

# 添加益生元对酸乳凝胶过程及微观结构的影响

王雅楠, 韩育梅\*, 何 君

(内蒙古农业大学食品科学与工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

**摘 要:** 为研究菊粉、低聚果糖和低聚半乳糖3种益生元对酸乳凝胶过程及微观结构的影响, 以未添加益生元的酸乳为对照, 利用光学微流变仪、Turbiscan稳定分析仪和扫描电子显微镜分别检测添加益生元酸乳在发酵期间及后熟贮藏期间流变学参数、稳定性和微观结构, 并进行对比研究。结果表明: 添加菊粉更有助于酸乳形成较为均匀、疏松的微观结构; 含低聚果糖的酸乳固液平衡值低于0.5, 更有利于增强酸乳的固体性质; 添加低聚半乳糖的酸乳微观稳定性较好。因此, 3种益生元对酸乳的凝胶过程及微观结构的影响各不相同, 未来还可对3种益生元进行复配处理, 添加到酸乳中进一步探究对其综合品质的影响。

**关键词:** 酸乳; 益生元; 凝胶过程; 微观结构

## Effect of Prebiotics Addition on Gelation Process and Microstructure of Yogurt

WANG Yanan, HAN Yumei\*, HE Jun

(College of Food Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

**Abstract:** This work studied the effects of three different prebiotics inulin, fructooligosaccharide and galactooligosaccharide on the gelation process and microstructure of yogurt. Yogurt without prebiotic was used as a blank control. An optical micro-rheometer, a Turbiscan stability analyzer and a scanning electron microscope were used to detect the rheological parameters, stability and microstructure of the yogurts with prebiotics during fermentation and storage, respectively. The results showed that in contrast to the other prebiotics, inulin incorporation to yogurt formed a more uniform and loose microstructure. The solid-liquid balance of the yogurt containing fructooligosaccharides was less than 0.5, indicating that fructooligosaccharides were more conducive to enhancing the solid nature of yogurt, while the yogurt containing galactooligosaccharide had better microscopic stability. Therefore, the three prebiotics had different effects on the gelation process and microstructure of yogurt. Still, further studies are needed to ascertain the synergistic effect of these prebiotics on the overall quality of yogurt.

**Keywords:** yogurt; prebiotics; gelation process; microstructure

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180723-277

中图分类号: TS252.42

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2019) 15-0100-06

引文格式:

王雅楠, 韩育梅, 何君. 添加益生元对酸乳凝胶过程及微观结构的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(15): 100-105.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180723-277. <http://www.spkx.net.cn>

WANG Yanan, HAN Yumei, HE Jun. Effect of prebiotics addition on gelation process and microstructure of yogurt[J].

Food Science, 2019, 40(15): 100-105. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180723-277.

<http://www.spkx.net.cn>

益生元是通过肠道内微生物的代谢作用和可选择性地刺激肠道内微生物的增殖或活力, 进而对宿主健康产生有益影响的非消化性成分<sup>[1-2]</sup>。益生元可根据组成、结构以及在酸乳中的应用分为低聚糖类和多糖类, 低聚果

糖和低聚半乳糖是低聚糖类益生元的代表, 而菊粉属于多糖类益生元<sup>[3]</sup>。菊粉和低聚果糖的结构均由葡萄糖和果糖构成, 由于结构单元之间是通过 $\beta$ -葡萄糖苷键相连, 因此人体摄入后不能被小肠消化吸收, 但在结肠内可被

收稿日期: 2018-07-23

基金项目: 内蒙古自治区科技计划资助项目 (201502094)

第一作者简介: 王雅楠 (1994—) (ORCID: 0000-0003-3466-3411), 女, 硕士研究生, 研究方向为农产品加工及贮藏工程。

E-mail: wyn0914@126.com

\*通信作者简介: 韩育梅 (1965—) (ORCID: 0000-0002-5871-7077), 女, 教授, 博士, 研究方向为农产品加工及贮藏工程。

E-mail: hanyumeim@sina.com

有益微生物分解利用从而对人体健康有益<sup>[4-5]</sup>。低聚半乳糖是一种寡糖类混合物,其具有较高的热稳定性和一定的抗消化性,同时可在结肠内被有益微生物有效吸收利用<sup>[6]</sup>。另外,它可在酸乳中对嗜酸乳杆菌、双歧杆菌等有益菌进行有效的增殖保护作用<sup>[3]</sup>。目前已有研究表明,菊粉、低聚果糖和低聚半乳糖等益生元对酸乳中的益生菌有一定的保护作用,从而通过延缓酸乳的后酸化现象和乳清析出等问题,改善酸乳品质<sup>[7-8]</sup>;还可被人体摄入产生益生元作用<sup>[9]</sup>。但这些研究多是从酸乳的黏度变化、乳清析出、活菌总数、感官评价等宏观静态方面来评价3种益生元在酸乳中的应用情况,因此从酸乳凝胶结构的形成变化、乳液环境中颗粒大小及结构的变化等微观动态角度进行研究分析具有重要意义<sup>[10]</sup>。Hemar等<sup>[11]</sup>利用扩散波光谱(diffusing-wave spectroscopy, DWS)方法与传统流变学方法对比测定酪蛋白凝胶时间以及发酵过程中凝胶结构形成的动态变化,对比研究2种方法所对应结果的差异性与统一性,从而得出DWS方法可有效监测发酵乳或奶酪的加工过程。杭锋等<sup>[12]</sup>利用Turbiscan多重光散射法研究超高温灭菌乳的稳定性,并采用稳定性动力学指数评价分析体系的稳定性。吕长鑫等<sup>[13]</sup>采用扫描电子显微镜和Turbiscan稳定分析仪结合分析紫苏酸性乳饮料乳化稳定性,将微观结构与稳定性进行关联分析。

本实验采用新的微观研究方法分析菊粉、低聚果糖和低聚半乳糖3种益生元对酸乳凝胶过程及微观结构的影响。主要通过无损害非接触式的多重扩散波光谱(multi-speckle diffusing wave spectroscopy, MS-DWS)微观黏度因子(micro viscosity indexes, MVI)、弹性因子(elasticity indexes, EI)和固液平衡(solid liquid balance, SLB)值作为流变学参数研究发酵过程中酸乳黏弹性等流变学特性,通过静态多重光散射(static multiple lightscattering, SMLS)研究酸乳凝胶形成过程中颗粒的变化情况,以及扫描电子显微镜观察酸乳的微观结构,从而揭示和评价菊粉、低聚果糖和低聚半乳糖对酸乳的作用效果和影响,对完善益生元等益生因子提高酸乳品质的工艺<sup>[14-15]</sup>具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

低聚果糖 上海源叶生物科技有限公司;菊粉 美国国民淀粉化学公司;低聚半乳糖 山东保龄宝生物科技有限公司;全脂乳粉 新西兰恒天然集团;酸乳直投式发酵剂YF-L812、双歧杆菌BB-12(活菌数约为 $6 \times 10^8$  CFU/g) 丹麦科汉森股份有限公司;其他均为国产试剂分析纯。

### 1.2 仪器与设备

Rheolaser Master型光学法微流变分析仪、TLAB

AGS型Turbiscan稳定性分析仪 法国Formulaction仪器公司;SX-500蒸汽灭菌器 日本TOMY公司;Pro型扫描电子显微镜 复纳科学仪器(上海)有限公司;PB-10型酸度计 德国赛多利斯仪器有限公司;超净工作台 苏州净化仪器有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 样品制备

根据GB 19302—2010《食品安全国家标准 发酵乳》,按照工艺“牛乳→标准化→加入添加剂→均质→加热杀菌→冷却→加入发酵剂与益生菌→恒温发酵→搅拌冷却→后熟→保藏”制备酸乳。添加剂分别为1.5 g/100 mL的菊粉、低聚果糖和低聚半乳糖。发酵剂选用YF-L812型酸乳直投式发酵剂(含德氏乳杆菌保加利亚亚种与嗜热链球菌),益生菌为双歧杆菌BB-12。发酵期(4.5 h)结束后,于4℃冰箱中保存至24 h<sup>[16]</sup>。

#### 1.3.2 益生元对酸乳凝胶形成微观结构的影响

参考Cui Bo<sup>[17]</sup>、Liu Juan<sup>[18]</sup>等方法,将后熟结束后贮藏1 d的酸乳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,然后进行扫描电子显微镜制片,最后在10 kV电压和放大5 000~6 000倍下观察和采集图像。

#### 1.3.3 益生元对酸乳凝胶形成过程中微流变学参数的影响

参考Titapiccolo等<sup>[19]</sup>的方法利用光学微流变仪检测酸乳发酵期(0~4.5 h)与后熟(4.5~24.0 h)后的凝胶体系稳定性。将20 mL发酵期样品小心转移至特制平底圆柱形带塞玻璃瓶中,注意勿沾染在玻璃瓶壁上以免影响光学信号偏差;再将玻璃瓶迅速转移至测定槽,于43℃下观测凝胶过程中的MVI、EI以及SLB值随时间的变化情况。每隔1 min采集1次数据。发酵结束后,将玻璃瓶取出放入冷藏箱,于4℃条件下冷藏后熟至24 h,再将样品放入测定槽中待样品恢复室温后继续采集数据,并根据仪器自带分析软件获取相关流变学参数,所有样品重复测定3次。

#### 1.3.4 益生元对酸乳凝胶体系稳定性的影响

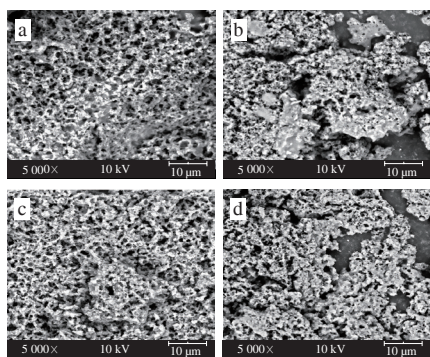
参考白洁<sup>[20]</sup>、吕长鑫<sup>[13]</sup>等方法,使用稳定性分析测试仪采用850 nm近红外光源监测探头检测酸乳发酵期(0~4.5 h)与后熟(4.5~24.0 h)后凝胶体系的稳定性。按照添加量分别制备含有1.5 g/100 mL菊粉、低聚果糖和低聚半乳糖的酸乳,将样品放入检测器内,检测器沿圆筒形样品管上下移动,每40 μm扫描1次获得透射光与反射光强度,每20 s扫描1次,管高度为40 mm,测定温度为43℃,所有样品重复测定3次。最终由稳定性分析仪获取的透射光强度变化(背散射光强度随时间的变化以及稳定性指数)判断凝胶体系稳定性。

## 1.4 数据处理

体系稳定性数据采用Turbiscan稳定分析仪自带的Turbiscan Easysoft软件进行分析；微流变数据采用Rheolaser Master型光学法微流变分析仪自带的Smart软件进行分析。所有图表均采用Origin 9.4软件进行绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 益生元对酸乳凝胶形成微观结构的影响



a.空白组酸乳；b~d.分别为含有低聚果糖、菊粉、低聚半乳糖的酸乳。图5同。扫描电子显微镜图像放大倍数为5 000 倍。

图1 酸乳凝胶结构的扫描电子显微镜图

Fig. 1 Scanning electron micrographs of yogurts

酸乳微观结构主要是由酪蛋白聚集形成的三维网状结构所构成。由图1可知，酪蛋白胶粒聚集形成的球状结构清晰可见，胶粒之间存在丝状物，这些丝状物包含胞外多糖等大分子物质，此外酪蛋白胶粒之间的间隔处也通常由乳清与微生物菌体填充<sup>[21]</sup>。由于本实验样品前处理过程中采用真空冷冻干燥，推测乳酸菌菌体可能因爆裂而无法看见，网状结构中会留下较多乳清液，因此其结构区别于其他溶剂干燥法所得产品中有一定的乳酸菌菌体存在于明显的网状空隙结构中<sup>[18,22]</sup>。

空白组与含有菊粉、低聚果糖和低聚半乳糖的酸乳微观结构存在明显区别。空白组酸乳的微观网状结构中，酪蛋白胶粒之间呈现出大小不一的空隙，但整个酪蛋白网状结构铺满观察视野。以空白组酸乳微观结构为对照，发现含有低聚果糖的酸乳微观网状结构形态较为紧密，其中酪蛋白胶粒之间的间隙较小，并且大小不一，同时存在较多网状结构大小不一的碎块，可能是酪蛋白在形成胶粒的过程中受到了不均匀的外力所致。此外，图1中还发现表面光滑的白色块状物，部分与酪蛋白胶粒表现出一定程度的附着关系，可能是低聚果糖聚合物。含低聚半乳糖的酸乳微观结构呈现出由不均匀致密小块聚合而成的较为松散的结构，而含有菊粉的酸乳微观结构更为平整，且网状结构之间的间隙相比空白组酸

乳更为均匀。比较菊粉、低聚果糖和低聚半乳糖三者对酸乳微观结构的影响发现，菊粉使酸乳的微观结构更为完整，酪蛋白胶粒之间的间隙更大。因此，菊粉、低聚果糖和低聚半乳糖3种益生元对酸乳凝胶形成的微观结构影响不同，菊粉更有助于酸乳形成较为均匀、疏松的微观结构。

### 2.2 益生元对酸乳凝胶形成过程中微流变学参数的影响

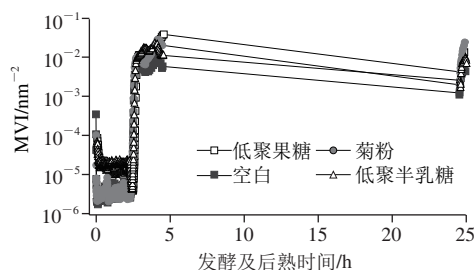


图2 发酵及后熟期间酸乳的MVI

Fig. 2 Micro viscosity index of yogurts during fermentation and ripening

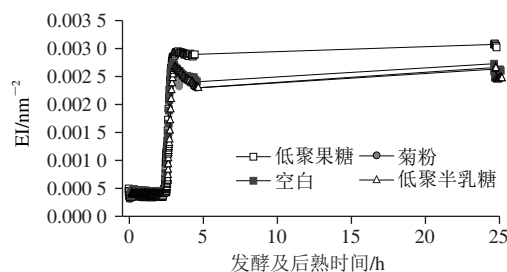


图3 发酵及后熟期间酸乳的EI

Fig. 3 Elasticity index of yogurts during fermentation and ripening

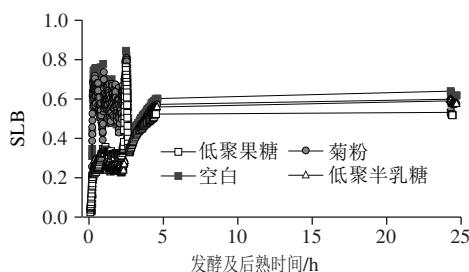


图4 发酵及后熟期间酸乳的SLB值

Fig. 4 Solid-liquid balance values of yogurts during fermentation and ripening

由图2~4可知，所有样品的MVI、EI和SLB值变化趋势相同，但不同样品在发酵及后熟期间不同时间段的MVI、EI和SLB值也不同。

酸乳的加工过程包括发酵和后熟（通常为贮藏期）两部分，且凝胶结构形成于发酵阶段，而后熟期间也会伴随着弹性与流变学状态的变化。微流变主要根据乳液环境中微粒的运动与体积状态分析其流变学性质。随着



发酵的进行环境中的酸度逐渐降低,使得乳液中原有的聚集体发生改变,酪蛋白颗粒聚集形成彼此间有空隙的结构,进而最终形成以酪蛋白胶粒为基础的凝胶结构<sup>[23-24]</sup>。Titapiccolo等<sup>[19]</sup>的研究表明,均质牛乳酸凝胶形成初期的主要驱动力为酪蛋白胶束;在酸乳环境中,金属盐离子、乳酸菌代谢产物或添加剂等也会与酸度共同作用影响蛋白质凝胶的形成,酸乳凝胶的形成是乳中生物作用和物理作用的共同结果。MVI作为时间的函数可以直接反映黏性模量,即损耗模量在一定时间内的变化形成,其可以显示酸乳黏度的变化<sup>[25-26]</sup>。由图2可知,菊粉、低聚果糖和低聚半乳糖及空白对照组酸乳的发酵是一个多级过程,发酵前2 h各样品黏度无明显变化,被称为低黏度的初始停滞阶段;发酵2 h后,样品黏度呈迅速上升趋势,酪蛋白胶粒解离,乳液中凝胶开始形成,从而进入黏度快速变化阶段;之后,各酸乳样品MVI迅速增加至最大值,进入高黏度阶段<sup>[24]</sup>。高黏度阶段使整个酸乳形成较为稳定的凝胶体系。其中菊粉酸乳和空白样品的黏度在小范围降低后又迅速回升,可能是因为形成的凝胶结构不稳定。最终样品MVI的大小关系为低聚果糖酸乳>低聚半乳糖酸乳>菊粉酸乳>空白酸乳。

EI作为时间的函数可以直接反应弹性模量,即储能模量在一定时间内的变化形成<sup>[25-26]</sup>。由图3可知,所有酸乳样品的EI在发酵0~2.5 h内保持稳定,因为乳液中的酪蛋白尚未形成凝胶结构,但在此期间MVI和SLB值处于较大程度的波动状态,且含有低聚果糖酸乳的弹性最高。当发酵2.5 h时,所有样品的EI变化均出现拐点,即凝胶点,也是乳液体系开始凝胶的时间节点,并且时间较为接近,进一步验证说明与空白样相比益生元对酸乳凝胶的速率影响不大,一般而言酸乳的凝乳速率主要受温度以及发酵剂菌种的影响。最终也是低聚果糖的EI最大。

SLB值与产品黏弹性对应成正比,直接表现了产品偏向固态或者液态的与时间对应的函数关系。由图4可见,酸乳的SLB值变化范围在0~0.5之间,表现出弹性模量,偏向于固态;若在0.5~1.0之间则表现出黏性模量,偏向于液态<sup>[25-26]</sup>。因此,整个发酵及贮藏期间含有低聚果糖的酸乳表现出较强的固体性质。

### 2.3 益生元对酸乳凝胶体系稳定性的影响

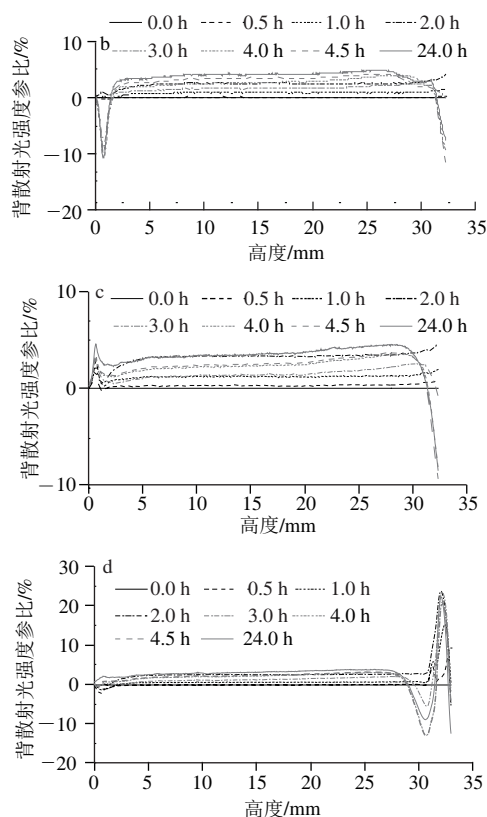
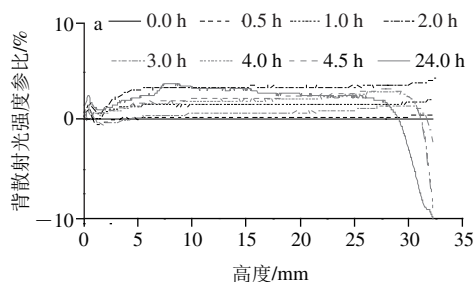


图5 发酵及后熟期间不同酸乳样品的背散射光强度  
Fig. 5 Back scattering light intensity of different yogurt samples during fermentation and ripening

由图5可知,不同酸乳样品在各时间段内背散射光强度相对于0 h(发酵起始阶段)的对应样品高度的变化情况。其中,参比值变大代表着对样品高度的微粒吸收光强度变大且颗粒变大,反之则代表着吸收光强度变小且颗粒变小,背散射光强度参比变化越大说明体系越不稳定,正峰与负峰分别表示微粒出现较大幅度地聚集或分散,这种沉淀或者澄清与肉眼观察的沉淀与澄清不同,因为图5中反映的是微观粒子的变化情况,并且在宏观上可能反映不明<sup>[12,26]</sup>。

在空白样品中,背散射光强度曲线反映的是典型酸乳加工过程中微粒聚散的变化,样品底部出现小范围的正峰,表示底部有较小程度的沉淀出现;样品中间部位背散射光强度参比平行增加,这反映了酪蛋白一类大分子物质较为均匀地聚合,粒径变大,形成较为稳定的凝胶网状结构的过程;而样品顶部的负峰则表示顶部澄清现象,即出现了乳清析出<sup>[13]</sup>。通过背散射光强度参比与时间的关系发现,所有样品在后熟后出现不同程度的顶部澄清现象,这可能与后酸化和冷冻使得凝胶网状结构压缩以及蛋白质和淀粉等大分子物质持水力下降有关<sup>[27]</sup>。

含有菊粉的酸乳与空白样品的背光散射光强度参比的变化较为相似,而含有低聚果糖酸乳的中间部位背散射光强度参比变化程度较大,说明相对于空白样品而

言,其形成的凝胶网络结构中的微粒粒径较大,结合图1发现,低聚果糖使酸乳凝胶网状结构更为紧密,并且对应的酪蛋白胶粒的粒径也较大,因此低聚果糖在一定程度上也会对蛋白质的粒径产生影响。另外,含有低聚半乳糖酸乳出现比空白样品更大程度的顶部澄清,中间段的背散射光强度参比变化较为均匀,且平行变化的幅度与空白样品较为相似,但是在顶端出现了较大程度的澄清和聚集现象,表明顶端乳清析出与脂肪上浮情况较严重。在含有菊粉酸乳的背散射光强度曲线中可以发现,酸乳底部沉淀现象较弱,而顶部澄清现象较为突出。含有低聚果糖的酸乳中,底部也出现一定程度的澄清,这在一般酸乳中比较少见,且肉眼也未观察到,可能是由于该仪器所测定的微观沉淀和澄清与肉眼所观察到的不一样。

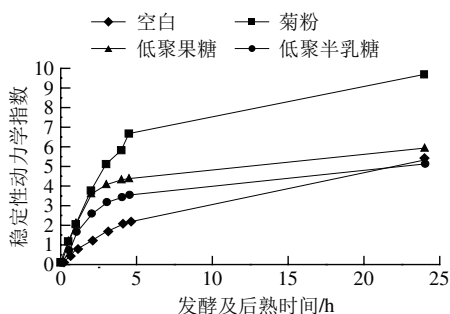


图6 发酵及后熟期间不同酸乳样品的稳定性动力学指数

Fig. 6 Stability kinetic index of different yogurt samples during fermentation and ripening

稳定性动力学指数根据样品的背散射光强度参比得出,反映样品中稳定性的变化程度,其值越大表明稳定性越差<sup>[13]</sup>。由图6可知,含有菊粉和低聚果糖酸乳的微观稳定性低于空白样品,可能是这2种菊粉型低聚糖对乳液中蛋白质的解离和聚集造成的不良影响引起了体系紊乱。但是具体的稳定性情况还需要结合宏观测定来综合评定。而含有低聚半乳糖的酸乳在发酵期的微观稳定性低于空白样品,但后熟后其微观稳定性较空白酸乳好。综上,后熟期结束时,含有菊粉的酸乳的稳定性最差,低聚果糖、低聚半乳糖和空白样品的稳定性较为接近,且添加低聚半乳糖的酸乳稳定性较好。

### 3 讨论

菊粉、低聚果糖和低聚半乳糖3种益生元均对酸乳的凝胶结构有一定的影响。扫描电子显微镜观察到的酸乳微观结构表明,与空白样品相比,菊粉使酸乳的微观结构更为完整,酪蛋白胶粒之间间隙增大,有助于酸乳形成均匀、疏松的微观结构。Consolate等<sup>[28]</sup>研究发现添加菊粉浓缩酸乳的微观结构较均匀、疏松且开放度较

高,酪蛋白胶束相连成链状,空隙数目较多且大小不一,推测可能是因为菊粉分子与水结合增加了连续相的黏度。在发酵期内,3种益生元对酸乳凝胶形成过程中微流变学参数变化存在影响。添加低聚果糖酸乳的MVI、EI最大,SLB值最小,低聚果糖使酸乳形成较为稳定的凝胶体系,且呈现出较强的固体性质,因此说明含有低聚果糖酸乳的结构特性较好。还有学者通过研究添加菊粉和龙舌兰果聚糖对减脂搅拌型酸乳的流变性和微观结构的影响,发现菊粉在酪蛋白胶束聚集之间形成二级凝胶结构,而果聚糖倾向于将自身沉积在酪蛋白胶束的表面<sup>[29]</sup>。

根据样品的背散射光强度参比反映样品稳定性的变化程度发现,含有菊粉和低聚果糖的酸乳微观稳定性小于空白样品,而含有低聚半乳糖的酸乳在发酵期的微观稳定性小于空白样品,但后熟后其微观稳定性较空白样品好。因此,含有低聚半乳糖酸乳的微观稳定性要优于含有菊粉和低聚果糖的酸乳。添加3种益生元酸乳的结构特性各有不同,未来还可研究分析3种益生元复配对酸乳凝胶过程和微观结构的影响,从而得出最优添加量。由于本实验这些新的微观研究方法在酸乳中应用还不常见,需要不断探索以更清楚地了解菊粉、低聚果糖和低聚半乳糖对酸乳微观结构的影响,为进一步拓宽它们的应用提供依据。

### 参考文献:

- [1] BINDELS L B, DEL ZENNE N M, CANI P D, et al. Towards a more comprehensive concept for prebiotics[J]. *Nature Reviews Gastroenterology and Hepatology*, 2015, 12(5): 303-310. DOI:10.1038/nrgastro.2015.47.
- [2] GIBSON G R, RASTALL R A. *Prebiotics: development & application*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012: 24-76.
- [3] 何君, 韩育梅, 刘敏, 等. 益生元在发酵乳中的应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(8): 379-383. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2017.08.065.
- [4] 殷洪, 林学进. 菊粉、低聚果糖的研究进展[J]. *中国食品添加剂*, 2008, 14(3): 97-101. DOI:10.3969/j.issn.1006-2513.2008.03.018.
- [5] 张泽生, 张丽, 吕晓玲, 等. 菊粉低聚果糖与蔗糖低聚果糖对双歧杆菌体外增殖的研究[J]. *中国食品添加剂*, 2016, 22(1): 76-80. DOI:10.3969/j.issn.1006-2513.2016.01.006.
- [6] 孙常文, 周清涛, 王超, 等. 低聚半乳糖概述及其功能效果原理分析[J]. *山东食品发酵*, 2015, 21(3): 53-56.
- [7] MOHAMMADI R, MORTAZAVIAN A M. Review article: technological aspects of prebiotics in probiotic fermented milks[J]. *Food Reviews International*, 2011, 27(2): 192-212. DOI:10.1080/87559129.2010.535235.
- [8] 虞姣姣, 马亚芳, 温德兰, 等. 不同质量浓度低聚果糖和低聚半乳糖对发酵乳品质的影响[J]. *食品科学*, 2015, 36(7): 66-70. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201507013.
- [9] BURITI F C A, BEDANI R, SAAD S M I. *Probiotic and prebiotic dairy desserts*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016: 345-356.
- [10] 司俊玲, 郑坚强. 低聚果糖酸乳的研究[J]. *食品工业科技*, 2008, 25(9): 222-223; 248. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2008.09.049.

- [11] HEMAR Y, SINGH H, HORNE D S. Determination of early stages of rennet-induced aggregation of casein micelles by diffusing wave spectroscopy and rheological measurements[J]. *Current Applied Physics*, 2004, 4(2/3/4): 362-365. DOI:10.1016/j.cap.2003.11.049.
- [12] 杭锋, 艾连中, 郭本恒, 等. 多重光散射技术在乳体系稳定性分析中应用[J]. *中国乳品工业*, 2012, 40(10): 36-41. DOI:10.3969/j.issn.1001-2230.2012.10.010.
- [13] 吕长鑫, 李萌萌, 徐晓明, 等. 利用Turbiscan稳定性分析仪检测紫苏酸性乳饮料乳化的稳定性[J]. *中国食品学报*, 2014, 14(4): 239-245. DOI:10.16429/j.1009-7848.2014.04.006.
- [14] 芦鑫, 程永强, 李里特. 研究蛋白质凝聚凝胶的技术进展[J]. *中国粮油学报*, 2010, 25(1): 132-137; 142.
- [15] ZHAO L, ZHANG S, ULUKO H, et al. Effect of ultrasound pretreatment on rennet-induced coagulation properties of goat's milk[J]. *Food Chemistry*, 2014, 165(12): 167-174. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.05.081.
- [16] 卫生部. 食品安全国家标准 发酵乳: GB 19302—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 1-3.
- [17] CUI Bo, LU Yanmin, TAN Congping, et al. Effect of cross-linked acetylated starch content on the structure and stability of set yoghurt[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 35(3): 576-582. DOI:10.1016/j.foodhyd.2013.07.018.
- [18] LIU Juan, LUO Denglin, LI Xuan, et al. Effects of inulin on the structure and emulsifying properties of protein components in dough[J]. *Food Chemistry*, 2016, 210(11): 235-241. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.04.001.
- [19] TITAPICCOLO G I, CORREDIG M, ALEXANDER M. Acid coagulation behavior of homogenized milk: effect of interacting and non-interacting droplets observed by rheology and diffusing wave spectroscopy[J]. *Dairy Science & Technology*, 2011, 91(2): 185-201. DOI:10.1007/s13594-011-0010-0.
- [20] 白洁, 彭义交, 李玉美, 等. 基于Turbiscan稳定性分析仪技术研究微细化处理在燕麦豆乳中的应用[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(13): 108-112. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2015.13.014.
- [21] 郭本恒, 刘振民. 发酵乳[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016: 79-86.
- [22] LAZARIDOU A. Structure development and acidification kinetics in fermented milk containing oat  $\beta$ -glucan, a yogurt culture and a probiotic strain[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 39(1): 204-214. DOI:10.1016/j.foodhyd.2014.01.015.
- [23] PANG Z, DEETH H, PRAKASH S, et al. Development of rheological and sensory properties of combinations of milk proteins and gelling polysaccharides as potential gelatin replacements in the manufacture of stirred acid milk gels and yogurt[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 169(5): 27-37. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2015.08.007.
- [24] 泰米迈 A V, 罗宾逊 R K. 酸乳科学与技术[M]. 姜茂竹, 译. 2版. 北京: 中国农业出版社, 2003: 64-67.
- [25] 吕瑞鹤. 典型食品乳液体系的微流变学研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2017: 18-27.
- [26] ROHART A, MICHON C, CONFAC J, et al. Evaluation of ready-to-use SMLS and DWS devices to study acid-induced milk gel changes and syneresis[J]. *Dairy Science & Technology*, 2016, 96(4): 459-475. DOI:10.1007/s13594-016-0281-6.
- [27] MORELL P. Yogurts with an increased protein content and physically modified starch: rheological, structural, oral digestion and sensory properties related to enhanced satiating capacity[J]. *Food Research International*, 2015, 70(4): 64-73. DOI:10.1016/j.foodres.2015.01.024.
- [28] CONSOLATE N, 江波, RIMA K. 菊粉对Labneh浓缩酸乳微观结构和质构的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2005(4): 6-9. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2005.04.002.
- [29] CRISPIN-ISIDROA G, LOBATO-CALLEROSB C, ESPINOSA-ANDREWS H, et al. Effect of inulin and agave fructans addition on the rheological, microstructural and sensory properties of reduced-fat stirred yogurt[J]. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 2015, 62(1): 438-444. DOI:10.1016/j.lwt.2014.06.042.