

# 微射流处理对发酵豆乳流变学特性及微观结构的影响

雷勇刚<sup>1</sup>, 郑茵<sup>2</sup>, 李理<sup>1</sup>

(1. 华南理工大学轻工与食品学院, 广东广州 510640) (2. 广东工业大学轻化工学院, 广东广州 510006)

**摘要:** 以添加 2% 浓缩乳清蛋白的豆乳为原料, 经过不同压力的微射流处理后, 利用瑞士乳杆菌(*Lactobacillus helveticus* LH-B02) 和干酪乳杆菌(*Lactobacillus casei* L.casei-01) 组合发酵制备发酵豆乳, 研究了微射流处理对发酵豆乳流变特性和微观结构的影响。结果表明, 豆乳经过微射流处理后, 制备的发酵豆乳持水力增大, 同时表现出较强的粘弹性以及剪切稀化特性, 表观粘度和屈服应力也有所增加, 并且随处理压力的增加, 这种趋势愈发明显。此外, 微射流处理后, 发酵豆乳的微观结构中孔隙变小, 蛋白之间交联增多, 整体呈现出更加均一致密的凝胶网络结构。

**关键词:** 微射流处理, 发酵豆乳, 流变特性, 微观结构

文章编号: 1673-9078(2013)2-251-255

## Effect of Microfluidization Treatment on Rheological Characteristics and Microstructure of Soy Yogurt

LEI Yong-gang<sup>1</sup>, ZHENG Yin<sup>2</sup>, LI Li<sup>1</sup>

(1. College of Light Industry and Food Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

(2. College of Light Industry and Chemical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Rheological characteristics and microstructure of probiotic soy yogurt were studied in this research. *Lactobacillus helveticus* LH-B02 and *Lactobacillus casei* L.casei-01 were used to ferment soy milk microfluidized at different pressures. Results indicated that: microfluidization of soy milk led to a prominently higher water holding capacity (WHC) of soy yogurt. Meanwhile, soy yogurt elaborated from microfluidized soy milk showed stronger viscoelastic and shear-thinning properties, higher apparent viscosity and yield stress. Moreover, smaller but more pores, more interconnections among protein aggregates were observed in microstructure of soy yogurt prepared from microfluidized soy milk, exhibiting a more homogeneous and compact gel network.

**Key words:** microfluidization; soy yogurt; rheological characteristics; microstructure

酸豆乳是一种新型的发酵豆制品, 它是以新鲜豆乳为原料, 加入一些可供乳酸菌利用的糖类作为发酵促进剂, 经乳酸菌发酵形成的一种风味独特、营养价值高的功能性豆乳产品<sup>[1]</sup>, 具有改善肠道菌群、抗肿瘤、抗衰老等功能特性<sup>[2-3]</sup>。一方面, 它保留了大豆降胆固醇、降血糖和调节血脂等功效, 另一方面, 发酵破坏了大豆中的抗营养因子, 进一步提升了其营养价值, 同时乳酸菌产生的蛋白水解酶能够降解大豆蛋白, 使其更加细腻润滑<sup>[4-5]</sup>。但是目前发酵豆乳还没有被人

收稿日期: 2012-12-22

基金项目: 广东省科技攻关项目(2011B020310004)

作者简介: 雷勇刚(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为粮食、油脂及植物蛋白工程

通讯作者: 李理(1965-), 女, 博士, 教授, 研究方向为蛋白质化学

们普遍接受, 主要原因就是其中存在豆腥味、青草味等不良风味以及口感粗糙不够柔软等缺陷<sup>[6]</sup>。国内研究中有利用新型乳酸菌发酵<sup>[7]</sup>、NaHCO<sub>3</sub>、半胱氨酸和柠檬酸溶液浸泡大豆<sup>[8]</sup>以及萌发大豆<sup>[9]</sup>和烘烤大豆<sup>[10]</sup>来达到豆乳和酸豆乳脱腥的目的, 而国外研究主要有通过添加乳清蛋白<sup>[11]</sup>、菊粉<sup>[12]</sup>、超高压均质处理<sup>[13-14]</sup>和微射流处理<sup>[15]</sup>等方式来改善发酵乳的质构和感官性质。

动态高压微射流技术是一种新兴的高压加工技术, 能对流体混合物料进行强烈剪切、高速撞击、压力瞬时释放、高频振荡、膨爆和气穴等一系列综合作用, 从而起到很好的超微化, 微乳化和均一化效果<sup>[16]</sup>。微射流技术由于具有高压混合、均质和减小粒度等多种作用, 已被广泛应用于食品、制药、医疗和化妆品

等行业中。在乳品行业中,微射流技术作为一种重要的均质技术,现已成功应用于加工婴儿配方食品<sup>[17]</sup>、切达奶酪<sup>[18]</sup>、马苏里拉奶酪<sup>[19]</sup>、奶油利口酒<sup>[20]</sup>和奶油<sup>[21]</sup>中。在课题组前期研究的基础上,本实验以添加2%乳清蛋白的豆乳为原料,研究了微射流处理对发酵豆乳的流变学特性和微观结构的影响,以达到通过在发酵前对豆乳进行微射流处理来改善发酵豆乳质构的目的。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验原料

大豆:市售大豆,饱满,无霉变;脱脂乳粉(蛋白含量约为32.7%):新西兰 Fonterra 有限公司;浓缩乳清蛋白粉 WPC70:美国格兰比亚有限公司(干基蛋白含量 65.72%);尼罗红、固绿染料:Sigma 公司;其他试剂均为国产分析纯。

瑞士乳杆菌(*Lactobacillus helveticus* LH-B02)和干酪乳杆菌(*Lactobacillus casei* Lcasei-01):丹麦 Hansen 公司样品。

### 1.2 主要仪器设备

Seven Easy pH 计(S20),瑞士;JJ500 型电子天平,浙江余姚铭称重校验设备有限公司;AL204-IC 电子天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;PXY-190S-A 型生化培养箱,广东韶关科力仪器有限公司;YXQ-SG46-280S 型手提式高压灭菌锅,合肥华泰医疗设备有限公司;DHG-9146A 型电热鼓风干燥箱:上海精宏实验设备有限公司;SZX 超净工作台,吴江净化设备总厂;美的搅拌机 BE351B,广东美的电器制造有限公司;CR-400 便捷式色差计(生产厂家),香港美能达有限公司;Hakke 流变仪,德国;高压微射流纳米均质机 M110-EH:美国 MFIC 公司;TCS SP5 激光扫描共聚焦显微镜:德国莱卡仪器公司;若干其他玻璃仪器等。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 工艺流程

大豆→挑选→浸泡→去皮→热磨浆→过滤→豆乳→加6%蔗糖,1%乳糖和2%乳清蛋白→微射流处理→灭菌→冷却→接种发酵剂→42℃发酵4h→4℃冷藏24h

#### 1.3.2 发酵底物的制备

挑选颗粒饱满,无霉变的大豆,去杂冲洗后于25℃浸泡14h,去皮,以豆水质量体积比1:10,85℃热水磨浆,过180目筛得到纯豆乳,再向其中添加6%的蔗糖,1%的乳糖和2%的浓缩乳清蛋白 WPC,经过搅拌充分溶解,将豆乳分别经过50 MPa, 100 MPa, 150 MPa 微射流处理后,于100℃下灭菌15 min。

#### 1.3.3 接种

配制12%的脱脂乳培养基,经过115℃灭菌10 min,分别接入瑞士乳杆菌 LH-B02 和干酪乳杆菌 L.casei-01,37℃下发酵凝乳,活化2~3次后,扩大培养,参考刘占祥<sup>[22]</sup>等人的方法测定菌种活力,活力达到0.7即可用于发酵接种。在发酵底物中分别接入2.5%的瑞士乳杆菌 LH-B02 和2.5%的干酪乳杆菌 L.casei-01。

#### 1.3.4 发酵酸豆乳各项指标测定

##### 1.3.4.1 持水力的测定<sup>[23]</sup>

取30 g 接种后的发酵豆乳,在离心管(直径32 mm,高115 mm)中42℃发酵4 h后取出,4℃冷藏后24 h后,将样品在20℃条件下480 g 离心10 min,去除乳清后称重。持水力表达为:

$$\text{持水力}(\%) = (1 - W_1/W_2) \times 100,$$

其中:W<sub>1</sub>为离心后样品的质量,W<sub>2</sub>为离心前样品的质量

##### 1.3.4.2 流变特性的测定

采用小振幅频率扫描法测定发酵乳的流变特性。先将酸奶顺时针搅打10次,后逆时针搅打10次。选用直径40 mm的不锈钢平板探头,平板与底面的间隙为1 mm,测试温度控制在25±0.5℃。

首先,频率固定在1 Hz,从0%到50%应变范围进行扫描,确定样品的恒定应变为0.5%。然后进行样品测试:剪切扫描,剪切速率从0增大到500 1/s,然后从500 1/s 减小至0,扫描时间为360 s;频率扫描,应变固定在0.5%,频率从0.1~10 Hz 进行扫描。每个样品测定重复两次。

##### 1.3.4.3 激光扫描共聚焦显微镜(CLSM)<sup>[15]</sup>

将载玻片用酒精擦洗后放入超净台中紫外杀菌,移液枪和枪头也提前灭菌,取1 mL 接种后的样品加入小离心管中,先加0.125%的尼罗红,1,2-丙二醇溶液染料30 uL,待显色后加入10 μL 0.1%固绿水溶液染料,混匀后制片,吸取160 μL 染色后的样品加入载玻片,盖盖玻片的时候注意尽量避免产生气泡。最后用指甲油将盖玻片四周密封,用锡纸包裹起来,42℃发酵4 h,4℃后熟24 h后进行测试。将载玻片倒置在载物台上,用63倍油镜和100倍物镜进行观察,在488 nm 和633 nm 波长下同时激发。

#### 1.3.5 数据处理和分析

实验数据采用 SPSS 16.0 统计分析软件进行分析处理。平均值和标准偏差由3个平行样品的测量结果经计算得到。

## 2 结果与讨论

### 2.1 微射流处理对大豆酸奶持水力的影响

持水力是反映酸奶凝胶体系稳定性的一个重要参数。Lucey 等人<sup>[24]</sup>认为,在离心力作用下,乳清析出越多,酸奶胶体网络结构越不稳定,反之亦然。利用微射流处理后的豆乳制备的发酵豆乳持水力显著地高于未经处理的(表 1),并且随着处理压力从 50MPa 升高到 150MPa,发酵豆乳(SY50, SY100 及 SY150)的持水力略有增加,但是并没有显著差异。根据 Ciron 等人<sup>[15]</sup>的研究,微射流处理在减小凝胶体系中蛋白及脂肪颗粒大小的同时显著增加了其数量,使得发酵过程中可用于相互作用的胶粒总表面积增加,因而能产生更加均匀稳定的凝胶网络结构,将水分更好地包裹在其中。

## 2.2 微射流处理对大豆酸奶流变学特性的影响

### 2.2.1 大豆酸奶的粘弹性分析

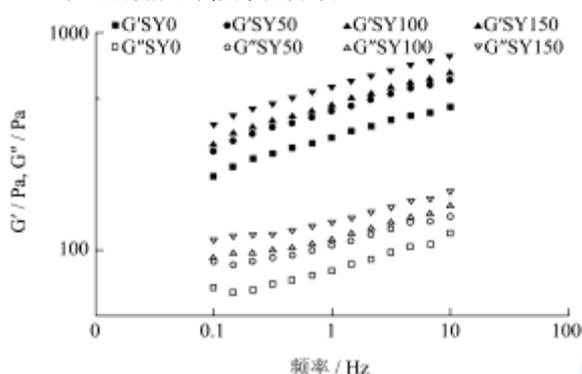


图 1 大豆酸奶频率扫描曲线

Fig.1 Frequency sweep curve of soy yogurt

弹性模量(储存模量)  $G'$  是储存在样品中的一种弹性能量,是衡量样品弹性的尺度,而粘性模量(损耗模量)  $G''$  表示在样品中损失的那部分能量,可用来衡量样品的粘性特征<sup>[10]</sup>。由图 1,在 0.1~10Hz 的频率范围内,随扫描频率的增大,4 种发酵豆乳的  $G'$  及  $G''$  值都呈增加的趋势,且  $G'$  值均高于  $G''$ ,表明样品中弹性成分占优势,样品表现出类固体的特征。

微射流处理后,发酵豆乳  $G'$  和  $G''$  均增加,且随着微射流处理的压力的增大,  $G'$  和  $G''$  也逐渐增加。经过 150 MPa 处理的大豆酸奶 SY150 具有最高的  $G'$  和  $G''$  值,而未经处理的 SY0  $G'$  和  $G''$  值最低,表明对豆乳进行微射流处理能够显著地改变发酵豆乳的粘弹性流变特性。弹性模量  $G'$  和损耗模量  $G''$  与发酵豆乳的凝胶结构密切相关,弹性模量  $G'$  的差别反映了不同处理的大豆酸奶凝胶特性的不同。SY50, SY100 及 SY150 较高的  $G'$  值说明了相较 SY0,这三种发酵豆乳的弹性高,酸乳凝胶结构更为紧密,这与前述持水力的结论是一致的。造成这个结果可能是因为,一方面,高压微射流处理使水分子发生聚合,自由水到蛋白质氨基酸侧链周围变成结合水,减小了蛋白质水溶液的

体积,破坏了离子键作用,从而使蛋白质分子内及分子间产生更多的氢键<sup>[25]</sup>,因而有利于提高蛋白凝胶的强度,使形成的凝胶网络更加致密和精细。另一方面,豆浆中蛋白和脂肪在经过微射流处理后被打散,更细小的蛋白和脂肪颗粒更均匀地分散在凝胶体系中,也有利于形成更加均匀和紧密的蛋白凝胶网络结构。

### 2.2.2 大豆酸奶流动行为分析

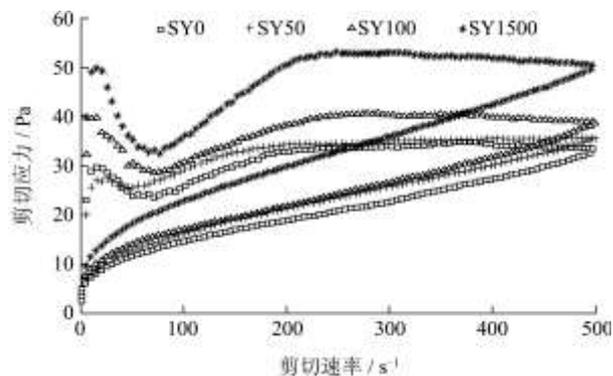


图 2. 大豆酸奶剪切扫描曲线

Fig.2 Flow curve of soy yogurt

由图 2 可见,4 种发酵豆乳均为假塑性流体,具有一定的剪切稀化特性,同时,4 种发酵豆乳的流变曲线中都出现滞后回路,显示出高度的触变性。不同压力微射流处理后的大豆酸奶呈现出明显不同的流变特性,其中 SY150 显示出最强的剪切稀化特性,SY100 和 SY50 居中,SY0 表现出最弱的剪切稀化特性(图 2),这与经过微射流处理后的大豆酸奶紧密的凝胶网络结构有关。此外,4 种发酵豆乳具有显著不同的滞后回路的大小,SY150 滞后回路面积最大(7519.5  $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ ),其次是 SY100(6498.5  $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ ),SY50 和 SY0 最小,两者之间并无显著性差异(5304.0  $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$  和 4845.5  $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ ),表明,相比未经处理的大豆酸奶(SY0),经过高压微射流处理后的样品(SY150, SY100, SY50)不易从剪切诱导产生的形变中完全恢复,并且随着处理压强的增大,这样的趋势越来越显著。

Herschel-Bulkley 模型能够较好地拟合发酵豆乳剪切扫描的下行线(0.990<R<0.999),相关流变参数显示在表 1 中。随着微射流处理压强的升高(50MPa 增加到 150MPa),发酵豆乳的屈服应力  $\tau_0$  逐渐增大(5.87Pa 增加到 8.95Pa)。屈服应力  $\tau_0$  的增加表明样品开始流动时所需的剪切力增大,即样品抵抗剪切作用的能力越强<sup>[26]</sup>。因此,从 SY0 到 SY150,酸乳抗剪切的能力越来越强,进一步说明微射流处理后的大豆酸奶具有更加紧密的网络结构。此外,从 SY0 到 SY150,  $\kappa$  值逐渐增大,  $n$  值逐渐减小(表 1),表明酸乳的稠度越来越大,剪切稀化特性越来越明显。表观粘度是影响酸奶感官品质的一个重要参数,其中在

10 s<sup>-1</sup>, 50 s<sup>-1</sup> 的剪切速率下的表观粘度  $\eta_{10}$  和  $\eta_{50}$  具有很重要的参考意义, 因为该剪切速率与口腔中咀嚼过程的速率相似<sup>[27]</sup>且  $\eta_{50}$  与爽滑感和粘稠度的感知具有紧密的联系<sup>[28]</sup>。经微射流处理的豆浆制备的大豆酸奶 SY50、SY100、SY150 的  $\eta_{10}$  (0.82 Pa·s, 0.92 Pa·s, 1.18 Pa·s) 和  $\eta_{50}$  (0.26 Pa·s, 0.28 Pa·s, 0.36 Pa·s) 值都分别高于未处理的样品 SY0 (0.75 Pa·s 和 0.23

Pa·s), 并且 SY150 的  $\eta_{10}$  和  $\eta_{50}$  值显著高于其他样品 (P<0.05)。微射流处理后大豆酸奶表观粘度的增加可能是由于酸乳微观结构及凝胶体系中颗粒大小发生变化导致的<sup>[26]</sup>。微射流处理极大地减小了豆浆中脂肪球的大小, 有利于其紧密地与蛋白作用, 形成稳固的凝胶网络结构<sup>[15]</sup>, 因而在感官上表现出酸奶粘度的增加。

表 1. Herschel-Bulkley 模型分析发酵豆乳下行线的流变参数

**Table 1 Flow behavior parameters of soy yogurt (downward flow)**

参数	SY0	SY50	SY100	SY150
持水力/%	94.06±0.66a	95.30±0.17b	95.53±0.32b	95.60±0.29b
$\tau_0$ /Pa	5.87±0.32a	6.13±0.96a	8.45±1.00a	8.95±1.79a
$\kappa$ /Pa·s <sup>n</sup>	0.21±0.09a	0.35±0.12a	0.50±0.02a	0.60±0.06a
<i>n</i>	0.80±0.07a	0.73±0.17a	0.65±0.01a	0.67±0.04a
HL/(Pa·s)	4845.5±420.7a	5304.0±305.5a	6498.5±40.3b	7519.5±433.5c
R	0.994	0.995	0.998	0.997
$\eta_{10}$ /Pa s	0.75±0.02a	0.82±0.03a	0.92±0.00a	1.18±0.17b
$\eta_{50}$ /Pa s	0.23±0.02a	0.26±0.01a	0.28±0.01a	0.36±0.05b

注: 1. 结果为平均值±标准差(n=3),  $\tau_0$ =屈服应力,  $\kappa$ =稠度系数, *n*=流动行为指数, HL=滞后面积(Hysteresis Loop area),  $\eta_{10}$ 、 $\eta_{50}$  =在 10 s<sup>-1</sup>, 50 s<sup>-1</sup> 的剪切速率下的表观粘度, R=相关系数; 2. a、b、c 表示显著性差异 (p<0.05); SY0, SY50, SY100, SY150 分别表示经过高压微射流 0MPa、50MPa、100MPa、150 MPa 处理的豆浆制备的大豆酸奶。

### 2.3 微射流处理对大豆酸奶微观结构的影响

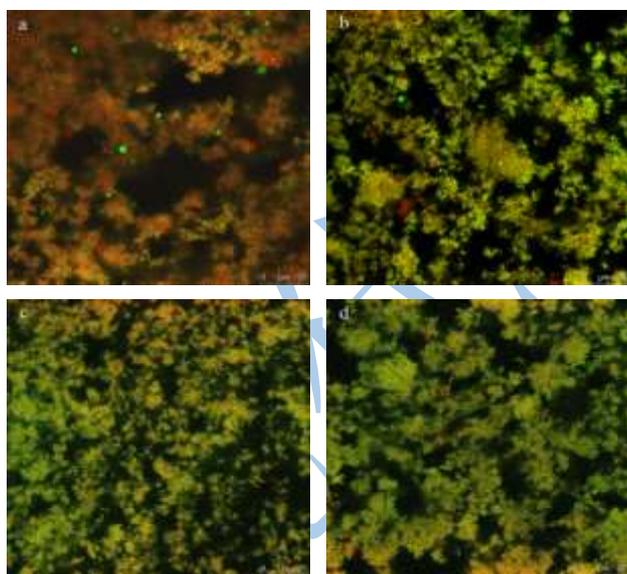


图 3 大豆酸奶激光扫描共聚焦图片

Fig.3 Confocal laser scanning micrographs of soy yogurts prepared from soymilk

注: 图中 a、b、c、d 分别表示表示经过高压微射流 0MPa、50 MPa、100 MPa、150 MPa 处理的豆浆制备的大豆酸奶 SY0、SY50、SY100 和 SY150。

大豆酸奶的微观结构由激光扫描共聚焦显微镜观察得到。如图 3 所示, 4 种发酵豆乳样品都呈现出多孔隙的网络结构, 局部有大的蛋白颗粒聚集体。其中,

未经微射流处理的豆浆制备的大豆酸奶 SY0 (图 3a) 的网络结构不均匀, 具有较大空隙, 同时出现肉眼可见清晰的脂肪球 (直径约 3~5  $\mu\text{m}$ )。而豆浆经过微射流处理后, 制备的大豆酸奶 SY50, SY100, SY150 (图 3b, c, d) 微观结构中孔隙变小, 蛋白聚集体更加致密, 整体呈现出更加均一的网络结构。

SY0 与 SY50, SY100 和 SY150 大豆酸奶微观结构上的差异, 一方面可能是因为微射流处理显著减小了体系中的颗粒大小 (蛋白和脂肪), 使得他们在凝胶形成的过程中更容易相互连接; 另一方面, 可能与脂肪球膜 (FGM) 有关。Sharma 和 Dalglish 提出<sup>[30]</sup>, 微射流处理后的脂肪球表面具有一层很薄的膜, 热处理后, 变性的乳清蛋白镶嵌在脂肪球膜上, 这样一个具有蛋白成分的膜能使经过微射流处理后的脂肪球表现出类蛋白的特性, 有利于其与蛋白胶束或乳清蛋白稳定地连接在一起, 因而形成稳定均一的网络结构。

### 3 结论

3.1 豆浆微射流处理对发酵豆乳的持水力有明显的影 响。与未经处理的发酵豆乳 SY0 相比, 豆浆经过 50MPa、100 MPa 和 150 MPa 微射流处理后, 发酵豆乳 SY50、SY100 和 SY150 的持水力显著地增大, 但是 SY50、SY100 和 SY150 之间的持水力并无显著性的差异。

3.2 对豆乳进行微射流处理能够显著地改变发酵豆乳的粘弹性流变特性。微射流处理后,发酵豆乳 SY50, SY100 和 SY150 表现出较强的粘弹性以及剪切稀化特性,表观粘度和屈服应力也有所增加,整个凝胶体系更加紧密粘稠,并且这种趋势随处理压力的增加变得越来越明显。

3.3 微射流处理后, SY50, SY100, SY150 发酵豆乳的微观结构中孔隙变小,蛋白之间交联增多,蛋白聚集体更加致密,整体呈现出更加均一稳定的网络结构。

### 参考文献

- [1] 李锋,华欲飞.大豆酸奶的营养保健功能及前景展望[J].粮油食品科技,2005,13(2):2-3
- [2] 张迅捷.大豆酸奶的研制开发及营养保健功能[J].中国乳品工业,2000,28(5):26-28
- [3] 毛学英,南庆贤.乳及乳制品中生物活性的种类及功能多样性[J].中国乳品工业,2004,32(1):41-43
- [4] 王浩.牛奶组分对益生菌酸豆乳的影响研究[D].广东广州:华南理工大学轻工与食品学院, 2011
- [5] 赵宇星.发酵型酸豆乳饮料的研制[D].江苏,无锡:江南大学食品学院,2005
- [6] Lee S Y, Hott C V, Seo A. Comparison of milk-based and soy milk-based yogurt [J]. Journal of Food Science, 1990, 55(2): 532-536
- [7] 李新华,许娜,王安平,等.豆浆乳酸菌发酵脱腥及在大豆冰淇淋中的应用研究[J].食品工业科技,2010,(12):279-281
- [8] 张世仙,王正武,吴金鸿,等.豆乳去腥味技术研究[J].食品工业科技,2010,(7):223-225,229
- [9] 杨媚,李理.应用萌发大豆生产益生菌发酵豆乳的研究[J].食品工业科技,2010,31(11):206-209
- [10] 雷勇刚,李理.烘烤大豆制备发酵豆乳流变学特性的研究[J].食品工业科技,2012,33(14):124-127,131
- [11] D Guggisberg, P Eberhard, B Albrecht. Rheological characterization of set yoghurt produced with additives of native whey proteins [J]. International Dairy Journal, 2007, 17: 1353-1359
- [12] Tatdao Paseephol, Darylm Small, Frank Sherkat. Rheology and Texture of Set Yogurt as Affected by Inulin Addition [J]. Journal of Texture Studies, 2008, 39: 617- 634
- [13] N S Cruz, M Capellas, D P Jaramillo, et al. Soy milk treated by ultra high-pressure homogenization: Acid coagulation properties and characteristics of a soy-yogurt product [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23: 490-496
- [14] M Serra, A J Trujillo, B Guamis, et al. Evaluation of physical properties during storage of set and stirred yogurts made from ultra-high pressure homogenization- treated milk [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23:82-91
- [15] C I E Ciron, V L Gee, A L Kelly, 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, 20:314-320
- [16] 万婕,刘成梅,蓝海军等.动态瞬时高压作用对膳食纤维酶解速度的影响[J].高压物理学报,2008,22(4):439-444
- [17] Pouliot Y, Britten M, Latreille B. Effect of high -pressure homogenization on a sterilized infant formula-microstructure and age gelation [J]. Food Structure, 1990, 9: 1-8
- [18] Lebeuf Y, Lacroix C, Paquin P. Effect of incorporation of denatured and microparticulated whey protein in young cheddar cheese [J]. Lait, 1998, 78: 303-318
- [19] Tunick M H, Van Hekken D L., Cooke P H, et al. Effect of high pressure microfluid ization on microstructure of mozzarella cheese [J]. Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie-Food Science and Technology, 2000, 33: 538-544
- [20] Paquin P, Giasson J. Microfluidization as a homogenization process for cream liqueur [J]. Lait, 1989, 69: 491-498
- [21] Olson D W, White C H, Watson C E. Properties of frozen dairy desserts processed by microfluidization of their mixes [J]. Journal of Dairy Science, 2003, 86: 1157-1162
- [22] 刘占祥,王琪,沈晶.酸牛奶的加工技术[J].宁夏农林技术, 2000,5:62-63
- [23] V Ferragut, N S Cruz, A Trujillo, et al. Physical characteristic during storage of soy yogurt made from ultra-high pressure homogenized milk [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 92:63-69
- [24] Lucey J A, Munro P A, Singh H. Whey separation in acid skim milk gels made with glucono- $\delta$ -lacton, effects of heat treatment and gelation temperature [J]. Journal of Texture Study. 1998, 29: 413-426
- [25] 金安儿,张月萍,郭素娟.高压下大豆蛋白凝胶化反应之探讨[J].中国农业化学会志,1994,32(3): 309-321
- [26] Chr Ian E Ciron, Vivian L Gee, Alan L Kelly, et al. Effect of microfluidization of heat-treated milk on rheology and sensory properties of reduced fat yoghurt [J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25:1470-1476
- [27] Skiver A, Holstborg J, Qvist K B. Relation between sensory texture analysis and rheological properties of stirred yogurt [J]. Journal of Dairy Research, 1999, 66(4), 609-618

- [28] Akhtar M, Stenzel J, Murray B S, et al. Factors affecting the perception of creaminess of oil-in-water emulsions [J]. Food Hydrocolloids, 2005, 19(3), 521-526
- [29] Sharma S K, Dalgleish D G. Effect of heat-treatments on the incorporation of milk serum-proteins into the fat globule-membrane of homogenized milk [J]. Journal of Dairy Research, 1994, 61(3), 375-384

现代食品科技