

# 大豆蛋白酶解产物对不同发酵剂酸奶品质的影响

谭允冰, 赵强忠

(华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640)

**摘要:** 本文研究了大豆蛋白酶解产物 (Soy protein hydrolysate, SPH) 对 187、495 和 885 三种发酵剂酸奶发酵过程中 pH 值变化和贮藏过程中乳清析出、流变特性和质构特性的影响。结果表明, SPH 对 3 种酸奶均具有一定的促发酵效果, 其中对以 187 和 495 为发酵剂的 pH 值下降速度较慢的酸奶促发酵效果更明显。贮藏过程中, SPH 可有效减缓酸奶乳清析出, 其中对以 885 为发酵剂的乳清析出率最高的酸奶作用最明显, 降低率达到 49.35%。此外, SPH 可有效提高 187 和 495 发酵剂酸奶的表观黏度和触变环面积, 有利于酸奶结构的恢复。通过对酸奶第 7 d 流变和质构特性的进一步研究, SPH 可显著提高 3 种酸奶的稠度和零剪切黏度, 降低其流动指数、柔量和粘性指数, 从而有效改善 3 种酸奶的流变和质构特性, 提高酸奶在低应力下稳定性, 降低其在高应力下形变破坏程度。

**关键词:** 大豆蛋白酶解产物; 酸奶; 促发酵; 流变特性; 质构特性

文章编号: 1673-9078(2017)8-103-109

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.8.016

## Influences of Soy Protein Hydrolysate on the Quality of Yoghurts Fermented by Different Starter Cultures

TAN Yun-bing, ZHAO Qiang-zhong

(School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Yoghurts were fermented using different starter cultures (187, 495, or 885) for examination of the influence of soy protein hydrolysates (SPHs) on the fermentation pH and whey precipitation, as well as rheological and textural properties of the fermented products during storage. SPHs had a definite effect on the stimulation of fermentation of the three yoghurts, especially on those fermented by cultures 187 and 495 that had a lower pH reduction rate during fermentation. In storage, SPHs could effectively slow whey precipitation in the three yoghurts, where the most significant effect (reduction rate: 49.35%) was found in the yoghurt fermented by culture 885, which had the highest whey precipitation rate among the three control groups. Moreover, SPHs could greatly increase the apparent viscosity and hysteresis area of the three yoghurt samples, contributing to their structure recovery. Through further investigation of the yoghurts on the 7<sup>th</sup> day of storage, the SPH was found to have significantly improved the consistency and zero-shear viscosity of the three yoghurts, and reduced their flow behavior index, compliance value, and viscous index, thus improving their rheological and textural properties, increasing their stability under low stress, and reducing the degree of damage caused by deformation under high stress.

**Key words:** soy protein hydrolysate; yoghurt; stimulation of fermentation; rheological properties; textural properties

酸奶因其独特的生理功能和风味口感成为乳业发展的主流方向。由于酸奶的生产过程涉及生化反应, 过程复杂且不易控制, 目前我国酸奶的生产普遍存在前期发酵周期长、生产效率较低以及酸奶在贮藏过程中乳清析出比较严重、入口质感较差、吞咽感觉不够爽滑细腻等技术问题, 严重地制约了酸奶的生产和消费<sup>[1,2]</sup>。通常需要额外添加蛋白或稳定剂提高酸奶品质, 如添加乳清蛋白可与酪蛋白胶束相互连接, 从而强化酪蛋白网络结构, 改善酸奶品质<sup>[3]</sup>。

收稿日期: 2016-12-07

基金项目: 广州市南沙区科技计划项目 (2014KF07)

作者简介: 谭允冰 (1991-), 女, 硕士, 研究方向: 食品生物技术

通讯作者: 赵强忠 (1976-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品生物技术

近年来许多国内外学者开始研究乳酸菌促生长因子对传统酸奶的发酵速度、流变和质构特性的影响<sup>[4,5]</sup>。大豆蛋白酶解液能促进乳酸菌产酸和显著提高酸奶表观黏度<sup>[6,7]</sup>。酪蛋白酶解物有利于提高酸奶的质构<sup>[8]</sup>。乳清蛋白酶解物可增加酸奶的硬度<sup>[9]</sup>。关于酶解产物对酸奶品质的改善作用, 有研究认为酶解产物可促进乳酸菌增殖和提高关键代谢酶活性, 提高产乳酸速度和胞外多糖含量, 有助于缩短发酵时间和形成更紧密的三维网络结构<sup>[10]</sup>。酶解产物的分子量分布和氨基酸组成对酸奶品质具有较显著影响, 主要是蛋白多肽比游离氨基酸更有效被乳酸菌利用<sup>[11]</sup>, 具有更好的促发酵和品质改善作用, 尤其是分子量低于 3000 u 多肽<sup>[9]</sup>; 有研究发现亲水性多肽较疏水性多肽对乳酸链球

菌具有更好的促生长效果,这可能与膜上的蛋白酶和氨肽酶的特异性有关<sup>[12]</sup>。

但有研究表明,由于发酵速度较快,酶解物会降低酸奶的复合黏度<sup>[13]</sup>。酪蛋白酶解物对酸奶的硬度没有明显作用效果<sup>[10]</sup>。罗安东等<sup>[14]</sup>发现酪蛋白酶解物对不同发酵剂酸奶黏度的作用效果,对 ABT-7 酸奶具有增黏效果,但会降低 YC-380 和 FAST-89 酸奶的黏度。这说明酶解产物对不同发酵剂酸奶的作用效果不同。

搅拌型酸奶是一种带有屈服应力的假塑形流体。许多研究只采用酸奶黏度表征其品质,但黏度会随时间和剪切速率急剧变化,不能完全反映酸奶的品质。酸奶的流变特性和质构特性更能全面体现酸奶的品质和感官特性<sup>[15]</sup>。因此,本文主要研究大豆蛋白酶解产物(Soy protein hydrolysate, SPH)对不同发酵剂酸奶发酵过程和贮藏特性的影响,采用流变特性和质构特性全面反映产品的品质特性。比较 SPH 对不同发酵剂酸奶的促发酵和品质特性的影响,为深入研究生物活性肽在酸奶中应用提供理论和方法指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料与试剂

大豆分离蛋白(山东香驰豆业科技有限公司);Alcalase 碱性蛋白酶 2.4 L(酶活:800000 U/g,丹麦诺维信公司);Yo-MIX 系列酸奶发酵剂(美国杜邦丹尼斯克公司),发酵剂成分说明见表 1。SPH 制备条件:料液比 1:9 (*m/m*),pH 8.5,温度 50 °C,加酶量 3200 U/g 蛋白,酶解时间 24 h,沸水浴 15 min 灭酶,冻干备用。SPH 小于 3000 u 分子量段含量为 63%,亲水性氨基酸含量为 66%。

表 1 发酵剂成分说明

Table 1 Information of starter cultures

发酵剂型号	菌种类型
187	ST+LB+LA
495	ST+LB
885	ST+LB

注:“ST”表示嗜热链球菌;“LB”表示德氏乳杆菌保加利亚亚种;“LA”表示嗜酸链球菌。

### 1.2 主要仪器与设备

HAAKE MARS III 旋转流变仪,美国 Thermo Fisher Scientific 公司;质构分析仪,英国 Stable Micro Systems 公司;APV-1000 高压均质机,丹麦 APV 公司;Alpha 1-2 LD plus 冷冻干燥器,德国 Marin Christ 公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 酸奶的制备

酸奶配方(1000 g):全脂奶粉 100 g,白砂糖 80 g。

发酵剂的制备:利用约 42 °C 的生理盐水配置接种液(按 0.2 DCU/L,接种体积为 15 mL 配置)。

工艺流程:

奶粉+糖→60 °C 水化 30 min→4 °C 水化 12 h→20 MPa 均质→SPH→(95±2)°C,5 min 杀菌→冷却至 42 °C→接种→42 °C 发酵至 pH 4.5→冷却至 20 °C→空压均质以模拟强剪切→密封灌装,4 °C 冷藏。

表 2 实验方案

Table 2 Experimental method

编号	187	187H	495	495H	885	885H
发酵剂型号	187		495		885	
发酵剂比例/%	0.01		0.03		0.02	
SPH 质量/g	0	1.17	0	1.17	0	1.17

注:SPH 质量按 1%蛋白添加量计算。以 3 种不同发酵剂的酸奶分别简称为 187 型酸奶、495 型酸奶和 885 型酸奶,其中没有加 SPH 的酸奶为对照组,添加 SPH 的酸奶为 SPH 组。

#### 1.3.2 发酵过程 pH 变化

在发酵过程中,每 1 h 取样测量 pH 值。

#### 1.3.3 贮藏稳定性实验

将酸奶置于 4 °C 冰箱中冷藏贮存。测定酸奶在贮藏期第 1、3、7、14 和 28 d 的乳清析出、触变特性和黏度特性,第 7 d 的蠕变特性和流动曲线的拟合。

#### 1.3.4 乳清析出率

采用直接称量法,乳清析出率计算公式见(1):

$$\text{乳清析出率}(\%) = \frac{\text{乳清质量}(\text{g})}{\text{酸奶质量}(\text{g})} \times 100 \quad (1)$$

#### 1.3.5 流变特性

##### 1.3.5.1 触变特性

在 20 °C 条件下保温 3 min 后,测量在不同剪切速率下酸奶的剪切应力。剪切速率先从 0 s<sup>-1</sup>~60 s<sup>-1</sup> 线性增加,时间 120 s,然后在 60 s<sup>-1</sup> 持续 10 s,最后 60 s<sup>-1</sup>~0 s<sup>-1</sup> 线性减少,时间 120 s<sup>[16]</sup>。

采用奥斯特瓦尔德-德沃尔幂律模型(Ostwald de waele Power Law Model)(2)拟合上行流动曲线:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (2)$$

式中:τ 为剪切应力(Pa),K 为稠度系数(Pa·s<sup>n</sup>),γ 为剪切速率(s<sup>-1</sup>),n 为流动指数。

##### 1.3.5.2 蠕变特性

在 20 °C 条件下保温 3 min 后,采用两段测量模式测量样品的蠕变特性<sup>[17]</sup>。蠕变:瞬间施加恒定剪切应力,测定酸奶形变变化,时间 120 s;回复:瞬间撤去

施加的应力后, 测量酸奶形变变化, 时间 500 s。

回复率计算公式 (3):

$$\text{回复率}(\%) = \frac{\gamma_{\max} - \gamma_e}{\gamma_{\max}} \times 100 \quad (3)$$

式中:  $\gamma_{\max}$  和  $\gamma_e$  分别最大形变和平衡形变 ( $s^{-1}$ )。

### 1.3.6 质构特性

在压缩模式下采用 AB/E 圆柱形塑料探头 (直径为 45 mm) 测量酸奶质构特性, 探头在测试前、测试中和测试后的速率分别为 2、1、2 mm/s, 触发力为 2 g, 压缩深度为 15 mm<sup>[18]</sup>。

### 1.4 计算分析

实验结果利用 Excel 2013 软件进行误差分析; 利用 SPSS 20 软件, 采用单因素方差分析法比较均值, Duncan 双侧检验法进行显著性分析, 显著性水平为 0.05; 利用 Origin 8.5 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 SPH对不同发酵剂酸奶发酵过程的影响

表 3 SPH 对不同发酵剂酸奶发酵过程中 pH 值变化的影响

Table 3 Influence of SPH on the pH changes of yoghurts fermented with different starter cultures

发酵时间/h	187	187H	495	495H	885	885H
0	6.68±0.07 <sup>a</sup>	6.71±0.04 <sup>a</sup>	6.74±0.07 <sup>a</sup>	6.73±0.06 <sup>a</sup>	6.66±0.06 <sup>a</sup>	6.68±0.06 <sup>a</sup>
1	6.54±0.04 <sup>a</sup>	6.52±0.07 <sup>a</sup>	6.50±0.02 <sup>a</sup>	6.46±0.04 <sup>a</sup>	6.47±0.07 <sup>a</sup>	6.48±0.06 <sup>a</sup>
2	6.14±0.01 <sup>a</sup>	6.12±0.15 <sup>a</sup>	6.10±0.01 <sup>a</sup>	5.94±0.09 <sup>a</sup>	5.98±0.15 <sup>a</sup>	5.92±0.11 <sup>a</sup>
3	5.92±0.05 <sup>a</sup>	5.64±0.12 <sup>b</sup>	5.27±0.04 <sup>c</sup>	5.04±0.04 <sup>d</sup>	5.08±0.06 <sup>cd</sup>	5.04±0.13 <sup>d</sup>
4	5.22±0.13 <sup>a</sup>	4.97±0.04 <sup>b</sup>	4.90±0.04 <sup>bc</sup>	4.70±0.09 <sup>bc</sup>	4.73±0.03 <sup>cd</sup>	4.62±0.09 <sup>d</sup>
5	4.78±0.08 <sup>a</sup>	4.64±0.01 <sup>b</sup>	4.68±0.02 <sup>ab</sup>	4.55±0.07 <sup>bc</sup>	4.55±0.03 <sup>bc</sup>	4.47±0.06 <sup>c</sup>
6	4.52±0.05 <sup>a</sup>	4.47±0.03 <sup>ab</sup>	4.52±0.02 <sup>a</sup>	4.47±0.02 <sup>ab</sup>	4.44±0.03 <sup>bcd</sup>	4.39±0.01 <sup>d</sup>
7	4.36±0.01 <sup>ab</sup>	4.26±0.11 <sup>a</sup>	4.42±0.01 <sup>b</sup>	4.37±0.01 <sup>ab</sup>	4.38±0.00 <sup>ab</sup>	

注: 每个发酵时间点内 6 组酸奶样品的 pH 值进行显著性分析。

表 4 SPH 对不同发酵剂酸奶贮藏过程中乳清析出率变化的影响 (%)

Table 4 Influence of SPH on the whey precipitation rate of yogurts fermented with different starter cultures (%)

贮藏时间/d	187	187H	495	495H	885	885H
1	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
3	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
7	0.00±0.00 <sup>a</sup>	0.00±0.00 <sup>a</sup>	0.00±0.00 <sup>a</sup>	2.15±0.10 <sup>b</sup>	8.16±0.23 <sup>f</sup>	3.83±0.09 <sup>e</sup>
14	4.97±0.11 <sup>d</sup>	3.36±0.14 <sup>c</sup>	11.73±0.31 <sup>i</sup>	8.91±0.29 <sup>fg</sup>	17.26±0.52 <sup>j</sup>	9.41±0.08 <sup>gh</sup>
28	6.51±0.19 <sup>e</sup>	5.31±0.25 <sup>d</sup>	11.57±0.38 <sup>i</sup>	10.07±0.72 <sup>h</sup>	22.33±0.59 <sup>j</sup>	11.31±0.06 <sup>i</sup>

注: 贮藏期第 7、14 和 28 d 的 6 组酸奶样品乳清析出率进行显著性分析。

### 2.2 SPH对不同发酵剂酸奶贮藏过程的影响

#### 2.2.1 乳清析出率

表 4 为SPH对不同发酵剂酸奶贮藏过程中乳清析

出率变化的影响。贮藏期 0~3 d, 6 组酸奶的乳清析出率为 0%, 在第 7 d, 495H、885 和 885H 酸奶开始出现乳清析出, 其中 885 型酸奶乳清析出率最高达到 8.16%, 而在第 14 d, 187 型酸奶也出现乳清析出。6

SPH 对不同发酵剂酸奶发酵过程中 pH 值变化的影响如表 3 所示。SPH 可显著 ( $p < 0.05$ ) 加快 187 与 495 型酸奶的 pH 值下降速度, 对发酵速度较慢的发酵剂具有明显的促发酵效果。0~1 h, 酸奶 pH 值缓慢下降, SPH 组的 pH 值下降速度与对照组相似, 可能由于 SPH 对乳酸菌在迟滞期的产酸作用不大<sup>[19]</sup>。1~2 h, SPH 组的 pH 值下降速度逐渐高于对照组, 3~5 h 作用效果明显, SPH 组的 pH 值比对照组低约 0.3, 这表明 SPH 主要在对数生长期起促发酵作用。SPH 对 885 型酸奶的促发酵作用不明显, 可能由于 885 发酵剂已具有较高的产酸能力。在牛奶培养基中, 乳酸菌的生长需要肽或氨基酸等作为氮源, 而在发酵初期, 乳酸菌的胞外蛋白酶含量不高, 从而导致氮源不足。SPH 含有丰富的短肽与氨基酸, 能在发酵初期为乳酸菌提供营养, 从而加快其代谢产酸<sup>[20]</sup>。187 型酸奶 pH 值变化趋势与 495 和 885 型酸奶稍有差别, 进入对数生长期后, pH 值下降速度在 2~3 h 稍减慢, 然后继续迅速下降, 这个短暂的速度下降可能与该发酵剂含有的嗜酸乳杆菌有关。

组酸奶的乳析率均随着贮藏时间延长而不断增加, 对照组乳清析出率由低至高依次为: 187、495 和 885, 其最大析出量分别为 6.51%、11.57%和 22.33%, SPH 均能显著 ( $p < 0.05$ ) 降低 3 种酸奶乳清析出率, 其中对 885 型酸奶效果最明显, 乳清析出率降低率高达 49.35%, 这表明 SPH 能提高酸奶的稳定性。同时可发现, 酸奶发酵时间越长, 出现乳清析出时间越长, 乳清析出率越低, 可能由于长时间的发酵过程有利于强化酪蛋白网络结构<sup>[13]</sup>。

### 2.2.2 表观黏度

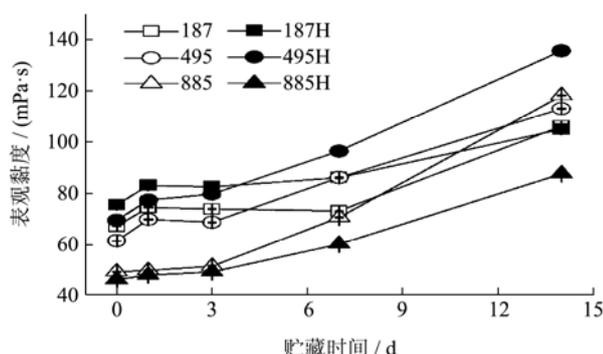


图 1 SPH 对不同发酵剂酸奶贮藏过程中表观黏度的影响

Fig.1 Influence of SPH on the viscosity at 60 s<sup>-1</sup> of yoghurts fermented with different starter cultures

本研究选取剪切速率为 60 s<sup>-1</sup> 时样品的表观黏度以比较不同酸奶的黏度特性。表观黏度可侧面反映酸奶的结构及其稳定性, 是感官评价的重要组成部分<sup>[21]</sup>。乳清析出率过高会影响酸奶流变特性的测量, 因此本研究没有测量第 28 d 酸奶的流变特性。图 1 为 SPH 对不同发酵剂酸奶贮藏过程中表观黏度的影响。由于经过均质机强剪切作用, 6 组酸奶的黏度值都较低。在贮藏过程中, 6 组酸奶的表观黏度逐渐升高, 但在部分贮藏期略有降低。比较对照组的表观黏度, 可发现在贮藏期 0~3 d, 187 型酸奶表观黏度最大, 其次为 495, 最低为 885。但在第 7 d, 495 型酸奶表观黏度高于 187 型酸奶, 在第 14 d, 885 型酸奶表观黏度也高于 187 型酸奶, 且与 495 型酸奶相近。这表明 495 和 885 型酸奶的表观黏度恢复速度高于 187 型酸奶, 而且以 885 型酸奶的速度最快。一方面可能由于酸奶结构恢复程度不同, 另一方面可能由于乳清析出导致蛋白含量的改变<sup>[22]</sup>。

贮藏前期, 187 型酸奶 SPH 组的表观黏度大于对照组, 但在第 14 d, 对照组的表观黏度略高于 SPH 组。贮藏过程中, 495 型酸奶 SPH 组的表观黏度均大于对照组。这表明 SPH 可增加 187 和 495 型酸奶的稳定性, 但 SPH 对 187 型酸奶的增黏效果会被贮藏过程中其他因素所抵消, 而对黏度恢复较快的 495 型酸奶增黏效

果较稳定。对 885 型酸奶, 贮藏过程中对照组的表观黏度均高于 SPH 组, 可能由于较高的乳清析出率影响了酸奶表观黏度的测量。

### 2.2.3 触变环面积

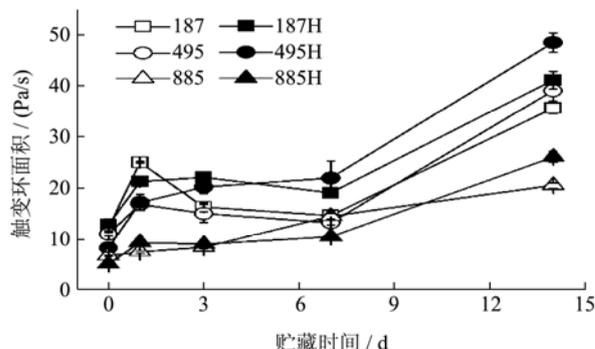


图 2 SPH 对不同发酵剂酸奶贮藏过程中触变环面积的影响

Fig.2 Influence of SPH on the hysteresis area of yoghurts fermented with different starter cultures

触变环面积越大, 触变性越大, 停止剪切后样品结构恢复越慢<sup>[23]</sup>。由图 2 可知, 尽管在部分贮藏期部分酸奶的触变环面积略有降低, 6 组酸奶的触变环面积在贮藏过程中呈逐渐增大趋势, 这可能由于贮藏过程中弱相互作用增多, 酸奶结构越来越牢固, 但这些弱相互作用容易被剪切过程所破坏, 从而表现为触变环面积的增大<sup>[24]</sup>。对照组酸奶的触变环面积由高至低依次为 495、187 和 885, 在第 14 d 达到最大值, 分别为 35.46 Pa/s, 38.88 Pa/s 和 20.46 Pa/s。在第 0 d, 发酵刚结束时, 不同发酵剂对酸奶的触变环面积影响较大, 添加 SPH 对其触变环面积影响较小。但在贮藏期第 3 d, 187 和 495 型酸奶的 SPH 组触变环面积大于对照组, 之后此增幅变化不大。这表明, SPH 可增加 187 和 495 型酸奶的弱作用力, 有利于贮藏过程中酸奶结构的恢复。贮藏过程中 SPH 对 885 型酸奶的作用较复杂, 这可能由于其较高的乳清析出率影响触变环面积的测定。

### 2.2.4 流动曲线拟合参数

表 5 为 SPH 对不同发酵剂酸奶贮藏期第 7 d 流动曲线拟合参数的影响。流动曲线反映酸奶在剪切过程的流体特征。由于本实验酸奶的屈服应力较小, 选用幂率模型拟合流动曲线。全部酸奶的拟合相关系数大于 0.99, 表明该模型能较好反映酸奶的流动特性。

通过比较对照组结果, 可发现 187 型酸奶的  $K$  值最高, 其次是 495, 最低为 885, 这与表观黏度数据略有不同, 主要由于表观黏度还与不同剪切速率下样品特性有关。SPH 可提高 187 和 495 型酸奶的  $K$  值, 提高酸奶黏性。但对 885 型酸奶, 对照组  $K$  值高于 SPH 组, 这可能由于其较高的乳清析出率。

6 组酸奶的  $n$  值均小于 1, 为假塑性流体, 具有剪切变稀特性<sup>[25]</sup>。酸奶的  $n$  值由样品剪切形变特性决定, 可反映粒子间弱相互作用。对比对照组的  $n$  值, 885 型酸奶的  $n$  值最高, 187 与 495 型酸奶的  $n$  值较接近。这表明 187 和 495 型酸奶剪切变稀程度较高, 其内部具有更多弱相互作用。3 种酸奶对照组  $n$  值均高于 SPH 组, SPH 可增加酸奶剪切变稀程度, 可能由于其促进了粒子间弱相互作用。6 组酸奶  $n$  值数据趋势与触变环面积数据相符。

表 5 SPH 对不同发酵剂酸奶贮藏期第 7 d 流动曲线拟合参数变化的影响

Table 5 Influence of SPH on the fitting parameters in flow behavior of yoghurts fermented with different starter cultures, on day 7 of storage

样品	$K/(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	$n\times 10$
187	1.05±0.02	3.51±0.02
187H	1.26±0.02	3.44±0.04
495	0.93±0.01	3.67±0.01
495H	1.33±0.02	3.56±0.02
885	0.80±0.02	4.08±0.07
885H	0.69±0.00	3.98±0.05

### 2.2.5 质构特性

质构测量采用压缩模式, 反映酸奶的压缩形变特性。据相关报道, 酸奶的质构特性与酪蛋白凝胶特性和粒子间相互作用有关<sup>[26,27]</sup>。表 6 为 SPH 对不同发酵剂酸奶贮藏期第 7 d 质构特性的影响。稠度反映向下压缩过程中探头所做的功。比较对照组的稠度特性, 可发现 187 型酸奶的稠度最高, 其次是 495, 最低为 885, 这与  $K$  值的趋势相近。SPH 均可提高 3 种酸奶的稠度。粘性指数反映探头向上提升过程中所做的功, 此时探头做负功, 粘性指数为负值。除了粒子特性和相互作用力, 粘性指数还与酸奶的粘性有关。比较对

表 7 SPH 对不同发酵剂酸奶贮藏期第 7 d 蠕变特性的影响

Table 7 Influence of SPH on the creep properties of yoghurts fermented with different starter cultures, on day 7 of storage

项目	187	187H	495	495H	885	885H
$\eta/(\times 10^2 \text{ Pa}\cdot\text{s})$	8.35±0.12	11.00±0.35	3.14±0.82	5.48±0.07	1.00±0.04	1.24±0.03
$J_e/\text{Pa}^{-1}$	0.14±0.03	0.13±0.02	0.40±0.03	0.23±0.01	0.49±0.04	0.42±0.01
$\gamma_{max}/\text{s}^{-1}$	5.73±0.55	4.77±0.39	15.71±0.27	9.02±0.84	33.66±1.24	27.78±0.57
回复率/%	50.16±0.98	45.94±0.45	48.73±1.98	48.53±3.12	71.08±0.79	69.68±3.50

照组的  $J_e$  值越高, 越容易形变<sup>[28]</sup>。对比 3 个对照组的的结果, 可发现 885 型酸奶的  $J_e$  值最高, 为 0.49/Pa, 其次为 495, 最低为 187。这表明 885 型酸奶在应力作用下最容易发生形变, 酸奶结构最不稳定。3 种酸奶对照组的  $J_e$  值均高于 SPH 组, 这表明 SPH 可降低酸奶在受力下的形变破坏程度。SPH 对 495 型酸奶的作

照组的粘性指数, 187 型酸奶的粘性指数最低, 其次是 495, 最高为 885。3 种酸奶 SPH 组的粘性指数均明显低于对照组。总体而言, 187 型酸奶的质构特性最好, 其次为 495, 最低为 885, SPH 可改善 3 种酸奶的质构特性。

表 6 SPH 对不同发酵剂酸奶贮藏期第 7 d 质构特性的影响

Table 6 Influence of SPH on the textural properties of yoghurts fermented with different starter cultures

样品	稠度/(g·s)	粘性指数/(g·s)
187	282.09±0.27	-34.27±0.71
187H	303.13±1.14	-45.49±0.04
495	263.80±5.22	-27.08±0.05
495H	276.78±0.14	-34.86±0.74
885	228.38±5.90	-20.89±2.25
885H	249.84±3.65	-25.55±0.09

### 2.2.6 蠕变特性

在蠕变实验中, 当作用应力小于酸奶的屈服应力时, 柔量 ( $J_e$ ) 等参数与所施加应力无关。但若剪切应力太大, 酸奶将发生不可逆形变, 不能准确反映回复阶段黏弹分量。因此本实验设置作用应力为 0.2 Pa, 以确保作用应力小于 6 组酸奶的屈服应力。表 7 为 SPH 对不同发酵剂酸奶贮藏期第 7 d 蠕变特性的影响。

零剪切黏度 ( $\eta$ ) 越大, 需要越高的应力才能使酸奶流动, 因此酸奶的静置稳定性越高。对照组的  $\eta$  值差异较大, 其中 187 型酸奶的  $\eta$  值最大, 达到  $8.35\times 10^2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 其次为 495, 最低为 884。这表明 187 型酸奶不易被小应力所破坏, 在运输贮藏过程中更稳定。SPH 均能提高 3 种酸奶的  $\eta$  值, 从而提高其静置稳定性。其中, SPH 对 495 型酸奶的作用最明显,  $\eta$  值增长率为 74.52%, 而对 187 和 885 型酸奶的增长率分别为 31.74%和 24.00%。

用效果最明显, 下降率高达 42.31%, 其次为 885, 为 13.50%, 最低为 187, 为 9.73%。 $J_e$  数据趋势与最大形变 ( $\gamma_{max}$ ) 相近, 但与  $\eta$  值的结果略有不同, 这可能与  $\eta$  值取决于酸奶的屈服应力, 而  $J_e$  值还与其运动黏度有关。

回复率反映酸奶经应力作用后松弛恢复的程度。

回复率的数据趋势与 $\gamma_{max}$ 值相近,因此在这个体系中, $\gamma_{max}$ 值对回复率的作用较大。但是,由于187酸奶的平衡形变远低于495和495H酸奶,187酸奶的回复率高于495和495H酸奶,这表明187酸奶在破坏后结构恢复更好。

### 3 结论

SPH可提高以187、495和885为发酵剂酸奶的pH值下降速度,具有促发酵效果,其中对发酵速度较慢的酸奶促发酵效果更显著( $p < 0.05$ )。贮藏过程中,6组酸奶的表观黏度和触变环面积不断增加,但在贮藏中后期,酸奶开始出现乳清析出,影响部分酸奶流变特性的测量,而且发酵速度最快的885型酸奶乳清析出率最高。SPH可减缓酸奶的乳清析出,增加酸奶稳定性,其中对885型酸奶的效果更明显。同时,SPH能增加187和495型酸奶的触变环面积和表观黏度,有利于酸奶结构的恢复。进一步研究酸奶第7d的质构和流变特性,并利用幂率模型对流动曲线进行拟合。可发现,SPH可明显提高3种酸奶稠度和零剪切黏度,降低其流动指数、柔量和粘性指数,从而有效改善3种酸奶的流变和质构特性,提高酸奶在低应力下稳定性,降低其在高应力下形变破坏程度。

### 参考文献

- [1] 陈正哲,那治国,余宁江. 搅拌型酸奶质量控制的研究进展[J]. 中国乳业, 2014, 5: 55-57  
CHEN Zheng-zhe, NA Zhi-guo, YU Ning-jiang. Research progress of stirred yoghurt quality control [J]. China Dairy, 2014, 5: 55-57
- [2] 孟令帅,徐鑫,刘倩颖,等. 市售酸奶在贮存期间品质变化分析[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(7): 161-165  
MENG Ling-shuai, XU Xin, LIU Qian-ying, et al. Quality change analysis on commercial yoghurt during storage [J]. Food and Fermentation Industries, 2014, 40(7): 161-165
- [3] Krzeminski A, Grobhaber K, Hinrichs J. Structural properties of stirred yoghurt as influenced by whey proteins [J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(10): 2134-2140
- [4] Zhang Q, Ren J, Zhao M, et al. Isolation and characterization of three novel peptides from casein hydrolysates that stimulate the growth of mixed cultures of *Streptococcus thermophilus* and *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(13): 7045-7053
- [5] 周雪松,蒋灿明,曾建新,等. 低聚糖、肽对发酵乳发酵时间及品质影响研究[J]. 现代食品科技, 2007, 23(5): 1-3  
ZHOU Xue-song, JIANG Can-ming, ZENG Jian-xin, et al. Effects of oligosaccharides and peptides on fermentation of yoghurt [J]. Modern Food Science and Technology, 2007, 23(5): 1-3
- [6] 潘思轶,陈丽,王可兴. 酶解大豆蛋白对酸奶发酵酸度及流变特性的影响研究[J]. 食品科学, 2003, 24(8): 35-39  
PAN Si-yi, CHEN Li, WANG Ke-xing. Study on acidity and rheological behaviour of yogurt mixed with enzymatic soy-protein hydrolysate [J]. Food Science, 2003, 24(8): 35-39
- [7] 赵强忠,曾羲,赵谋明. 大豆分离蛋白胰酶酶解液对酸乳促发酵作用及增黏作用[J]. 中国食品学报, 2016, 16(4): 88-95  
ZHAO Qiang-zhong, ZENG Xi, ZHAO Mou-ming. Effect of soy protein hydrolysate by trypsin of growth stimulation and viscosity promotion in yoghurt [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(4): 88-95
- [8] Saxena S N, Mital B K, Garg S K. Effect of casitone and fructose on the growth of *Lactobacillus acidophilus* and its survival during storage [J]. International Journal of Food Microbiology, 1994, 21(3): 271-276
- [9] 曲杜娟. 乳清蛋白水解物对酸乳发酵及储藏特性影响的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010  
QU Du-juan. Study on effect on whey protein hydrolysate on fermentation and storage property of yoghurt [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010
- [10] 张清丽. 酪蛋白活性肽对乳酸菌生长代谢及酸乳发酵影响的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011  
ZHANG Qing-li. Studies on casein-derived bioactive peptides on lactic acid bacteria metabolism and yoghurt fermentation [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011
- [11] Kihara H, Snell E E. Peptides and bacterial growth VII. Relation to inhibitions by thienylalanine, ethionine, and canavanine [J]. Journal of Biological Chemistry, 1955, 212(1): 83-94
- [12] Cowman R A, Baron S S. Influence of hydrophobicity on oligopeptide utilization by oral *Streptococci* [J]. Journal of Dental Research, 1990, 69(12): 1847-1851
- [13] Sodini I, Lucas A, Tissier J P, et al. Physical properties and microstructure of yoghurts supplemented with milk protein hydrolysates [J]. International Dairy Journal, 2005, 15(1): 29-35
- [14] 罗安东,周雪松,曾建新,等. 酪蛋白水解产物对不同酸奶发酵时间及品质影响[J]. 现代食品科技, 2007, 23(9): 50-52  
LUO An-dong, ZHOU Xue-song, ZENG Jian-xin, et al.

- Effects of casein hydrolysate on fermentation time and quality of yoghurts [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2007, 23(9): 50-52
- [15] Ramaswamy H S, Basak S. Rheology of stirred yoghurts [J]. *Journal of Texture Studies*, 1991, 2(22): 231-241
- [16] Nguyen H T H, Ong L, Kentish S E, et al. Homogenisation improves the microstructure, syneresis and rheological properties of buffalo yoghurt [J]. *International Dairy Journal*, 2015, 46(3-4): 78-87
- [17] 赵强忠, 邝婉涓, 赵谋明. 搅打充气对搅打奶油流变特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2015, 30(11): 81-85  
ZHAO Qiang-zhong, KUANG Wan-mei, ZHAO Mou-ming. Effect of whipping and air inflation process on rheological properties of whipped cream [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2015, 30(11): 81-85
- [18] Ayala-Hernandez I, Hassan A N, Goff H D, et al. Effect of protein supplementation on the rheological characteristics of milk permeates fermented with exopolysaccharide-producing *Lactococcus lactis* subsp. *Cremoris* [J]. *Food Hydrocolloids*, 2009, 23(5): 1299-1304
- [19] Zhang Q, Ren J, Zhao H, et al. Influence of casein hydrolysates on the growth and lactic acid production of *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *Bulgaricus* and *Streptococcus thermophilus* [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2011, 46(5): 1014-1020
- [20] Kevvai K, Kutt M, Nisamedtinov I, et al. Utilization of 15N-labelled yeast hydrolysate in *Lactococcus lactis* IL1403 culture indicates co-consumption of peptide-bound and free amino acids with simultaneous efflux of free amino acids [J]. *Antonie van Leeuwenhoek*, 2014, 105(3): 511-522
- [21] 赵谋明, 卢延辉, 林伟锋, 等. 乳清蛋白对脱脂发酵乳的流变特性及贮存稳定性的影响[J]. *中国乳品工业*, 2006, 34(2): 4-6  
ZHAO Mou-ming, LU Yan-hui, LIN Wei-feng, et al. Effects of whey protein on the rheology characteristic and the storage stability of fat-free yoghurt [J]. *China Dairy Industry*, 2006, 34(2): 4-6
- [22] Marafon A P, Sumi A, Alcantara M R, et al. Optimization of the rheological properties of probiotic yoghurts supplemented with milk proteins [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2011, 44(2): 511-519
- [23] Rao M A. Rheology of fluid, semisolid, and solid foods [M]. New York: Springer, 2014
- [24] Espirito-Santo A P, Lagazzo A, Sousa A L O P, et al. Rheology, spontaneous whey separation, microstructure and sensorial characteristics of probiotic yoghurts enriched with passion fruit fiber [J]. *Food Research International*, 2013, 50(1): 224-231
- [25] 方波. 化工流变学概论[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2010  
FANG Bo. Introduction to chemical rheology [M]. Beijing: China's Textile Press, 2010
- [26] Ciron C I E, Gee V L, Kelly A L, et al. Comparison of the effects of high-pressure microfluidization and conventional homogenization of milk on particle size, water retention and texture of non-fat and low-fat yoghurts [J]. *International Dairy Journal*, 2010, 20(5): 314-320
- [27] Miwa N, Nio N, Sonomoto K. Effect of enzymatic deamidation by protein-glutaminase on the textural and microstructural properties of set yoghurt [J]. *International Dairy Journal*, 2014, 36(1): 1-5
- [28] 施拉姆. 实用流变测量学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009  
Schramm G. A practical approach to rheology and rheometry [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009