

DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033066

引用格式: 吴俊霞,程建明,薛峰. 枸杞大豆蛋白植物基酸奶理化性质研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(10): 193-198. WU Junxia, CHENG Jianming, XUE Feng. Physicochemical properties of plant-based yogurt prepared by wolfberry and soy protein [J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(10): 193-198.

# 枸杞大豆蛋白植物基酸奶理化性质研究

吴俊霞 程建明 薛峰\*

(南京中医药大学 药学院 江苏 南京 210023)

**摘要** 该文旨在以枸杞和大豆分离蛋白为原料制备植物基酸奶,探讨全蔗糖发酵、蔗糖和乳糖混合发酵对植物基酸奶外观、色度、发酵终点 pH 值、乳清析出率、持水性、微观结构、粒度、凝胶强度、流变学特性的影响,同时以枸杞和脱脂牛奶、全脂牛奶所制备的动物基酸奶为对照,以期为植物基酸奶的研究与开发提供理论基础。研究结果显示,添加枸杞的大豆蛋白植物基和动物基酸奶均能形成稳定的凝胶结构;枸杞大豆蛋白植物基酸奶的白度显著低于动物基酸奶;枸杞大豆蛋白植物基酸奶的持水性、凝胶强度、黏性、黏弹性均低于全脂动物基酸奶,但高于脱脂动物基酸奶。此外,采用蔗糖和乳糖混合发酵可以降低植物基酸奶发酵终点的 pH 值和乳清析出率,提高凝胶的黏弹性。

**关键词** 枸杞;大豆蛋白;植物基;酸奶;理化性质

传统的酸奶是以牛乳为原料,经过乳酸菌发酵而成的一种乳制品,也是最受欢迎的乳品之一。酸奶不仅具有独特的风味,还具有促进人体消化吸收和调节人体免疫力的功能<sup>[1]</sup>。然而,为了应对气候变化的威胁,同时保证世界人口不断增长形势下的可持续发展,市场对可替代动物蛋白的优良植物蛋白的需求越来越大,其中植物基食品作为乳制品的替代物已经成为一个快速发展的行业<sup>[2]</sup>。大豆蛋白是一种优良的植物蛋白,其富含人体所需的全部必需氨基酸,被认为可作为乳蛋白的替代品应用于植物基食品中。此外,大豆蛋白因具有优良的乳化性、凝胶特性和成膜特性,被广泛用于各类食品的加工<sup>[3]</sup>。目前,大豆蛋白已经被成功用于制备植物基酸奶,而且利用乳酸菌发酵还可以进一步改善大豆蛋白的生物利用率<sup>[4]</sup>。然而,单一功能的植物基产品已经无法满足消费者对于多元化健康的追求。此外,大豆蛋白植物基酸奶由于存在豆腥味的的问题,在市面上的接受度较差。而这些问题可以通过将大豆蛋白与其他功能性原料复配解决。枸杞是我国重要药食同源资源,不仅具有酸甜的口感和诱人的色泽,同时还具备滋补肝肾、益精明目、润肺等多种生理活性。因此,枸杞可以作为一种与大豆蛋白复配来制备植物基酸奶的功能性原料。然而,目前关于枸杞大豆蛋白植物基酸奶理化性质的研究未见报道。此外,关于植物基酸奶的研究主要集中在植物基酸奶

本身的性质,尚缺乏关于其与动物基酸奶之间的类比研究。因此,本文旨在以枸杞和大豆分离蛋白为原料,制备植物基酸奶,同时以脱脂牛奶、全脂牛奶为对照,探讨其在外观、色度、乳清析出率、持水性、微观结构、粒度、凝胶强度、流变学特性等方面的差异,以期为药食同源植物基酸奶的研发提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

大豆蛋白,山东禹王生物科技有限公司;枸杞子,宁夏明德中药饮片有限公司;酸奶发酵菌粉(保加利亚乳杆菌、嗜热链球菌、双歧杆菌、植物乳杆菌、干酪乳杆菌、唾液乳杆菌、乳酸乳球菌、肠膜明串珠菌、发酵乳杆菌、罗伊氏乳杆菌、鼠李糖乳杆菌、瑞士乳杆菌、约氏乳杆菌、嗜酸乳杆菌),青岛凯麦森食品科技有限公司;欧德堡超高温灭菌脱脂牛奶,欧德堡乳制品(上海)有限公司;雀巢全脂牛奶,雀巢(中国)有限公司;白砂糖,上海枫未实业有限公司;乳糖,优宝嘉食品旗舰店;赤藓糖醇,江苏鑫瑞生物科技有限公司;二甲亚砜(dimethyl sulfoxide, DMSO),国药集团化学试剂有限公司;异硫氰酸荧光素(fluorescein isothiocyanate, FITC),上海源叶生物科技有限公司。

### 1.2 仪器与设备

TD5002C 电子天平,天津天马衡基仪器有限公司

第一作者: 学士(薛峰副教授为通信作者, E-mail: xuefeng@njucm.edu.cn)

基金项目: 江苏省高等学校自然科学研究面上项目(20KJB550014); 南京中医药大学中药学一流学科开放课题(2020YLXK021)

收稿日期: 2022-07-22 改回日期: 2022-08-22

司; 68LSNJ 睿美全自动商用酸奶机, 佛山康天电器有限公司; SC-10 色差仪, 昆山托普电子仪器有限公司; PHS-3E pH 计, 上海仪电科学仪器股份有限公司; Z200A 离心机, 德国哈默公司; LS13320 激光粒度分析仪, 贝克曼库尔特商贸(中国)有限公司; DHR-1 旋转流变仪, 美国 TA 仪器公司; DM2500 荧光显微镜, 德国 Leica 公司; Rapid TA 质构仪, 上海腾拔仪器科技有限公司; MJ-BL25B2 搅拌机, 广东美的生活电器制造有限公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 酸奶的制备

本实验共制备 4 组样品, 其中 2 组为枸杞植物基酸奶[包括全蔗糖发酵组(SPS)、蔗糖/乳糖混合发酵组(SPSL)] 2 组为枸杞动物基酸奶[包括脱脂牛奶组(SMS)、全脂牛奶组(FMS)]。

枸杞植物基酸奶全蔗糖组、蔗糖/乳糖混合发酵组: 以大豆蛋白为原料, 加去离子水配制 50 g/L 蛋白溶液, 搅拌均匀后加入 16 g/L 枸杞剪切 90 s。沉淀 10 min 后过滤, 弃滤渣。滤液中分别添加 100 g/L 蔗糖, 50 g/L 蔗糖与 50 g/L 乳糖, 搅拌均匀。100 °C 下灭菌 20 min, 冷却至 30 ~ 40 °C 加 2 g/L 发酵剂。分装 43 °C 发酵 15 h。发酵结束置 4 °C 后熟 24 h。

枸杞动物基酸奶脱脂组、全脂组, 以脱脂牛奶/全脂牛奶为原料, 加入 16 g/L 枸杞剪切 90 s。沉淀 10 min 后过滤, 弃滤渣。滤液中添加 50 g/L 蔗糖。后续步骤同枸杞植物基酸奶制备流程。

#### 1.3.2 酸奶凝胶外观

所有酸奶凝胶样品于透明玻璃瓶中形成, 后熟结束后在同一光线下观察凝胶色泽、组织状态及乳清析出状态。

#### 1.3.3 色度的测定

用手持色差仪对酸奶样品进行色度的测定。酸奶凝胶样品置于光学透明的容器内。测定时, 保证测量口径距离酸奶凝胶表面的高度一致。记录  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值。 $L^*$  值增加(+)表明样品颜色偏亮, 反之偏暗。 $a^*$  值增加(+)表明样品颜色偏红, 反之偏绿。 $b^*$  值增加(+)表明样品颜色偏黄, 反之偏蓝。白度计算如公式(1)所示:

$$\text{白度} = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad (1)$$

#### 1.3.4 pH 值的测定

将酸奶凝胶均匀搅拌后使用 pH 计进行测量, 测试温度为 25 °C。测定周期为 21 d, 每 3 d 测 1 次。

#### 1.3.5 乳清析出率测定

酸奶罐装前, 分别称量发酵容器及其盖子质量, 记为  $m_0$ 。发酵后熟后, 称量发酵容器及其盖子与酸奶整体质量, 记为  $m_1$ 。弃去乳清, 对剩余再进行称量, 记为  $m_2$ 。酸奶乳清析出率如公式(2)所示:

$$\text{乳清析出率}/\% = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \times 100 \quad (2)$$

#### 1.3.6 凝胶持水力测定

采用离心法测定酸奶凝胶的持水力。取 15 g 酸奶凝胶离心(4 185 × g 25 min), 去上清液, 对沉淀称重, 计算如公式(3)所示:

$$\text{凝胶持水力}/\% = \frac{\text{离心沉淀物质量}}{\text{样品质量}} \times 100 \quad (3)$$

#### 1.3.7 凝胶微观结构

用 DMSO 配制 1 mg/mL FITC 荧光染料溶液, 并注意避光放置。使用荧光显微镜观察酸奶凝胶的微观结构。取微量凝胶于载玻片中央, 形成均匀凝胶薄层后, 滴加 5 μL 荧光染料, 在 40 倍物镜下观察。

#### 1.3.8 粒度的测定

将枸杞酸奶凝胶样品均匀搅拌后, 添加 300 μL 于粒度分析仪中进行测量。记录酸奶凝胶样品的粒径分布数据。

#### 1.3.9 凝胶强度的测定

使用质构仪测定酸奶凝胶强度。采用型号为 P/36R 的探头, 采用形变(压)模式, 并设定测定前探头、测定中探头、测定后探头速度为 1 mm/s, 设定力量感应元为 10 kg, 设定触发力为 8 N。记录各组酸奶凝胶的凝胶强度(N)。

#### 1.3.10 流变学特性的测定

使用流变仪测定酸奶凝胶的表观黏度、储能模量和损耗模量<sup>[5]</sup>。同时对酸奶进行蠕变恢复测试, 并使用 Burger 四要素模型来量化酸奶的黏弹性行为<sup>[6-7]</sup>, 其计算如公式(4)所示:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} [1 - \exp(-\frac{t}{t_2})] + \frac{\sigma}{\eta_1} t \quad (4)$$

式中:  $\sigma$  蠕变阶段的施加压力, Pa;  $E_1$  瞬时蠕变弹性系数, Pa;  $E_2$  延迟蠕变弹性系数, Pa;  $\eta_1$  黏性系数, Pa · s;  $t_2$  形变达到最大形变量时所耗蠕变时间, s。试验数据经过蠕变恢复公式拟合, 可得  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $\eta_1$ 、 $t_2$ 。

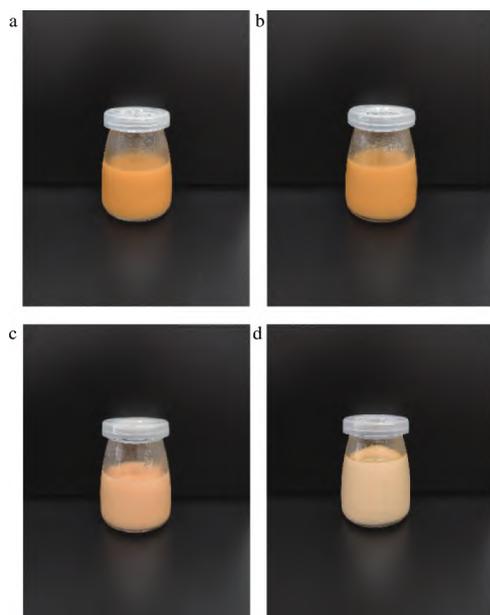
### 1.4 数据处理

采用 SPSS 26(IBM 美国)进行单因素方差分析(ANOVA)统计分析。在 95% 的置信区间, 采用 Duncan 检验比较不同处理之间的显著性差异。使用 Origin 2019 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 凝胶外观

如图1所示,枸杞酸奶凝胶表面光滑、致密,色泽均匀,色泽有差异。其中枸杞大豆蛋白植物基酸奶呈橘黄色。SMS组凝胶样品呈乳黄色,色泽亮。FMS组凝胶样品呈乳白偏鹅黄色,色泽最亮。所有酸奶样品组织均匀,无分层或沉淀现象。



a - 全蔗糖植物基发酵组; b - 蔗糖/乳糖混合植物基发酵组;  
c - 脱脂牛奶组发酵组; d - 全脂牛奶发酵组

图1 枸杞酸奶的凝胶外观

Fig.1 Appearance of wolfberry based-yogurts

### 2.2 酸奶的色度

原料枸杞本身含有多种天然色素,因此可以赋予酸奶特殊色泽<sup>[8]</sup>。如图2所示,枸杞动物基酸奶凝胶白度、亮度显著高于枸杞大豆蛋白植物基酸奶凝胶( $P < 0.05$ ),其中,FMS组白度、亮度显著高于SMS组,SPS组、SPSL组的白度、亮度较低,且样品之间无显著性差异( $P > 0.05$ )。这可能与原料本身的特性有关,一方面,所使用的全脂牛奶、脱脂牛奶为乳白色液体,其白度、亮度均高于微黄色的大豆蛋白溶液。另一方面,也可能与溶解的色素含量有关,类胡萝卜素为脂溶性色素,而大豆蛋白溶液本身不含有油脂,且具有良好的乳化性能,在剪切过程中可以极大程度地乳化包裹着枸杞色素的油脂。此外,全脂牛奶中的脂肪颗粒存在可能会加强光散射,从而提高了酸奶的亮度<sup>[9]</sup>。

### 2.3 pH值

在发酵过程中,碳水化合物被乳酸菌利用并转化

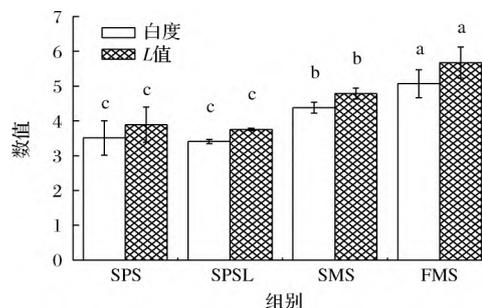


图2 枸杞酸奶的白度与亮度

Fig.2 Whiteness and brightness of wolfberry based-yogurts

注:不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ ) (下同)

为乳酸,导致pH降低,最终形成凝胶<sup>[10]</sup>。如图3所示,A组枸杞酸奶在发酵结束后的pH值为4.1~4.5,在0~21d的贮藏期内pH变动较小。4组枸杞酸奶中,植物基酸奶pH均高于动物基酸奶。而在植物基酸奶中,蔗糖与乳糖混合发酵的酸奶具有较低的pH值,这说明混合碳源发酵更有利于乳酸菌的生长。

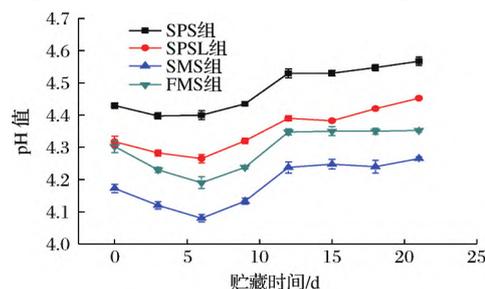


图3 枸杞酸奶在贮藏期内的pH值变化

Fig.3 The pH value changes of wolfberry based-yogurts during storage time

### 2.4 乳清析出率

乳清析出是发酵乳制品中常见的物理缺陷,与酸奶凝胶网络结构的稳定性有关<sup>[11-12]</sup>。通常情况下,凝胶结构的弱化,导致蛋白质分子发生重排,继而使得网络结构对水分的束缚能力下降,从而出现乳清在凝胶表面析出的现象<sup>[13]</sup>。如图4所示,4种酸奶的乳清析出率均较低,说明凝胶稳定性较好。其中,FMS组和SPSSL组呈现出较低的乳清析出率,前者与乳脂的存在有关,而后者则可能是因为混合碳源发酵有利于形成更加稳定的凝胶结构。

### 2.5 持水性

持水性是评价酸奶凝胶特性的重要指标之一,其与凝胶结构对水分的束缚能力有关,通常情况下持水力高说明凝胶结构较为致密和稳定<sup>[14]</sup>。如图5所示,FMS组酸奶的持水性显著高于其他组( $P < 0.05$ ),SPS组和SPSSL组之间无显著性差异( $P > 0.05$ ),

SMS 组酸奶的持水性最低。全脂动物基酸奶较高的持水性可能与其中所含的乳脂相关<sup>[15]</sup>。研究表明,在酸奶凝胶形成过程中,蛋白质可以通过包裹脂肪球颗粒,从而增加凝胶的表面积,提高凝胶对于水的束缚能力,最终导致更多的水分被截留<sup>[16-17]</sup>。

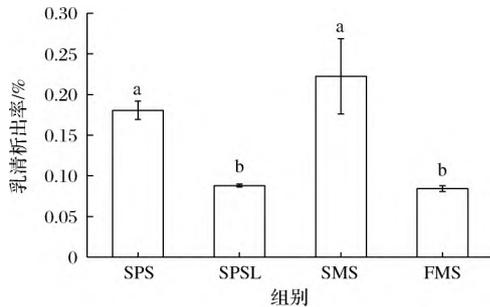


图4 枸杞酸奶的乳清析出率

Fig. 4 Syneresis of wolfberry based-yogurts

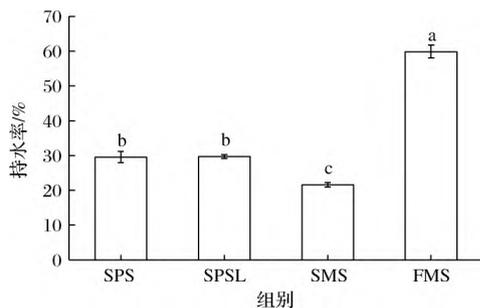


图5 枸杞酸奶的持水性

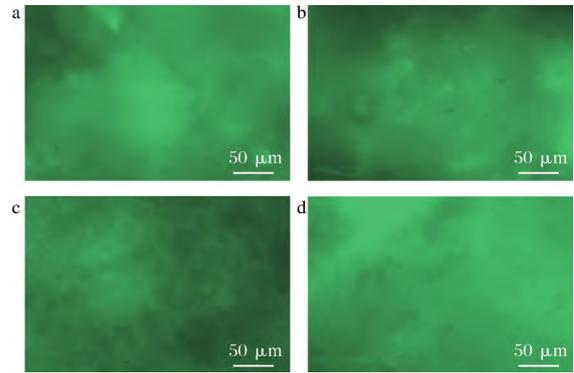
Fig. 5 Water holding capacity of wolfberry based-yogurts

## 2.6 微观结构

如图6所示,4组样品均能形成凝胶网络。其中FMS组凝胶最紧实致密,结构连续,质地均匀,这种致密的结构也使得FMS组具有较强的持水能力。SMS组样品凝胶较为稀薄,有间隙,结构不连续,质地不均匀。这可能是由于脱脂奶中脂肪含量低,凝胶结构中缺少脂肪球镶嵌,从而导致结构较为疏松。整体而言,植物基酸奶凝胶网络结构的致密程度不如FMS组,但却优于SMS组。

## 2.7 粒径分布

凝胶的粒径分布与产品的稳定性和口感相关,通常情况下,如果粒径分布越窄,粒径越小,则说明凝胶结构更为稳定,口感更加细腻<sup>[18-19]</sup>。如图7所示,4组枸杞酸奶粒径分布图均为单峰,且呈正态分布。与动物基酸奶相比较,植物基酸奶粒径分布的峰宽更窄,说明其凝胶体系更为稳定。而动物基酸奶的粒径小于植物基酸奶,说明其具有更加细腻的口感,这可能是由于大豆蛋白的分子质量高于乳蛋白。



a - 全蔗糖植物基发酵组; b - 蔗糖/乳糖混合植物基发酵组; c - 脱脂牛奶组发酵组; d - 全脂牛奶发酵组

图6 枸杞酸奶的微观结构

Fig. 6 Microstructure of wolfberry based-yogurts

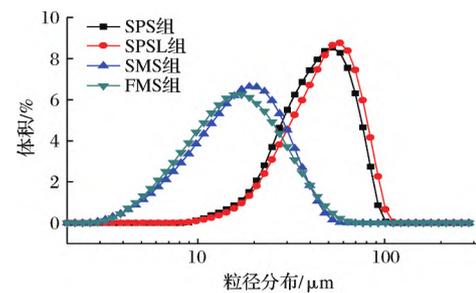


图7 枸杞酸奶的粒径分布

Fig. 7 Particle size distribution of wolfberry based-yogurts

## 2.8 凝胶强度

凝胶强度是评价酸奶质构特性的重要指标,其主要取决于参与凝胶形成的蛋白质浓度和蛋白质-蛋白质相互作用的强度<sup>[20]</sup>。如图8所示,植物基酸奶与动物基酸奶凝胶之间存在显著性差异( $P < 0.05$ ),其中FMS组呈现出最高的凝胶强度。这主要与脂肪所介导的凝胶内分子间相互作用力的增强有关<sup>[10,21]</sup>。此外,植物基酸奶组的凝胶强度大于SMS组,这可能与大豆蛋白较为优良的凝胶特性有关。

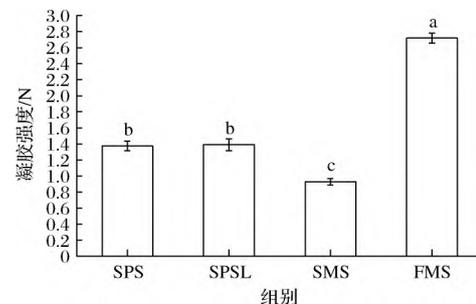


图8 枸杞酸奶的凝胶强度

Fig. 8 Gel strength of wolfberry based-yogurts

## 2.9 流变学特性

### 2.9.1 表观黏度

如图9所示,枸杞酸奶呈现出剪切稀化现象,说明枸杞酸奶均为假塑性流体<sup>[22]</sup>。FMS组的表观黏度最高,而SMS组的表观黏度最低。这可能与乳脂含量有关。研究表明,含有脂肪的凝胶体系往往表现出较高的表观黏度<sup>[23]</sup>。因为油滴可以在微米尺度上聚集,从而填充在蛋白凝胶网络结构中,继而改变凝胶的力学特性<sup>[24]</sup>。在植物基酸奶中,SPSL组的表观黏度高于SPS组,这可能是因为混合碳源发酵更利于乳酸菌的生长,从而诱导大豆蛋白之间形成更为稳定的凝胶体系。

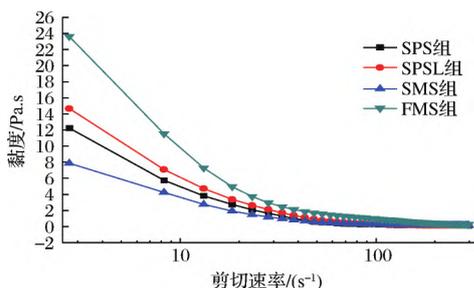


图9 剪切速率对枸杞酸奶黏度的影响

Fig. 9 Effect of shear rate on viscosity of wolfberry based-yogurts

### 2.9.2 储能模量和损耗模量

如图10、图11所示,枸杞酸奶的储能模量均高于损耗模量,说明酸奶凝胶均具有稳定的网络结构。其中FMS组拥有较高的储能模量,而SMS组则拥有较低的储能模量。这一结果再次证实了乳脂的存在可以强化乳蛋白凝胶网络结构。此外,在植物基酸奶中,SPSL组的储能模量高于SPS组,这同样说明了混合碳源发酵更加有利于大豆蛋白凝胶网络结构的形成。

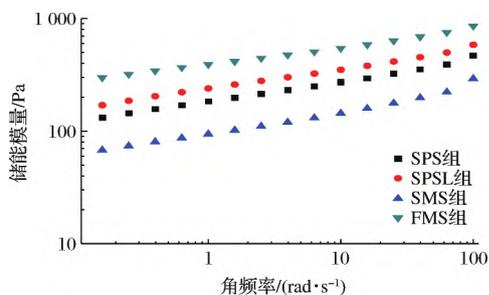


图10 角频率对枸杞酸奶储能模量的影响

Fig. 10 Effect of angular frequency on storage modulus of wolfberry based-yogurts

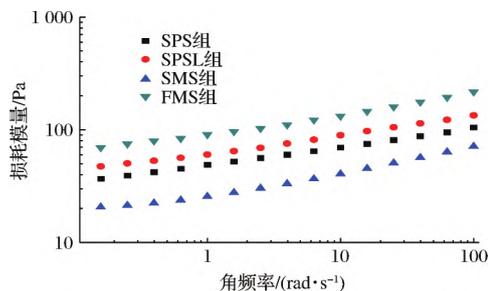


图11 角频率对枸杞酸奶损耗模量的影响

Fig. 11 Effect of angular frequency on loss modulus of wolfberry based-yogurts

### 2.9.3 蠕变恢复

图12为4组酸奶受到恒定外力时,所发生的形变量随时间的变化。对曲线进行拟合后,可以获得相应的参数(表1)。FMS组的 $\eta_1$ 最高,黏性最大,说明凝胶内部结构最牢固,SMS组的 $\eta_1$ 最低,黏性最小,凝胶内部结构最不牢固。FMS组表现出较高的 $t_2$ 值,说明全脂动物基酸奶凝胶具有较好的黏弹性。此外,FMS组还表现出较高的瞬时弹性系数和延迟弹性系数,这些结果均说明全脂动物基酸奶在动态黏弹特性方面均优于植物基酸奶和脱脂动物基酸奶。

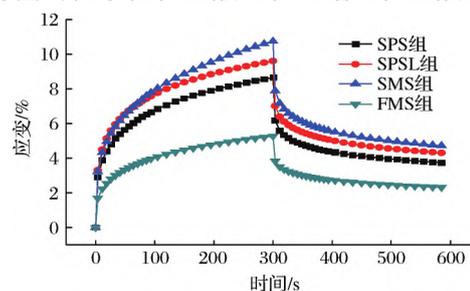


图12 枸杞酸奶的蠕变恢复曲线

Fig. 12 Creep recovery curves of wolfberry based-yogurts

表1 枸杞酸奶的Burger四要素模型参数

Table 1 Parameters of Burger four element model for wolfberry based-yogurts

样品	$E_1/\text{Pa}$	$E_2/\text{Pa}$	$\eta_1/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	$t_2/\text{s}$	$R^2$
SPS	$2.342 \pm 0.023^b$	$1.564 \pm 0.004^b$	$450.936 \pm 1.695^{d1}$	$19.862 \pm 0.254^c$	0.993 5
SPSL	$1.844 \pm 0.003^c$	$1.346 \pm 0.004^d$	$486.370 \pm 0.762^c$	$22.752 \pm 0.093^c$	0.992 3
SMS	$1.872 \pm 0.000^d$	$1.417 \pm 0.000^c$	$330.747 \pm 0.001^e$	$24.641 \pm 0.000^b$	0.996 1
FMS	$3.537 \pm 0.000^a$	$2.682 \pm 0.000^a$	$753.583 \pm 0.000^a$	$26.093 \pm 0.000^a$	0.996 9

注:不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )

## 3 结论

本文对枸杞大豆蛋白植物基酸奶与枸杞动物基酸奶的各项理化性质进行了比较研究。结果表明,利

用乳酸菌发酵可以诱导枸杞和大豆蛋白形成稳定的凝胶。与枸杞全脂动物基酸奶相比较,枸杞大豆蛋白植物基酸奶在发酵终点时具有较高的 pH 值、较深的色泽、较大的粒径以及较弱的动态黏弹特性。而采用蔗糖/乳糖混合发酵所获得的植物基酸奶,在持水性、凝胶强度以及动态黏弹特性方面均优于枸杞脱脂动物基酸奶。

## 参 考 文 献

- [1] BENMEZIANE F, RAIGAR R K, AYAT N E-H, et al. Lentil (*Lens culinaris*) flour addition to yogurt: Impact on physicochemical, microbiological and sensory attributes during refrigeration storage and microstructure changes [J]. *LWT*, 2021, 140: 110793.
- [2] SRIDHARAN S, MEINDERS M B J, BITTER J H, et al. Pea flour as stabilizer of oil-in-water emulsions: Protein purification unnecessary [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 101: 105533.
- [3] NISHINARI K, FANG Y, GUO S, et al. Soy proteins: A review on composition, aggregation and emulsification [J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 39: 301–318.
- [4] RUI X, ZHANG Q Q, HUANG J, et al. Does lactic fermentation influence soy yogurt protein digestibility: A comparative study between soymilk and soy yogurt at different pH [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(2): 861–867.
- [5] WANG W J, SHEN M Y, JIANG L, et al. Influence of *Mesona blumes* polysaccharide on the gel properties and microstructure of acid-induced soy protein isolate gels [J]. *Food Chemistry*, 2020, 313: 126125.
- [6] PANG Z H, BOUROUIS I, SUN M Y, et al. Physicochemical properties and microstructural behaviors of rice starch/soy proteins mixtures at different proportions [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 209: 2 061–2 069.
- [7] SHI A M, WANG L J, LI D, et al. Suspensions of vacuum-freeze dried starch nanoparticles: Influence of NaCl on their rheological properties [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 94(2): 782–790.
- [8] 胡文斌, 张少飞, 孙娜, 等. 枸杞开发利用研究进展 [J]. *园艺与种苗*, 2019, 39(10): 61–62.
- [9] HU W B, ZHANG S F, SUN N, et al. Research progress on exploitation and utilization of *Lycium chinense* mill [J]. *Horticulture and Seed*, 2019, 39(10): 61–62.
- [10] MCCLEMENTS D J, NEWMAN E, MCCLEMENTS I F. Plant-based milks: A review of the science underpinning their design, fabrication, and performance [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2019, 18(6): 2 047–2 067.
- [11] SODINI I, REMEUF F, HADDAD S, et al. The relative effect of milk base, starter, and process on yogurt texture: A review [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2004, 44(2): 113–137.
- [12] LUCEY J A. Formation and physical properties of milk protein gels [J]. *Journal of Dairy Science*, 2002, 85(2): 281–294.
- [13] LUCEY J A, MUNRO P A, SINGH H. Whey separation in acid skim milk gels made with glucono- $\delta$ -lactone: Effects of heat treatment and gelation temperature [J]. *Journal of Texture Studies*, 1998, 29(4): 413–426.
- [14] MIELE N A, CABISIDAN E K, BLAIOTTA G, et al. Rheological and sensory performance of a protein-based sweetener (MNEI), sucrose, and aspartame in yogurt [J]. *Journal of Dairy Science*, 2017, 100(12): 9 539–9 550.
- [15] 韩永佳. 功能型酸奶的理化特性、抗氧化活性及微观结构的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [16] Han Y J. Functional of yogurt on the physicochemical properties, antioxidant activity, and microstructure were studied [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.
- [17] FERRAGUT V, CRUZ N S, TRUJILLO A, 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.
- [18] SERRA M, TRUJILLO A J, QUEVEDO J M, et al. Acid coagulation properties and suitability for yogurt production of cows' milk treated by high-pressure homogenisation [J]. *International Dairy Journal*, 2007, 17(7): 782–790.
- [19] CRUZ N, CAPELLAS M, HERNÁNDEZ M, et al. Ultra high pressure homogenization of soymilk: Microbiological, physicochemical and microstructural characteristics [J]. *Food Research International*, 2007, 40(6): 725–732.
- [20] XU X G, ZHOU X S, ZENG J X. Determination of the influence of homogenizing conditions on the stability of buffalo milk by particle size analysis [J]. *China Dairy Industry*, 2009, 37(1): 42–44.
- [21] 刘翠平, 苏米亚, 杜凌. 粒径分析法研究影响乳清蛋白热稳定性的因素 [J]. *乳业科学与技术*, 2009, 32(6): 268–270.
- [22] LIU C P, SU M Y, DU L. Study of influencing factors on heat stability of whey proteins by particle size analysis [J]. *Journal of Dairy Science and Technology*, 2009, 32(6): 268–270.
- [23] NARINE S S, MARANGONI A G. Mechanical and structural model of fractal networks of fat crystals at low deformations [J]. *Physical Review E*, 1999, 60(6): 6 991–7 000.
- [24] 王微, 赵新淮. 发酵温度及超声波处理对凝固型酸奶质地等的影响 [J]. *中国乳品工业*, 2008, 36(12): 21–25.
- [25] WANG W, ZHAO X H. Influences of fermentation temperature and ultrasonic treatment on the texture of set-style yogurt [J]. *China Dairy Industry China*, 2008, 36(12): 21–25.
- [26] 赵红玲, 李全阳, 陈文贞. 羧甲基纤维素钠对搅拌型酸奶结构特性影响的初步研究 [J]. *乳业科学与技术*, 2009, 32(6): 282–284; 298.
- [27] ZHAO H L, LI Q Y, CHEN W Z. Preliminary research on the influence of CMC on the stirred yogurt [J]. *Journal of Dairy Science and Technology*, 2009, 32(6): 282–284; 298.
- [28] NIE Y Q, LIU Y F, JIANG J, et al. Rheological, structural, and water-immobilizing properties of mung bean protein-based fermentation-induced gels: Effect of pH-shifting and oil imbedment [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 129: 107607.
- [29] FUHRMANN P L, SALA G, STIEGER M, et al. Effect of oil droplet inhomogeneity at different length scales on mechanical and sensory properties of emulsion-filled gels: Length scale matters [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 101: 105462.

## Physicochemical properties of plant-based yogurt prepared by wolfberry and soy protein

WU Junxia, CHENG Jianming, XUE Feng\*

(School of Pharmacy, Nanjing University of Chinese Medicine, Nanjing 210023, China)

**ABSTRACT** The wolfberry and soy protein were used as raw materials to prepare plant-based yogurt in this study. The effects of sucrose and sucrose/lactose fermentation on the appearance, color, pH value, syneresis, water holding capacity, microstructure, particle size, gel strength, and rheological properties of yogurt were investigated. The comparative studies among plant-based yogurt, skim milk and whole milk-based yogurt were also performed, which could provide the theoretical basis for development of plant-based yogurt. The results showed that fermentation can induce the formation of gel in soy protein and milk incorporated with wolfberry. The whiteness, water holding capacity, gel strength, and viscoelastic properties in soy protein-based yogurt are lower than the whole milk-based yogurt, but better than that of skim milk-based yogurt. In addition, sucrose/lactose fermentation leads to the soy protein-based yogurt with lower pH value and syneresis and improvement in viscoelastic properties than those from sucrose fermentation.

**Key words** wolfberry; soy protein; plant-based; yogurt; physicochemical properties