

胞外多糖对无蛋蛋糕面糊及烘焙特性的影响

Effects of exopolysaccharide on batter and baking characteristics of eggless cake

张逢温¹陈 诚¹张宾乐¹曹伟超¹ZHANG Feng-wen¹ CHEN Cheng¹ ZHANG Bin-le¹ CAO Wei-chao¹王 凤²陈军民²黄卫宁¹小川晃弘³WANG Feng² CHEN Jun-min² HUANG Wei-ning¹ AKIHIRO Ogawa³

(1. 江南大学食品科学与技术国家重点实验室, 江苏 无锡 214122; 2. 无锡麦吉贝可生物食品有限公司, 江苏 无锡 214131; 3. 三菱化学食品株式会社, 日本 东京 1008251)

(1. State Key School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. MagiBake International Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214131, China;

3. Mitsubishi Chemical Foods Co., Ltd., Tokyo 1008251, Japan)

摘要:探究了乳酸菌产胞外多糖对搅打过程中复合蛋白起泡性、表面疏水性和液相蛋白含量的影响,并将乳酸菌发酵技术应用于无蛋蛋糕制作中,评估其对无蛋蛋糕面糊流变、烘焙特性和蛋糕芯微观结构的影响。结果表明:乳酸菌产胞外多糖能显著提高搅打过程中复合蛋白的起泡性质,增加蛋白表面疏水性及通过减少乳化剂的竞争吸附而维持界面蛋白含量。在面糊体系中,产胞外多糖乳酸菌发酵面糊气泡数量增加且分布更均匀,降低了面糊密度。相比于对照组,含胞外多糖的无蛋蛋糕比容增加了12.3%,硬度降低了43.0%,烘焙品质明显改善。蛋糕芯微观结构表明,蛋白质的降解以及胞外多糖的交联作用使得蛋白网络更加连续且均匀,改善了蛋糕芯结构。因此,乳酸菌产胞外多糖对无蛋蛋糕面糊特性和烘焙品质具有显著的改善作用($P < 0.05$)。

关键词: 胞外多糖; 蛋白性质; 无蛋蛋糕; 微结构; 烘焙特性

Abstract: In this paper, the effects of exopolysaccharide (EPS) produced by lactic acid bacteria (LAB) on the foaming, surface hydrophobicity and liquid protein content of complex proteins during whipping were studied. LAB fermentation technology was

applied in the production of eggless cakes and its effect on batter rheological, baking characteristic and crumb microstructure of eggless cake were evaluated. The results showed that the EPS produced by LAB significantly improved the foaming properties, increased surface hydrophobicity of complex protein and maintained the interface protein content by reducing competitive adsorption of emulsifiers during whipping. The number of bubbles increased and their distribution was more uniform in the fermented batter containing EPS produced by LAB, resulting in decrease in the batter density. Compared with the control, baking quality of the eggless cake containing EPS was significantly improved. Specific volume increased by 12.3% and the hardness decreased by 43.0%. The microstructure observation of eggless cake crumb could be concluded that protein degradation and cross-linking of EPS with protein resulted in a more continuous and uniform protein network so that the crumb structure of cake was improved. Therefore, the exopolysaccharide produced by lactic acid bacteria had a significant improvement effect on batter characteristics and baking quality of eggless cake.

Keywords: exopolysaccharide; protein properties; eggless cake; microstructure; baking characteristic

基金项目:“十三五”国家重大专项(编号:2016YFD0400500);国家自然科学基金(编号:31071595,31571877);比利时国际合作项目(编号:BE110021000)

作者简介:张逢温,男,江南大学在读硕士研究生。

通信作者:黄卫宁(1963—),男,江南大学教授,博士。

E-mail: wnhuang@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2019-11-11

烘焙食品是全世界的主流食品^[1],其中蛋糕类产品是最受欢迎的烘焙食品之一。鸡蛋作为蛋糕的主要成分,具有多种功能,包括起泡、乳化、赋予色泽和风味^[2]。然而,鸡蛋是最常见的过敏源^[3],高胆固醇以及高昂的价格和市场价格波动^[4]使生产商或研究者更加积极地寻求鸡蛋替代品。其中以大豆蛋白和牛乳蛋白为代表的双蛋

白兼顾动、植物蛋白双重营养优势,可以全面地改善人体机能,促进人类健康^[5]。同时这两种蛋白质因其优良的功能特性已广泛应用于食品工业^[6-7],并将这两种蛋白作为鸡蛋替代品应用于蛋糕体系中^[8-9]。

酸面团发酵技术可改善产品比容质构,提高营养价值及赋予特殊风味^[10-11],其影响程度与乳酸菌发酵过程中产生有机酸、酶和胞外多糖(exopolysaccharide, EPS)^[12-13]有关。胞外多糖在食品加工中可作为增稠剂、乳化剂以及冷冻保护剂等。汤晓娟^[14]研究发现 EPS 可减少冰晶形成、保护面筋网络结构从而提高冷冻面团品质;庄靓等^[15]筛选出具有乳化活性的胞外多糖的乳酸菌,并应用于荞麦面包中,发现 EPS 可增大面包比容和改善质构。然而乳酸菌产胞外多糖在面糊和蛋糕体系中的应用尚未见报道。

试验拟在大豆分离蛋白和乳清浓缩蛋白按一定比例复配替代全蛋制作蛋糕的基础上,将乳酸菌发酵技术应用于蛋糕制作中,探究胞外多糖在搅打过程中对蛋白质性质的影响,旨在评估胞外多糖对无蛋糕面糊特性和烘焙品质的影响,为烘焙食品加工工业化应用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料及试剂

绵白糖、大豆油:市售;

低筋小麦粉:美玫牌,粗蛋白含量 8.2%,香港面粉有限公司;

大豆分离蛋白(SPI):粗蛋白含量 90%,山东御馨豆业蛋白有限公司;

乳清浓缩蛋白(WPC):粗蛋白含量 80%,山东亿宝莱生物技术有限公司;

融合魏斯氏菌:分离自酒曲;

蔗糖酯型乳化剂:RTOYO 菱友 MFC(简称 MFC),三菱化学食品株式会社;

双效泡打粉:广州焙乐道食品有限公司;

MRS 肉汤培养基:杭州百思生物技术有限公司;

BCA 试剂盒:碧云天生物技术有限公司;

异硫氰酸酯(FITC)、罗丹明 B:阿拉丁生化科技股份有限公司;

无水乙醇、三氯乙酸、溴酚蓝等:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

搅拌机:5K5SS 型,美国厨宝 Kitchen Aid 公司;

烤箱:SM-503 型,新麦机械(无锡)有限公司;

冷冻切片机:CM1950 型,德国徕卡公司;

质构分析仪:Brookfield CT3 型,美国博勒飞公司;

高速匀浆机:FSH-2 型,丹瑞仪器设备有限公司;

数字旋转黏度计:NDJ-5S 型,上海微川精密仪器有限公司;

荧光倒置显微镜:Zeiss Axio Vert. A1 型,德国卡尔·蔡司公司;

激光共聚焦显微镜:LSM170 型,德国卡尔·蔡司公司;

恒温恒湿培养箱:APX-150C 型,上海博迅集团有限公司。

1.3 方法

1.3.1 产 EPS 乳酸菌发酵小麦粉的制备 在 -80 ℃ 冰箱中取出产 EPS 乳酸菌菌株,菌株来源为实验室前期筛选的融合魏斯氏菌^[13,16],在 MRS 液体培养基中活化两次,7 000 r/min 离心 10 min,取菌泥。将菌泥加入到等质量的小麦粉和无菌水中搅拌均匀,于 30 ℃ 培养箱中培养 24 h,即得到乳酸菌发酵小麦粉。为了促进发酵粉中 EPS 的生成,在 EPS 阳性组中用蔗糖按质量比替代 10% 的小麦粉,以不添加蔗糖的发酵粉为阴性组。

1.3.2 胞外多糖的提取 参照 Ketabi 等^[17]的方法,修改如下:取 10 g 发酵小麦粉,加入 20 mL 去离子水稀释,4 ℃ 振荡 1 h 后离心(10 000×g,20 min,4 ℃)。取上清液与 80% 三氯乙酸混合至浓度为 4%,4 ℃ 静置过夜。离心(10 000×g,20 min,4 ℃)去沉淀,加入 3 倍体积 95% 乙醇至上清液中。4 ℃ 静置 12 h 后再次离心(10 000×g,20 min,4 ℃)收集沉淀。用去离子水溶解沉淀,4 ℃ 透析(8 000~14 000 Da)48 h,每隔 8 h 换一次水,冷冻干燥。

1.3.3 蛋白溶液起泡能力和泡沫稳定性的测定 用 pH 7.0 缓冲液配制含有 0.5% MFC、浓度为 1% 的复合蛋白液(SPI 和 WPC 质量比 3:2),添加 0.5 mg/mL 胞外多糖至蛋白溶液中(EPS+),以未添加胞外多糖为对照(EPS-),室温下磁力搅拌 2 h 使其充分溶解。取 80 mL 溶液用高速匀浆机以 10 000 r/min 搅打 0.0~2.5 min,立即倒入量筒记录体积,静置 10 min 后再次记录溶液体积。分别按式(1)、(2)计算起泡能力和泡沫稳定性^[18]。

$$FC = \frac{V_1}{V_0} \times 100\%, \quad (1)$$

$$FS = \frac{V_2}{V_1} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

FC——起泡能力,%;

FS——泡沫稳定性,%;

V_0 ——搅打前蛋白溶液体积,mL;

V_1 ——搅打后蛋白溶液体积,mL;

V_2 ——静置后蛋白溶液体积,mL。

1.3.4 液相蛋白表面疏水性的测定 分别取 1.3.3 中配制的含与不含胞外多糖的蛋白液,用高速匀浆机以 10 000 r/min 分别搅打 0.0~2.5 min,然后用 20 mmol/L

pH 6.0 的磷酸盐缓冲液将液相蛋白稀释至浓度为 5 mg/mL。根据 Ilham 等^[19]的方法,按式(3)计算溴酚蓝结合量。

$$B=200\times\frac{A_0-A_1}{A_0}, \tag{3}$$

式中:

B ——溴酚蓝结合量, μg ;

200——换算因子, μg ;

A_0 ——空白吸光值;

A_1 ——样品吸光值。

1.3.5 液相蛋白含量的测定 取 1.3.3 中配制的含与不含胞外多糖的蛋白液,加入大豆油使油相体积为 20%。持续搅拌至两相混合均匀,然后用高速匀浆机以 10 000 r/min 搅打 0.0~2.5 min 制备乳液。取一定量乳液以 10 000 r/min 离心 40 min,用 BCA 试剂盒测定下清

液中蛋白含量^[20]。界面蛋白含量为体系总蛋白含量与液相蛋白含量的差值。

1.3.6 无蛋蛋糕面糊的制备及烘烤 无蛋蛋糕面糊配方如表 1 所示,分别用 EPS 阳性组(EPS+30)和 EPS 阴性组(EPS-30)发酵小麦粉替代 30% 的小麦粉(基于小麦粉的质量),额外的加水量需扣除发酵小麦粉的含水量。复合蛋白粉中 SPI 和 WPC 质量比为 3:2。在搅拌锅中称取绵白糖、复合蛋白粉、蛋糕油和水以 2 档 1 min 混合均匀,添加大豆油继续 2 档 1 min 混匀,添加发酵小麦粉以及过筛的低筋粉和双效泡打粉,手动轻微翻搅以避免搅打时粉末扬起,以 2 档 1 min 混匀,然后以 6 档 3 min 搅打起泡,形成面糊。称取 150 g 面糊于模具中,置于上火 190 $^{\circ}\text{C}$,下火 180 $^{\circ}\text{C}$ 的烤箱中烘烤 25 min。烘烤结束后脱模,室温下冷却 60 min。

表 1 无蛋蛋糕面糊配方

Table 1 Batter formulations of eggless cake

g

配料	小麦粉	发酵小麦粉	复合蛋白粉	水	绵白糖	MFC	大豆油	泡打粉
对照组	200	0	24	216	200	10	20	2
EPS-30 组	200	120	24	156	200	10	20	2
EPS+30 组	200	120	24	156	200	10	20	2

1.3.7 面糊密度的测定 参照贾春利等^[21]的方法。

1.3.8 面糊黏度的测定 参照王家宝等^[22]的方法。

1.3.9 面糊微观气泡结构观察 参照汤晓娟等^[23]的方法。

1.3.10 无蛋蛋糕比容的测定 采用油菜籽置换法测定蛋糕比容,分别测定蛋糕的质量和体积,按式(4)计算蛋糕比容,试验重复 3 次。

$$SV=\frac{V}{m}, \tag{4}$$

式中:

SV ——无蛋蛋糕比容, cm^3/g ;

V ——无蛋蛋糕体积, cm^3 ;

m ——无蛋蛋糕质量, g 。

1.3.11 无蛋蛋糕质构分析 将冷却后的蛋糕切成高 12 mm,直径 20 mm 的薄片。参照王家宝等的方法测定^[24]。

1.3.12 蛋糕芯微观结构观察 用刀片切成适当大小的蛋糕芯,用包埋剂覆盖在托盘上,然后立即置于-80 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中冷冻 1 h,用冰冻切片机在-20 $^{\circ}\text{C}$ 下切割成 30 μm 切片,将其吸附于载玻片上。根据 Wang 等^[25]的方法,修改如下:用 1:1(体积比)混合的异硫氰酸酯(FITC, 3.5×10^{-4} g/mL)和罗丹明 B(1.3×10^{-5} g/mL)染料对淀粉和蛋白质染色 1 min,用去离子水洗去多余染液,盖上盖玻片,采用激光共聚焦扫描显微镜进行观察。

1.3.13 数据分析 采用 Excel 2013 和 Origin 8.5 软件进行数据处理及图表绘制,通过 SPSS 16.0 软件进行显著性和方差分析(ANOVA),显著性水平为 $P<0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 胞外多糖对搅打过程中复合蛋白液起泡性质的影响

由图 1 可知,蛋白起泡过程分为两个阶段:0~1 min 搅打时间内为快速起泡阶段,之后为起泡速率变缓阶段,与王宁等^[26]研究搅打时间对蛋清蛋白起泡能力的变化趋势一致。相比于 EPS-,搅打过程中胞外多糖的添加有助于增加复合蛋白的起泡容量和起泡速率。Deep 等^[27]研

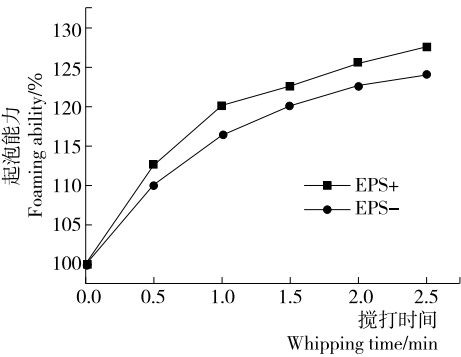


图 1 胞外多糖对搅打过程中复合蛋白起泡能力的影响
Figure 1 Effect of EPS on the foaming ability of complex proteins during whipping

究也发现胞外多糖可与乳清蛋白发生强或弱的相互作用,从而提高乳清蛋白的功能性质,包括溶解性、起泡性等。

由图 2 可知,泡沫稳定性随搅打时间的增加先快速降低后保持稳定。泡沫作为气液组成的分散体系,具有极大的表面自由能,在热力学上属于不稳定体系,容易通过泡沫液体的排出和气体的扩散而使泡沫破裂,稳定性下降^[28]。胞外多糖的添加显著减缓蛋白泡沫稳定性下降的速率,且在整个搅打过程中比 EPS-拥有更高的稳定性,是因为胞外多糖作为大分子能够增加液相的黏度,调节液相间的网络结构,减少泡沫表面液体的排出,从而提高泡沫体系的稳定性^[29]。

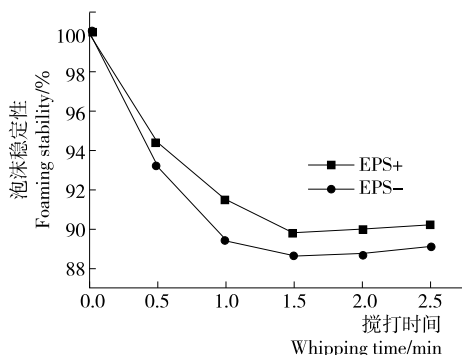


图 2 胞外多糖对搅打过程中复合蛋白泡沫稳定性的影响

Figure 2 Effect of EPS on the foaming stability of complex protein during whipping

2.2 胞外多糖对搅打过程中液相蛋白表面疏水性的影响

由图 3 可知,液相蛋白 BPB 结合量在 0~1 min 内迅速下降,之后缓慢降低。蛋白溶液在搅打初期由于剪切力的作用使蛋白质多肽链展开,更多的蛋白质暴露内部疏水基团而快速吸附至气液界面形成泡沫,以至于液相中蛋白疏水性快速降低^[30];继续搅打蛋白质逐渐均匀地

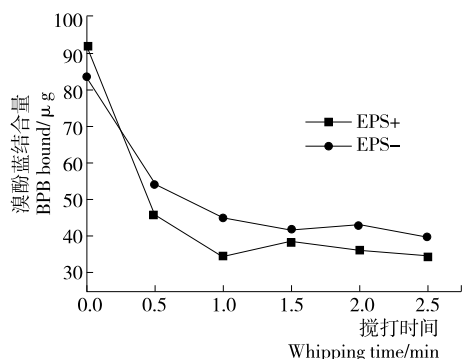


图 3 胞外多糖对搅打过程中液相蛋白表面疏水性的影响

Figure 3 Effect of EPS on the surface hydrophobicity of liquid protein during whipping

包裹气泡形成稳定结构,使得疏水性变化放缓,与复合蛋白起泡能力测定结果一致。未搅打时, EPS+ 溶液 BPB 结合量为 91.9 μg ,而 EPS- 溶液的为 83.5 μg ,表明 EPS+ 具有更高的表面疏水性,说明胞外多糖与蛋白质之间存在氢键或静电等非共价相互作用,使得蛋白的分子结构发生改变从而暴露出更多的疏水区域。EPS+ 在未搅打时具有更高的疏水性,有利于蛋白质更迅速地吸附至气液界面并展开,从而加强复合蛋白的起泡能力。

2.3 胞外多糖对搅打过程中液相蛋白含量的影响

由图 4 可知,液相蛋白含量随搅打时间的增加先降低后升高。初始阶段液相蛋白含量降低是因为蛋白的起泡作用使其吸附至气液界面,从而导致液相蛋白含量减少;而后液相蛋白含量增加是因为小分子乳化剂能够与界面蛋白产生竞争吸附作用,使得界面上的蛋白被解吸下来从而导致液相蛋白含量增加,与赵强忠^[31]研究结果一致。Goff 等^[32]运用显微镜观察和界面流变手段对乳化剂取代界面蛋白机制进行解释,在乳化剂取代界面蛋白初始阶段,乳化剂吸附至界面上使得蛋白网络被压缩,蛋白膜厚度增加而界面蛋白未被取代,随后乳化剂对界面蛋白的压力进一步增大直至崩溃,使得蛋白质从界面上解吸下来。

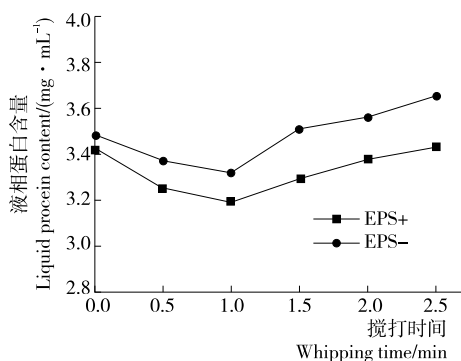


图 4 胞外多糖对搅打过程中液相蛋白含量的影响

Figure 4 Effect of EPS on liquid protein content during whipping

进一步观察发现,搅打初期 EPS+ 比 EPS- 具有更低的界面蛋白含量,说明更多的蛋白质吸附至气液界面形成气泡,表明搅打初期 EPS+ 下清液蛋白表面疏水性降低得更快。随着搅打时间的增加, EPS+ 中界面蛋白的解吸速率也更加缓慢。Dickinson 等^[33]发现多糖分子可以吸附至多个蛋白质表面而交联成桥,因此胞外多糖可能与界面蛋白产生交联作用,使得蛋白质受到多糖分子的保护而减少乳化剂对蛋白质的竞争吸附,从而提高界面膜的厚度和黏弹性,进一步解释了 EPS+ 溶液具有更高的泡沫稳定性。

2.4 胞外多糖对无蛋糕面糊特性的影响

由表 2 可知,相比于对照组,经过乳酸菌发酵小麦粉

制作的面糊具有更低的比重,其中 EPS+30 组比重降低得更为显著($P<0.05$),是因为 EPS+30 组含有乳酸菌产的胞外多糖,可以增加蛋白起泡能力及稳定气泡,使得充入面糊的空气量上升,同时也能更好地使气泡稳定在面糊内。添加发酵小麦粉的面糊黏度增加,而含 EPS 的面糊黏度进一步增加。Llewellyn 等^[34]研究表明面糊的充气量与其黏度呈正相关,而 EPS 作为可溶于水的大分子多糖,其碳链的亲水基团可以阻碍水分子的流动性,增加体系的黏稠度。更高的面糊黏度有助于延缓气泡液膜排液的速度,抑制不稳定气泡的聚结和歧化,提升乳化体系的稳定性,并改善烘烤时面糊的膨胀与定型情况。

表 2 乳酸菌产胞外多糖对无蛋蛋糕面糊特性的影响[†]

Table 2 Effect of EPS produced by LAB on the batter characteristics of eggless cake

组别	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	黏度/($\text{mPa} \cdot \text{s}$)
对照组	0.823 ± 0.003^c	$37\ 207 \pm 353^a$
EPS-30 组	0.779 ± 0.001^b	$38\ 497 \pm 132^b$
EPS+30 组	0.766 ± 0.002^a	$39\ 379 \pm 154^c$

† 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

2.5 胞外多糖对面糊微观结构的影响

由图 5 可知,乳酸菌发酵小麦粉制作的面糊气泡数量增多,气泡平均直径减小,而 EPS+30 组气泡分布更均匀,充气量进一步提高,与比重的测定结果一致。对照组异常气泡数量最多,而含有 EPS 面糊几乎没有异常气泡,可能是 EPS 具有稳定气泡的能力以及增大面糊体系黏度。异常气泡直径较大,是导致乳化体系不稳定的关键因素^[22]。

2.6 胞外多糖对无蛋蛋糕烘焙品质的影响

由表 3 可知,相比于对照组,EPS-30 组蛋糕比容增加

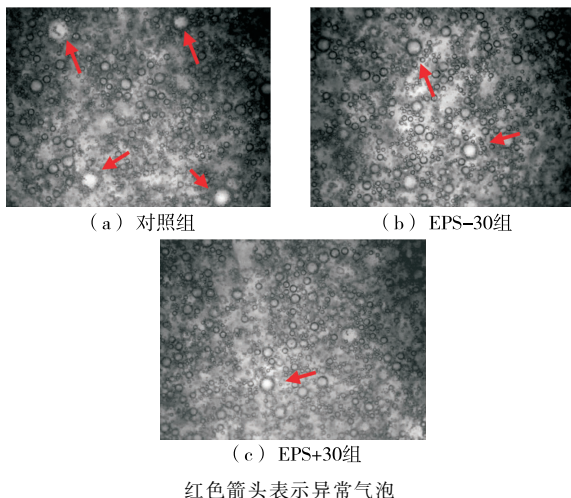


图 5 无蛋蛋糕面糊微观结构图

Figure 5 Microstructure of eggless cake batter (100 $\times$)

了 9.7%,而 EPS+30 组蛋糕比容提升了 12.3%,比容越高的蛋糕会形成更柔软的质构,而更高的充气量和气体保留率使得面糊在烘烤阶段充分膨胀,从而增大比容。此外,EPS 可与气泡界面上蛋白质交联而提高气泡膜的强度,使得气泡在烘烤和出炉时能更好地抵抗温度和水蒸汽带来的压力变化,减少结构收缩甚至崩塌^[35]。添加乳酸菌发酵粉的蛋糕硬度降低了 37.5%,而含 EPS 的发酵小麦粉蛋糕组硬度降低得更加显著($P<0.05$),下降了 43.0%,蛋糕硬度越低说明蛋糕口感更加柔软。Lillford 等^[36]研究表明蛋糕的质构特征取决于面糊乳液和泡沫体系形成的固体泡沫的结构,而这种结构与面糊体系维持乳液稳定及加热时泡沫抗压力变形的能力有关。Wildersjans 等^[37]研究表明蛋白聚集程度影响蛋糕弹性,乳酸菌发酵小麦粉的添加使得蛋糕弹性降低,可能是发酵粉中激活的内源蛋白酶有利于蛋白质降解,而胞外多糖的添加有助于改善弹性的劣变。咀嚼性能反映食物在口中咀嚼所需的能量,与蛋糕品质呈负相关,其变化趋势与硬度一致。

表 3 乳酸菌产胞外多糖对无蛋蛋糕烘焙品质的影响[†]

Table 3 Effect of EPS produced by LAB on baking quality of eggless cakes

组别	比容/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	硬度/ g	弹性/ mm	咀嚼性/ mJ
对照组	2.27 ± 0.02^a	395 ± 16^c	3.81 ± 0.05^b	8.7 ± 0.5^c
EPS-30 组	2.49 ± 0.02^b	247 ± 9^b	3.33 ± 0.17^a	4.7 ± 0.6^b
EPS+30 组	2.55 ± 0.01^c	225 ± 12^a	3.45 ± 0.21^a	3.9 ± 0.2^a

† 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

2.7 蛋糕芯微观结构观察

由图 6 可知,蛋白网络呈现较为松散的片状排布,存在较明显的球状蛋白。含有胞外多糖的蛋糕中呈现出条状的蛋白束结构且分布更加均匀,蛋白质与多糖大分子发生氢键或非氢键结合,使较为松散的蛋白网络更加紧密和连续。鸡蛋制作的蛋糕中,具有低变性温度和大量巯基基团的鸡蛋蛋白容易与面筋蛋白形成连续的蛋白网络结构^[38];而无蛋蛋糕中,复合蛋白与面筋蛋白更低的交联度使得蛋白网络不连续,并且由于大豆蛋白、乳清蛋白和麦醇溶蛋白中的大分子球蛋白具有较高的变性温度,蛋糕中仍保持较完整的球状结构^[38]。经过乳酸菌发酵,在酸解以及内源蛋白酶的作用下,大分子蛋白降解为更小蛋白或多肽,并且暴露出更多的活性基团,从而加强了蛋白网络的形成。Ashwini 等^[39]研究发现多糖和乳化剂组合使得无蛋蛋糕中的蛋白质基质更加连续且均匀。连续且均匀的蛋白网络是形成蛋糕良好质构的基础并且能有效防止蛋糕收缩和变形^[40]。

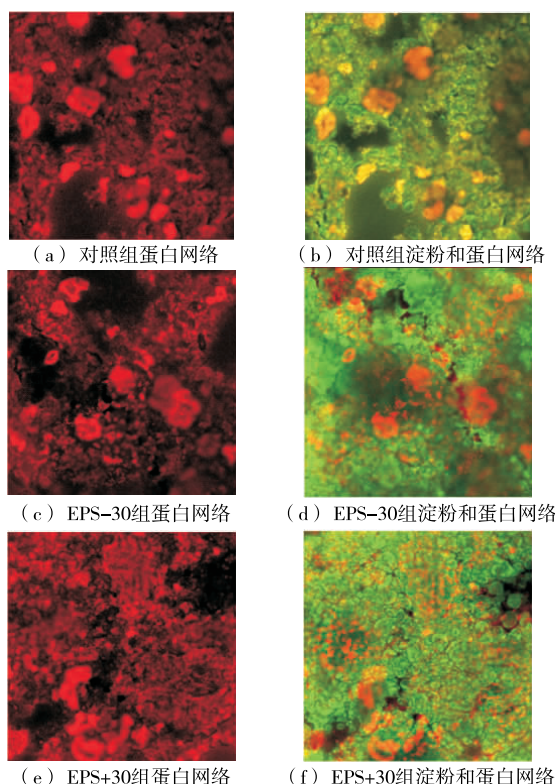


图6 无蛋糕芯激光共聚焦微观结构图

Figure 6 Laser confocal microstructure of eggless cake crumb (100X)

3 结论

研究表明,乳酸菌产胞外多糖对复合蛋白性质以及无蛋糕面糊特性和烘焙品质有积极影响。搅打过程中,胞外多糖通过提高复合蛋白表面疏水性和降低乳化剂的竞争吸附从而显著提高复合蛋白的起泡能力和泡沫稳定性($P<0.05$)。面糊体系中,产胞外多糖乳酸菌发酵能显著增加面糊气泡数量($P<0.05$),使气泡分布更均匀,从而降低面糊密度,增加面糊黏度。相比对照组, EPS+30 组比容增加了 12.3%,硬度降低了 43.0%,烘焙品质显著改善($P<0.05$)。蛋糕芯显微结构观察发现,蛋白质的降解以及胞外多糖的交联作用使得蛋白网络更加连续且均匀,从而改善蛋糕芯结构。综上,乳酸菌产胞外多糖在无蛋糕体系中具有有良好的应用效果,能显著改善无蛋糕的烘焙品质($P<0.05$)。乳酸菌产胞外多糖具有不同类型,试验并未涉及胞外多糖类型对无蛋糕品质的影响,有待进一步探究。

参考文献

- [1] JIA Chun-li, HUANG Wei-ning, LIN Ji, et al. Improvement of hydrocolloid characteristics added to angel food cake by modifying the thermal and physical properties of frozen batter[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 41(20): 227-232.
- [2] LIN Mu-yang, TAY S H, YANG Hong-shun, et al. Development of eggless cakes suitable for lacto-vegetarians using isolated pea proteins[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 69(3): 440-449.
- [3] 李凯文, 邵洁. 鸡蛋过敏原与婴幼儿鸡蛋过敏的研究进展[J]. 临床儿科杂志, 2011, 29(4): 386-389.
- [4] AROZARENA I I, BERTHOLO H, EMPIS J, et al. Study of the total replacement of egg by white lupine protein, emulsifiers and xanthan gum in yellow cakes[J]. European Food Research & Technology, 2001, 213(4/5): 312-316.
- [5] 任广旭, 伊素芹, 卢林纲, 等. “牛乳与大豆”双蛋白运动营养功能的研究进展[J]. 中国食品学报, 2015, 15(6): 154-161.
- [6] 冯昌友, 陈建霞. 大豆蛋白及其在食品工业中的应用[J]. 食品与机械, 2000, 16(2): 21-22.
- [7] 余丹丹, 张昊, 郭慧媛, 等. 乳清蛋白的特性及其在食品工业中的应用[J]. 中国乳业, 2013, 33(6): 58-60.
- [8] SHAO Yi-yuan, LIN Kuan-hung, CHEN Yung-hsin. Batter and product quality of eggless cakes made of different types of flours and gums[J]. Journal of Food Processing & Preservation, 2015, 39(6): 2 959-2 968.
- [9] 宋臻善, 郭桦, 周雪松. 浓缩乳清蛋白替代全蛋液对海绵蛋糕品质的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(24): 165-167.
- [10] 钟京, 王凤, 刘娜, 等. 乳酸菌发酵麸皮面团对高纤维面包面团流变发酵学及烘焙特性的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(9): 49-54.
- [11] 刘娜, 程晓燕, 孙银凤, 等. GC-MS 分析传统酸面团馒头风味及添加食用碱对其风味的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(16): 76-81.
- [12] TANG Xiao-juan, LIU Ruo-shi, HUANG Wei-ning, et al. Impact of in situ formed exopolysaccharides on dough performance and quality of Chinese steamed bread[J]. LWT, 2018, 96(6): 519-525.
- [13] 吴玉新, 陈佳芳, 马子琳, 等. 乳酸菌发酵米粉酸面团生化特性及其对馒头蒸制特性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(4): 1-12.
- [14] 汤晓娟. 产胞外多糖酸面团发酵及其冷冻面团抗冻机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019: 3-4.
- [15] 庄靓, 张宾乐, 马子琳, 等. 产乳活性多糖乳酸菌的筛选及其发酵荞麦酸面团、面包的特性[J]. 食品工业科技, 2019, 40(13): 71-77.
- [16] 陈佳芳, 汤晓娟, 蒋慧, 等. 不同高产胞外多糖乳酸菌发酵荞麦酸面团对面筋网络结构和面包烘焙特性的影响

- 响[J]. 食品科学, 2018, 39(6): 1-6.
- [17] KETABI A, SOLEIMANIAN Z S, KADIVAR M, et al. Production of microbial exopolysaccharides in the sourdough and its effects on the rheological properties of dough[J]. Food Research International, 2008, 41(10): 948-951.
- [18] 谭慧. 高压处理对大豆分离蛋白-多糖体系功能特性及结构影响研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015: 11-12.
- [19] ILHAM C, PHILIPPE G, VERONIQUE S L. Technical note: A simplified procedure for myofibril hydrophobicity determination[J]. Meat Science, 2006, 74(4): 681-683.
- [20] 叶小敏, 田颂九, 李慧义, 等. BCA 法定测定猪肺表面活性物质及其冻干粉中的表面活性蛋白质[J]. 中国药品标准, 2007, 8(1): 28-31.
- [21] 贾春利, 汤晓娟, 黄卫宁, 等. 羧甲基纤维素改善冷冻蛋糕体系热力学与烘焙特性研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(16): 327-331.
- [22] 王家宝, 陈诚, 王凤, 等. 搅拌时间和乳化剂对海绵蛋糕表面气泡的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(10): 8-13.
- [23] 汤晓娟, 王凤, 贾春利, 等. 含 Olestra 低脂休闲蛋糕体系的流变学、微结构与烘焙特性[J]. 食品科学, 2013, 34(1): 1-7.
- [24] 王家宝, 陈诚, 王凤, 等. 含丙二醇酯低脂蛋糕的流变学、气泡微结构和烘焙特性研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(5): 1-7.
- [25] WANG Xiang-yu, GUO Xiao-na, ZHU Ke-xue. Polymerization of wheat gluten and the changes of glutenin macropolymer (GMP) during the production of Chinese steamed bread [J]. Food Chemistry, 2016, 201(5): 275-283.
- [26] 王宁, 郑泽慧, 滕月斐, 等. 亲水胶体对鸡蛋清起泡性的影响[J]. 食品科技, 2012, 23(2): 273-277.
- [27] DEEP G, HASSAN A N, METZGER L. Exopolysaccharides modify functional properties of whey protein concentrate[J]. Journal of Dairy Science, 2012, 95(11): 6 332-6 338.
- [28] 赵晓东. 泡沫稳定性综述[J]. 钻井液与完井液, 1992, 9(1): 7-14.
- [29] SETA L, BALDINO N, GABRIELE D, et al. The effect of surfactant type on the rheology of ovalbumin layers at the air/water and oil/water interfaces[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 29(2): 247-257.
- [30] 李里特. 焙烤食品工艺学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2010: 55-56.
- [31] 赵强忠. 搅打稀奶油的搅打性能和品质的变化规律及其机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2006: 15-16.
- [32] GOFF H D. Colloidal aspects of ice cream: A review[J]. International Dairy Journal, 1997, 7(6/7): 363-373.
- [33] DICKINSON E. Protein-polysaccharide interactions in food colloids[J]. Food Colloids & Polymers, 2005, 10(8): 77-93.
- [34] LLEWELLIN E W, MADER H M, WILSON S D R. The rheology of a bubbly liquid[J]. Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences, 2002, 458(2 020): 987-1 016.
- [35] WILDERJANS E, LUYTS A, BRIJS K, et al. Ingredient functionality in batter type cake making[J]. Trends in Food Science & Technology, 2013, 30(1): 6-15.
- [36] LILLFORD P, JUDGE F. Edible food foams and sponges[J]. Food Colloids, 1989, 5(2): 1-14.
- [37] WILDERJANS E, PAREYT B, GOESAERT H, et al. The role of gluten in a pound cake system: A model approach based on gluten-starch blends[J]. Food Chemistry, 2008, 110(4): 909-915.
- [38] LAMBRECHT M A, DELEU L J, ROMBOUTS I, et al. Heat-induced network formation between proteins of different sources in model systems, wheat-based noodles and pound cakes [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 79(6): 352-370.
- [39] ASHWINI A, JYOTSNA R, INDRANI D. Effect of hydrocolloids and emulsifiers on the rheological, microstructural and quality characteristics of eggless cake[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(3): 700-707.
- [40] WILDERJANS E, LUYTS A, GOESAERT H, et al. A model approach to starch and protein functionality in a pound cake system[J]. Food Chemistry, 2010, 120(1): 44-51.