最重要因素^[1]。坚实度、持水力(Water-holding capacity, WHC)、流变学特性及微观组织结构是评价凝固型酸奶品质的重要指标。当酸奶的状态较差时会导致乳清分离, 进而影响酸奶的质地, 通过添加乳清蛋白粉(Whey protein powder, WPP)或者乳清蛋白浓缩物(Whey protein

concentrate, WPC)可对凝固型酸奶的品质及稳定性进行改善^[2]。

WPP是从牛奶中提取的蛋白质, 以高纯度、高吸收率和与人体骨骼肌中几乎相同的氨基酸组成模式而被称为“蛋白质之王”。当今企业在生产高蛋白酸奶的过程中, 蛋白质含量和牛奶的热处理是影响酸奶品质的两个重要因素。在酸奶制造过程中, 热处理会导致牛奶中蛋白质变性, 使蛋白质胶束产生交联, 形成可溶性的蛋白质复合物^[3]。这些复合物的形成可显著提高溶液的pH, 从而影响酸奶的WHC和

收稿日期: 2019-09-06

作者简介: 付丽(1971-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 畜产品加工及品质控制, E-mail: ful071512@163.com。

* 通讯作者: 申晓琳(1969-), 女, 硕士, 教授, 研究方向: 畜产品加工, E-mail: xiaolin9890@sina.com。

硬度^[4]。乳清蛋白的添加可明显减少酸奶中的乳清析出,并提高酸奶的凝固状态。Lucey 等^[5]研究发现在热牛奶中加入变性乳清蛋白可以减少酸奶的凝固时间,使加工出的酸奶硬度显著提高。Hamarsland 等^[6]研究得出天然乳清蛋白粉是制作高蛋白酸奶最好的原料。Agarwal 等^[7]研究证明在牛奶中加入 WPP 可增加牛奶的蛋白质含量,进而提高制造高蛋白酸奶的可行性。也有许多研究表明,在牛奶中加入 WPP 可以提高凝固型酸奶的硬度,改善组织状态^[8-9],但是目前的研究都集中于乳清蛋白粉对酸奶性质的改变,而关于乳清蛋白粉和全脂乳粉不同配比的研究及不同对比对凝固型酸奶造成的影响还少有研究,本试验在全脂乳粉中添加不同比例的乳清蛋白粉,通过研究不同添加量酸奶的各项指标,确定乳清蛋白粉的最适添加量。

目前,很多企业将 WPP 应用于酸奶加工中,但相关的理论研究不够系统,本试验针对乳清蛋白粉添加量对凝固型酸奶特性的影响,确定乳清蛋白粉的最适添加量。本试验以不添加 WPP 的凝固型酸奶为对照组,将 1%、1.5%、2%、2.5%、3%、4%、5% WPP 加入全脂乳粉中生产酸奶,测定酸奶发酵完成冷藏后熟 12 h 后的滴定酸度、流变学特性、持水率、乳酸菌总数、质构、凝胶微观结构及感官指标,研究不同添加量的乳清蛋白粉对凝固型酸奶品质特性的影响,以确定 WPP 最适添加量,为企业生产更加优质的凝固型酸奶提供一定的理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

全脂乳粉(主要成分:生牛乳、大豆磷脂) DEVONDALE(德运)公司;乳清蛋白粉(型号 WPC82008,乳清蛋白占干基的 80%,耐热型的乳清蛋白) 天津银河伟业进出口有限公司;300 型 100DCU 酸奶发酵菌 丹尼斯克公司;白砂糖、酸奶杯 河南牧业经济学院畜产品研究室。

Haake Mars60 高级旋转流变仪 英国马尔文仪器有限公司;SU3500 扫描电子显微镜 日立高新技术公司;K850 临界点干燥仪 英国 Quorum 公司;BROOKFIELD-CT3 质构仪 美国博勒飞公司;MSP-mini MAGNETRON SPUTTER 磁控离子溅射仪 上海西努光学科技有限公司;ULVAC G-5DA 真空泵 Nano 电子商城;LDZX-50KBS 高压杀菌锅 上海申安医疗器械厂;FA224 电子分析天平 上海舜宇恒平科学仪器有限公司;HH-S 单列双孔电子恒温水浴锅 邦西仪器科技上海有限公司;AM20V6 电磁炉 中山市亚蒙电器制造有限公司;ROTINA380R 台式高速冷冻离心机 德国 Hettich 离心机制造公司。

1.2 试验方法

1.2.1 凝固型酸奶生产工艺流程 纯净水的制备→混合原料→加热溶解→均质→杀菌→冷却→添加发酵剂→灌装→保温发酵→冷却→后熟及冷藏

1.2.2 基础配方 以 200 g 凝固型酸奶为例:全脂乳粉 20 g,纯净水 200 mL,丹尼斯克的 300 型 100DCU 酸奶发酵菌 0.02 g,白砂糖 12 g。

1.2.3 凝固型酸奶制作工艺要点 在 5~50 ℃ 条件下将添加量为 0%、1%、1.5%、2%、2.5%、3%、4%、5% (总量为复原乳的用量)的乳清蛋白粉完全溶解后加入全脂乳粉和白砂糖,在 60~65 ℃ 条件下用均质机对混合料液进行均质,均质条件为 23 MPa,5 min。将均质完成的料液在 90~95 ℃ 温度条件下水浴杀菌 5 min 后冷却至 42 ℃,加入菌种搅拌 2~3 min 后进行灌装。灌装完成的酸奶在 42~45 ℃ 温度条件下放置 6~8 h 使发酵完成^[9]。

1.2.4 不同 WPP 添加量对凝固型酸奶品质特性的影响 分别将 WPP 按照复原乳 0%、1%、1.5%、2%、2.5%、3%、4%、5% 的用量混匀后,于 45~50 ℃ 溶解,将溶解后的样品在 10000 r/min 条件下均质 5 min,以使乳脂肪球破碎,避免在发酵及贮藏过程中出现脂肪上浮现象。均质后的样品 90~95 ℃ 杀菌 5 min 后冷却至 42 ℃,加复原乳 0.01% 的酸奶发酵菌,搅拌 2~3 min 使其混合均匀,发酵温度 43 ℃,发酵时间为 7 h,发酵成熟的样品放入 4 ℃ 冰箱冷藏,以备各项指标的测定。

1.2.5 检测指标

1.2.5.1 酸度的测定 根据《食品安全国家标准食品酸度的测定》GB 5009.239-2016^[10]进行测定。

1.2.5.2 持水力(WHC)的测定 参照蔡自建等^[11]和 Sodini 等^[12]的方法并进行一定的改进。取 30 g 样品于 50 mL 离心管中,在 4 ℃ 条件下,4000 r/min 冷冻离心 20 min,弃去上清液,将沉淀称重,按照下式进行计算。

$$\text{WHC}(\%) = (m_2/m_1) \times 100$$

式中: m_1 为样品的质量(g); m_2 为沉淀物的质量(g)。

1.2.5.3 脱水收缩作用敏感性(STS)的测定 参照廖文艳等^[9]的方法。在 10 ℃ 条件下,将 50 g 样品置于漏斗过滤 2 h,用烧杯收集滤液。按下式计算:

$$\text{STS}(\%) = (\text{乳清析出质量}/\text{样品质量}) \times 100$$

1.2.5.4 乳酸菌总数的测定 参照黄小丹等^[13]对乳酸菌培养基优化的结果,使用改良的番茄汁培养基,按照 GB4789.35-2016^[14]乳酸菌检验中的检测方法进行测定。

1.2.5.5 质构的测定 使用 BROOKFIELD-CT3 质构仪和 TA-DEC 探头进行分析,设置形变量 20%、测试速度 10 mm/min、间隔时间为 0 s,直径 38.1 mm 的凝胶标准探头分别测量硬度、胶着性、粘性指标^[15]。

1.2.5.6 微观结构的测定 在马蓓^[16]对扫描电镜样品前处理的方法的基础上,参照 Meletharayil 等^[17]的方法进行优化,对样品进行前处理。具体操作步骤如下:

a.取材与固定:挖取酸凝乳多块放入平皿中;用手术刀片将其修整成 3 mm × 3 mm × 5 mm 的长条形;加入 2.5% 的 0.1 mol/L 磷酸缓冲戊二醛(加入量以没过样品一倍为准),放入冰箱 4 ℃ 固定 12 h。

b.脱水与替代:固定后,用吸液管将固定液从平皿中轻轻吸出;缓慢向平皿中加入磷酸缓冲液直到没过样品,每 10 min 更换缓冲液 1 次,反复 3 次;依次更替注入 30%、50%、70%、80%、90%、100%

表1 感官评分标准(分)
Table 1 Sensory scoring criteria(score)

评价指标	评价标准	评分范围
色泽	色泽分布均匀,呈均一的乳白色或微黄色,有光泽	10~20
	乳白色或微黄色,不均匀	5~10
	有其他异常颜色或其他异物	0~5
组织状态	组织细腻,凝块细小均匀,无乳清析出,无分层,无气泡	40~60
	组织细腻,有少量凝块存在,无或有少量乳清析出,无分层,无气泡	20~40
	组织粗糙,凝块大小不均匀,有乳清析出,有分层,有气泡	10~20
	组织粗糙不均匀,有凝块,乳清析出严重,有明显分层,有气泡	0~10
口感	滋味纯正,酸甜适口,口感细腻	15~20
	滋味不柔和酸甜一般,口感不细腻	10~15
	过酸或过甜,酸甜比例差,难以接受	5~10
	金属味或异常滋味	0~5

(2次)无水乙醇进行梯度脱水,每个梯度脱水时间为15 min;取1 mL脱水后的酸乳装入1.5 mL离心管中,酸乳上端与离心管管口的间隙用无水乙醇装满,封口4℃冷藏12 h。

c.临界点干燥:将无水乙醇从上述处理过后的离心管中轻轻吸出,用刀片切去离心管上端部分,留下离心管底部约8 mm的部分并装入样品篮中,将样品篮放入事先冷却好的临界点干燥仪样品室内;将临界点干燥仪温度调至35℃,压力为1100 MPa。待干燥完毕后,将微量泄压阀打开,缓慢泄压后取出样品。

d.导电处理:将干燥的样品固定在样品台上,放入西努光学Cinv出产的全自动真空镀膜机,设置镀金时间1.5 min。待样品镀金完成后从样品台取出静置至室温。

e.扫描电镜观察:将样品台放入扫描电镜样品室,抽真空至规定值后,调整加速电压到15 kV,工作距离为10 mm,放大倍数为2000倍条件下观察。

1.2.5.7 流变学特性的测定 采用流变仪测定10 g样品的弹性模量 G' 和粘性模量 G'' ,参照吴伟都等^[18]的方法,将频率固定在1 Hz,对酸乳进行应变扫描,确定酸乳的线性粘弹区,确定好参数后再对酸乳按照100 μm 间距、25℃、上样后平衡10 min、1%的应变及0.01~100 Hz的频率扫描范围对样品进行频率扫描。

1.2.5.8 感官评定 参照赫君菲^[15]的研究方法,由10名具有食品专业学习背景的人组成评定小组,按照表1对酸乳的色泽、组织状态、口感进行评价,结果采用百分制。

1.3 数据处理与分析

每项指标均重复测定三次,结果表示为平均值 \pm 标准差。采用Sigmaplot 13.0软件绘图,采用SPSS Statistics 23.0统计分析软件中的独立样本t检验法进行数据的显著性,显著性水平为0.05。

2 结果与分析

2.1 不同添加量WPP对凝固型酸乳酸度的影响

不同添加量WPP对凝固型酸乳酸度的影响结果见图1。

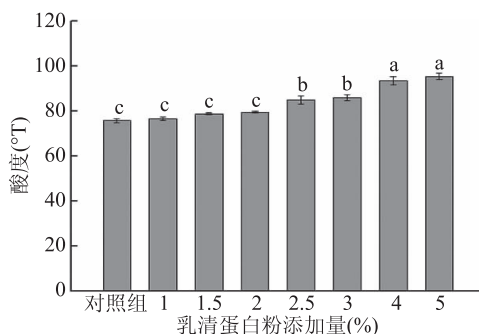


图1 不同添加量WPP对凝固型酸乳酸度的影响

Fig.1 Effect of different added amount of WPP on the degree of solidified acid lactate

注:不同小写字母表示不同组间差异显著($P < 0.05$),图2~图5同。

由图1可见,对照组与不同添加量的实验组均符合国家标准对于酸度的规定,随着乳清蛋白粉添加量的增加酸度逐渐升高,当添加量达到2.5%以上时,酸乳滴定酸度比对照组显著升高($P < 0.05$),这与蒋珊珊等^[19]在聚合乳清浓缩蛋白对凝固型酸乳品质特性的影响中,酸度随乳清蛋白的增加而增加的研究结果一致。原因可能是添加了乳清蛋白粉之后,减少了凝胶形成时间,并增加了体系中固形物含量,导致产酸能力增强,从而使酸乳的滴定酸度随着乳清蛋白粉添加量的增加而增加^[20-21]。

2.2 不同添加量的WPP对凝固型酸乳持水力的影响

不同添加量的WPP对凝固型酸乳持水力的变化见图2。

持水力是凝固型酸乳的重要质量指标之一。从图2可知,加入WPP的酸乳持水力明显上升,各处理组与对照组相比差异显著($P < 0.05$)。添加量为2%的酸乳持水力从53.75%提高至74.44%,保水能力提升了20.69%。这与Puvanenthiran等^[22]研究的乳清蛋白对酸乳质构和粘弹性的结果类似。这可能是因为WPP的添加使酸乳中的蛋白质含量增加,使乳清蛋白与K-酪蛋白相互作用,促进蛋白质均匀多孔网状结构的形成,固定样品中游离水的能力增加,蛋白

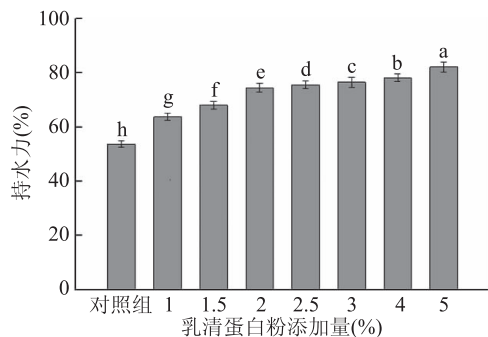


图2 不同添加量的WPP对凝固型酸奶持水力的影响

Fig.2 Effect of different added amounts of WPP on water holding capacity of solidified yogurt

质网络可以保持大量的水,进而促进蛋白质与水的结合能力。Xu等^[4]的研究表明,酸奶中加入乳清蛋白形成的蛋白质复合物有利于促进蛋白质网状结构的形成。表明WPP的添加可以明显提高酸奶的持水能力,提升酸奶的品质,在一定程度上可以改善酸奶在货架期的稳定性。

2.3 不同添加量WPP对凝固型酸奶脱水收缩敏感性(STS)的影响

不同添加量WPP对凝固型酸奶脱水收缩敏感性(STS,%)的变化见图3。

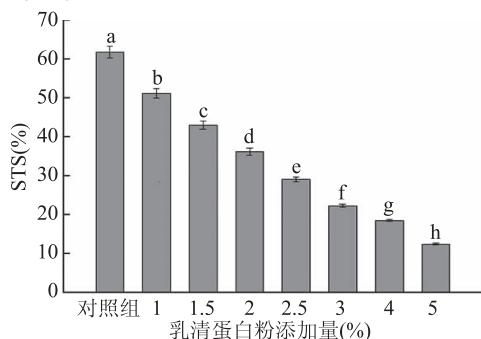


图3 不同添加量WPP对凝固型酸奶脱水收缩敏感性(STS)的影响

Fig.3 Effect of different added amount of WPP on syneresis sensitivity(STS) of solidified yogurt

酸奶脱水收缩敏感性(STS)可以用来衡量酸奶品质的好坏,主要与酸奶的结构有关。酸奶的STS越高说明酸奶的结构越松散,水分子容易析出,造成酸奶品质和风味较差;相反,如果酸奶的脱水收缩敏感性越低,说明酸奶的结构越致密,水分子被牢固地锁在体系中,不易析出,从而使酸奶的质量更好,有助于酸奶保持良好的稳定性。由图3可见,对照组酸奶的STS为61.81%,处理组的酸奶STS明显降低,差异显著($P < 0.05$)。其中乳清蛋白粉添加量为5%的酸奶STS与对照组差异最为显著,其STS为12.41%,相对于对照组降低了49.40%。这与酸奶持水力随着乳清蛋白粉添加量的变化趋势相呼应,原因可能是WPP加入酸奶中与酪蛋白胶束发生相互作用,使酸奶形成一个较为完整、均匀的结构,使水分子不易析出,从而降低了酸奶的脱水收缩作用^[23]。

2.4 不同添加量WPP对凝固型酸奶质构特性的影响

凝固型酸奶的粘性、硬度和胶着性是评价酸奶组织结构和品质的重要指标,可以反映出凝固型酸奶自身的质构特性,因此通过测定不同添加量WPP凝固型酸乳的这些指标探究其对凝固型酸奶的质构特性影响。

不同添加量WPP对凝固型酸奶质构特性的影响见图4。

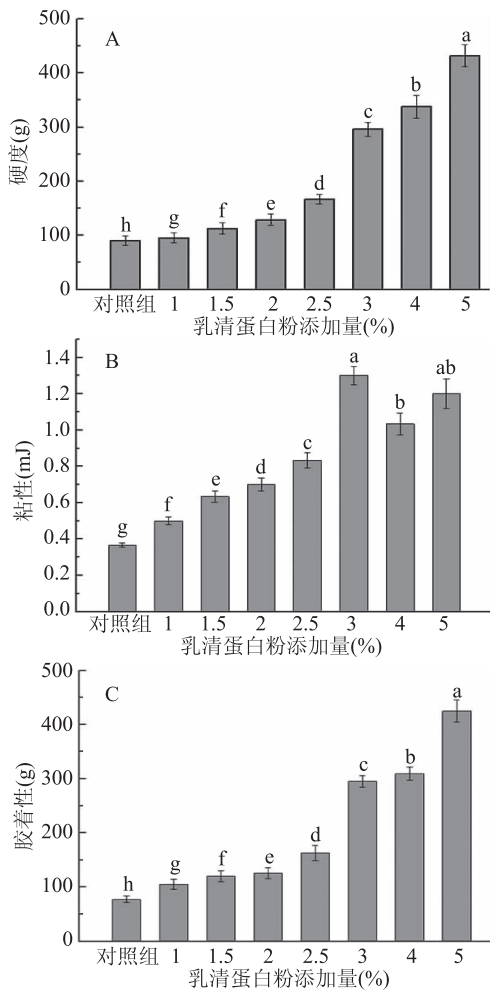


图4 不同添加量WPP对凝固型酸奶质构的影响

Fig.4 Effect of different added amount of WPP on the texture of solidified yogurt

酸奶的口感与其硬度有很大的关系,硬度过低会导致酸奶凝块困难,呈现稀软状态,硬度如果过大,酸奶会失去其特有的粘稠感,导致口感较差。而酸奶的硬度乳清蛋白的添加量密切相关。Mahomud等^[24]研究发现脱脂奶粉(SM)+2%WPC制成的酸奶的硬度显著提高。由图4A可见,随着乳清蛋白粉含量的增加,酸奶的硬度逐渐增加,添加量为3%以上的组别与对照组相比差异显著($P < 0.05$),3%以上组别的酸奶硬度过大,酸奶的口感不良。不同乳清蛋白粉添加量实验组与对照组相比均呈显著差异($P < 0.05$),添加量为5%的酸奶与对照组差异最显著($P < 0.05$),但其硬度偏高口感较差。因此添加量为1.5%、2%、2.5%组别的酸奶硬度最佳,口感

适宜^[25]。

粘性是评价酸奶口感的一个重要指标,由图 4B 可见,随着乳清蛋白粉添加量的升高,酸奶的粘性呈现先升高后下降的趋势。相对对照组的粘性 0.37 mJ, 添加了乳清蛋白粉的酸奶粘性显著提升($P < 0.05$)。原因可能是酸奶在酸化的过程中,乳清蛋白与酪蛋白胶束中的 K-酪蛋白相互作用形成可溶性蛋白复合物,从而增加了酸奶的粘性^[26]。但是当乳清蛋白粉的添加量高于 3% 时,粘性开始下降,原因可能是体系中固形物达到一定量时,超过这个界限使酸奶中酪蛋白胶束不易形成,导致酸奶粘性下降。

酸奶的胶着性是酸奶 TPA 质构分析的一个重要指标,由图 4C 可见,随着乳清蛋白粉浓度的升高酸奶的胶着性逐渐升高,各处理组与对照组的胶着性相比显著升高($P < 0.05$)。与酸奶的硬度呈现相似的结果。原因可能是随着乳清蛋白粉含量的增加,酸奶的固形物增加,乳清蛋白与酪蛋白结合形成了较强的凝胶结构,聚集成较大的蛋白质复合物,提高酸奶的粘度和凝胶强度,增加酸奶的胶着性^[27]。

2.5 不同添加量 WPP 对凝固型酸奶乳酸菌总数的影响

不同添加量 WPP 对凝固型酸奶乳酸菌总数的变化见图 5。

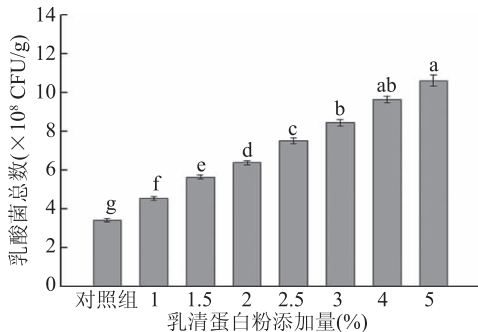


图 5 不同添加量 WPP 对凝固型酸奶乳酸菌总数的影响
Fig.5 Effect of different added amount of WPP on the total number of lactic acid bacteria

根据国标《GB 19302-2010》中对于发酵乳中乳酸菌限量为 $\geq 1 \times 10^6$ CFU/g,由图 5 可见,对照组的乳酸菌总数为 3.4×10^8 CFU/g,满足国标对于乳酸菌总数的规定,添加了乳清蛋白粉的酸奶组别乳酸菌总数均高于对照组,因此本试验所有组别均符合国家标准对于乳酸菌总数的限量。并且随着 WPP 含量的升高,乳酸菌总数呈现逐渐上升的趋势,除了添加量为 4% 和 5% 的组别差异不显著($P > 0.05$),其余组别均有显著差异($P < 0.05$)。其中与对照组差异最显著的组别是添加量为 5% 的酸奶,其乳酸菌总数为 10.6×10^8 CFU/g^[24]。

2.6 不同添加量 WPP 对凝固型酸奶流变学特性的影响

不同添加量 WPP 对凝固型酸奶弹性模量 G' 和粘性模量 G'' 随频率变化见图 6 和图 7。

弹性模量是指样品发生形变时产生的力,是物质本身所固有的力,是衡量物质弹性的标杆,用 G' 来

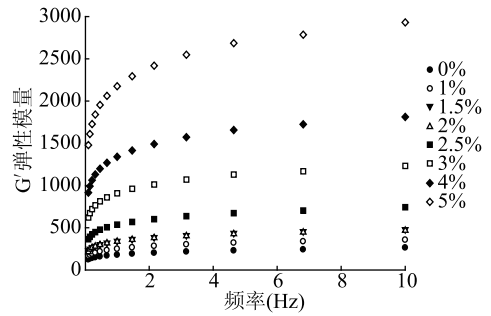


图 6 不同添加量 WPP 对凝固型酸奶弹性模量 G' 的影响
Fig.6 Effect of different added amount of WPP on elastic modulus G' of solidified yogurt

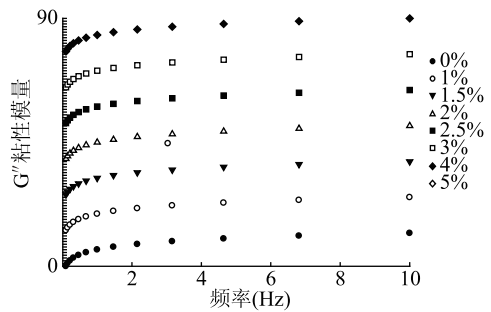


图 7 不同添加量 WPP 对凝固型酸奶粘性模量 G'' 的影响
Fig.7 Effect of different added amount of WPP on the viscous modulus G'' of solidified yogurt

表示;粘性模量(损耗模量) G'' 指物质中损失的那部分力,用来衡量物质的黏性特征^[25]。应用线性粘弹性理论研究了不同添加量乳清蛋白粉酸奶在形变范围内的粘弹性质。由图 6 可知,随着 WPP 添加量的增加,弹性模量呈现逐渐增加的趋势,这说明 WPP 添加量的增加提升了酸奶的弹性。这可能是因为蛋白质复合物中共价键的含量增加导致^[28]。由图 7 可知,随着 WPP 添加量的增加,粘性模量呈现逐渐增加的趋势,这说明增加 WPP 的含量,可以提升酸奶的粘性。从图 7 可以看出,随着频率的增加,弹性模量 G' 和粘性模量 G'' 先增加,在频率升至 7 时,出现了一个平台区,原因可能是当黏性应力响应值较小时酸乳只发生变形,不产生流动,因此形成平台区,当应力至一定值后才出现流动。

综合图 6 和图 7 来看,对照组和处理组的所有样品的 G' 值都大于 G'' ,表明所有样品都是弹性成分占优势,样品表现出类固体的特征,且对体系的水分有很好的固定作用。频率扫描得到的弹性模量值,可以反映出酸乳的屈服应力与流动性,弹性模量值越大,样品就越不易流动,酸乳的体系稳定性就越好。说明 WPP 的添加使酸奶的凝胶性质增强,并且随着添加量的增加,酸奶的粘弹性越好^[18]。

2.7 不同添加量 WPP 对凝固型酸奶凝胶微观结构的影响

不同添加量 WPP 对凝固型酸奶凝胶微观结构的影响见图 8。

以上为对照组和处理组在样品处理之后上镜观察到的微观结构图,如图 8 所示。从图 8 中可以看出,未添加乳清蛋白粉的酸奶表面极不平整,表面有

表2 感官评分结果(分)
Table 2 Sensory score results(score)

组别	色泽	组织状态	口感	综合评分
0%	12.52 ± 0.20 ^f	34.92 ± 0.34 ^h	12.44 ± 1.33 ^f	59.88 ± 1.33 ^f
1%	12.06 ± 0.25 ^e	40.12 ± 0.25 ^e	14.18 ± 0.84 ^d	66.36 ± 0.84 ^e
1.5%	14.68 ± 0.49 ^e	48.04 ± 0.41 ^f	17.02 ± 0.69 ^b	79.74 ± 0.69 ^e
2%	18.24 ± 0.05 ^d	52.78 ± 0.06 ^b	19.88 ± 0.94 ^a	90.90 ± 0.94 ^a
2.5%	18.44 ± 0.72 ^c	53.82 ± 0.38 ^a	16.52 ± 0.62 ^c	88.78 ± 0.62 ^a
3%	18.74 ± 0.13 ^b	50.14 ± 0.27 ^c	13.42 ± 1.08 ^e	82.30 ± 1.08 ^b
4%	18.42 ± 0.25 ^c	49.60 ± 0.23 ^d	10.20 ± 1.14 ^e	78.22 ± 1.14 ^c
5%	18.96 ± 0.24 ^a	47.56 ± 0.16 ^c	9.32 ± 1.12 ^h	75.84 ± 1.12 ^d

注:同列不同字母代表差异显著, $P < 0.05$ 。

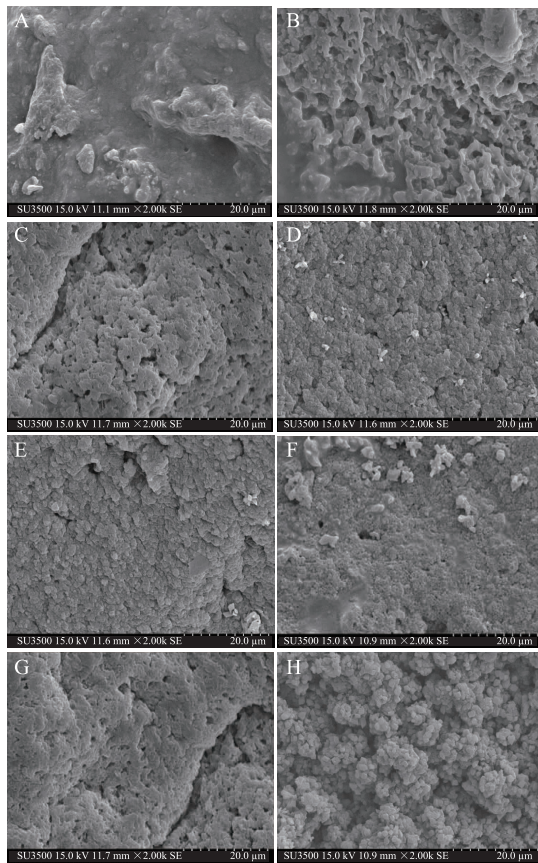


图8 不同添加量 WPP 对凝固型酸乳扫描电镜的影响

Fig.8 Effect of different addition amount WPP on scanning electron microscopy of solidified yogurts

注:A、B、C、D、E、F、G、H 分别为 0%、1%、1.5%、2%、2.5%、3%、4%、5% 的酸乳。

极大凸起^[25]。而 1% 添加量的凝固型酸乳表面呈疏松的蜂窝状结构,有少量大的结块,凝胶不紧密;1.5% 添加量的酸乳表面较平整,但是有较大的孔洞存在,2% 处理组的酸乳表面平整,结构紧密有少量孔洞存在,但是整体结构均匀且完整。2.5% 处理组酸乳表面出现颗粒物,这种颗粒物可能是因为蛋白质聚集导致,且随着乳清蛋白粉含量的升高,表面颗粒物数量也逐渐增高,在 5% 处理组时可看到大团的蛋白质聚物。因此,与其他处理组相比,添加 2% 乳清蛋白粉的酸乳网络结构更加连续、完整和均一^[29]。

2.8 不同添加量的 WPP 对凝固型酸乳感官指标的影响

由表 2 可见,对照组酸乳综合评分最低,添加 WPP 的酸乳均显著高于对照组 ($P < 0.05$),对照组的酸乳的组织状态很差,表面有水分渗出,口感有轻微磨砂感。2% 处理组的酸乳综合评分最高,该处理组表面无水分渗出,具有坚实感,挤压时无流动性,酸乳表面光滑无颗粒和不规则物质。当 WPP 的添加量超过 3% 时,表面含水量逐渐降低,几乎没有乳清析出,但是酸乳的口感显著降低 ($P < 0.05$),原因可能是 WPP 添加量的提高使酸乳过硬,口感较差;风味不好可能是 WPP 过高产生了属于乳清蛋白的不良异味。由感官结果可以看出,随着乳清蛋白粉的添加,酸乳的表面含水量逐渐减少,坚实感升高,乳清析出量逐渐减少,而光滑感和风味适口性都呈现先升高后减少的趋势,其中最好的是 2% 的处理组。

3 结论

添加不同含量 WPP 的凝固型酸乳的各项指标随着 WPP 含量的不同也发生相应的变化。添加 2% WPP 时酸乳的保水能力提升了 20.69%,与对照组相比差异显著 ($P < 0.05$);微观结构在 WPP 添加量为 2% 时呈现出连续、平整、均匀的网状结构。酸度、持水力、脱水敏感性指标随着乳清蛋白含量的增加均呈现缓慢上升趋势。因此,在凝固型酸乳生产过程中可以添加 2% 的 WPP 来提升综合品质。本实验对生产高质量的凝固型酸乳具有一定的实际意义和借鉴价值。

参考文献

- [1] Peng Y, Serra M, Horne D S et al. Effect of fortification with various types of milk proteins on the rheological properties and permeability of nonfat set yogurt [J]. Journal of Food Science, 2009, 74(9): 666-673.
- [2] 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, 2014, 67(4): 495-503.
- [3] Angel C R D, Dalgleish D G. Structures and some properties of soluble protein complexes formed by the heating of reconstituted skim milk powder [J]. Food Research International, 2006, 39(4): 472-479.

- [4] Xu W, He S, Ma Y, et al. Effect of the heat-induced whey proteins/ κ -casein complex on the acid gelation of yak milk [J]. RSC Advances, 2014, 5(12): 8952-8956.
- [5] Lucey J A, Munro P A, Singh H. Effects of heat treatment and whey protein addition on the rheological properties and structure of acid skim milk gels [J]. International Dairy Journal, 1999, 9: 275-279.
- [6] Hamarstrand H, Laahne J A L, Gøran Paulsen, et al. Native whey induces higher and faster leucinemia than other whey protein supplements and milk: A randomized controlled trial [J]. BMC Nutrition, 2017, 3: 1-10.
- [7] Agarwal S, Beausire R L W, Patel S, et al. Innovative uses of milk protein concentrates in product development [J]. Journal of Food Science, 2015, 80(S1): A23-A29.
- [8] Aziznia S, Khosrowshahi A, Madadlou A, et al. Texture of nonfat yoghurt as influenced by whey protein concentrate and gum tragacanth as fat replacers [J]. International Journal of Dairy Technology, 2009, 62(3): 405-410.
- [9] 廖文艳, 苏米亚, 周杰, 等. 乳清蛋白在无添加剂酸奶中的应用 [J]. 现代食品科技, 2012, 28(1): 61-65.
- [10] 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.
- [11] 蔡自建, 刘鲁蜀, 陈炼红. 强化乳清浓缩蛋白对酸奶品质影响的研究 [J]. 西南民族大学学报: 自然科学版, 2012, 38(2): 242-246.
- [12] Sodini I, Montella J, Tong P S. Physical properties of yogurt fortified with various commercial whey protein concentrates [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2005, 85(5): 853-859.
- [13] 黄小丹, 柳建良, 杜林. 酸奶中乳酸菌计数培养基的优选与改良 [J]. 仲恺农业技术学院报, 2006, 19(1): 21-24.
- [14] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 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.
- [15] 赫君菲. 建立凝固型酸奶质构参数对感官性质的预测模型 [D]. 扬州: 扬州大学, 2013.
- [16] 马蓓. 酸凝乳的扫描电镜样品制备方法 [J]. 电子显微学报, 2019, 38(1): 83-85.
- [17] Meletharayil G H, Patel H A, Huppertz T. Rheological properties and microstructure of high protein acid gels prepared from reconstituted milk protein concentrate powders of different protein contents [J]. International Dairy Journal, 2015, 47: 64-71.
- [18] 吴伟都, 欧凯, 朱慧, 等. 流变仪测定搅拌型酸乳黏弹特性的研究 [J]. 食品科技, 2019, 44(2): 314-318.
- [19] 蒋姗姗, 程建军, 李东飞, 等. 聚合乳清浓缩蛋白对凝固型酸奶品质特性的影响 [J]. 中国乳品工业, 2017, 45(6): 15-18.
- [20] Lucey J A, Munro P A, Singh H. Effects of heat treatment and whey protein addition on the rheological properties and structure of acid skim milk gels [J]. International Dairy Journal, 1999, 9: 275-279.
- [21] Adrian Körzendörfer, Jorg Hinrichs. Manufacture of high-protein yogurt without generating acid whey-impact of the final pH and the application of power ultrasound on texture properties [J]. International Dairy Journal, 2019, 99: 104541.
- [22] Puvanenthiran A, Williams R P W, Augustin M A. Structure and visco-elastic properties of set yoghurt with altered casein to whey protein ratios [J]. International Dairy Journal, 2002, 12(4): 383-391.
- [23] Lee W J, Lucey J A. Rheological properties, whey separation, and microstructure in set-style yogurt: Effects of heating temperature and incubation temperature [J]. Journal of Texture Studies, 2003, 34(5-6): 515-536.
- [24] Mahomud M S, Katsuno N, Nishizu T. Formation of soluble protein complexes and yoghurt properties influenced by the addition of whey protein concentrate [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 44: 173-180.
- [25] 金星, 迟涛, 于鑫欣, 等. 热处理乳清蛋白对凝固型酸乳凝胶品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2018, 39(16): 42-48.
- [26] Torres I C, Amigo José Manuel, Knudsen J C, et al. Rheology and microstructure of low-fat yoghurt produced with whey protein microparticles as fat replacer [J]. International Dairy Journal, 2018, 81: 62-71.
- [27] Jørgensen C E, Abrahamsen R K, Rukke E, et al. Improving the structure and rheology of high protein, low fat yoghurt with undenatured whey proteins [J]. International Dairy Journal, 2015, 47: 6-18.
- [28] Vasbinder A J, Mil P J J M V, Bot A, et al. Acid-induced gelation of heat-treated milk studied by diffusing wave spectroscopy [J]. Colloids & Surfaces B Biointerfaces, 2001, 21(1): 245-250.
- [29] Delikanli B, Özcan T. Effects of various whey proteins on the physicochemical and textural properties of set type nonfat yoghurt [J]. International Journal of Dairy Technology, 2014, 67(4): 495-503.
- [30] 李亚杰, 秦晶晶, 钱慧琴, 等. 响应面法优化月季花中总黄酮的提取工艺 [J]. 食品研究与开发, 2019, 40(19): 130-135.
- [31] 秦晶晶, 钱慧琴, 赵媛, 等. 荞麦叶大百合总黄酮的提取工艺及抗氧化活性研究 [J]. 食品研究与开发, 2019, 40(13): 100-104.
- [32] 钱慧琴, 秦晶晶, 魏婧, 等. 线叶旋覆花总黄酮的提取工艺优化及其抗氧化活性分析 [J]. 食品工业科技, 2019, 40(22): 151-156, 162.
- [33] 郭雪峰, 岳永德, 汤锋, 等. 用清除超氧阴离子自由基法评价竹叶提取物抗氧化能力 [J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(8): 1823-1826.
- [34] 许远, 魏和平, 吴彦, 等. 响应面优化藜苜总黄酮提取抗氧化研究 [J]. 食品工业科技, 2015(5): 233-239.
- [35] 陆晓婷, 张超, 张晖, 等. 黑籽瓜种子蛋白酶解工艺及抗氧化性研究 [J]. 食品科技, 2015(5): 73-78.

(上接第 38 页)

抗氧化活性研究 [J]. 食品研究与开发, 2017, 38(3): 95-100.

[18] 钱慧琴, 秦晶晶, 李亚杰, 等. 响应面法优化月季花中总黄酮的提取工艺 [J]. 食品研究与开发, 2019, 40(19): 130-135.

[19] 秦晶晶, 钱慧琴, 赵媛, 等. 荞麦叶大百合总黄酮的提取工艺及抗氧化活性研究 [J]. 食品研究与开发, 2019, 40(13): 100-104.

[20] 钱慧琴, 秦晶晶, 魏婧, 等. 线叶旋覆花总黄酮的提取工艺优化及其抗氧化活性分析 [J]. 食品工业科技, 2019, 40