

λ -卡拉胶对减脂乳凝胶结构与流变特性的影响

彭海鑫¹ 罗绪刚² 罗洁³ 王芳¹ 王鹏杰¹ 任发政¹

(1. 中国农业大学北京食品营养与人类健康高精尖创新中心, 北京 100083; 2. 中国农业科学院北京畜牧兽医研究所, 北京 100193; 3. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083)

摘要: 将 λ -卡拉胶加入原料乳中, 研究全脂、减脂和低脂(脂肪质量分数 3.80%、1.83%、0.48%)牛乳酶凝胶的理化指标、结构及流变特性变化, 为开发能替代全脂产品的低脂干酪提供参考。结果表明, 加入 0.03% λ -卡拉胶后, 分别与对照组相比, 实验组乳凝胶的含水率均显著增加($P < 0.05$); 添加 0.03% λ -卡拉胶的减脂实验组得率、蛋白质回收率、脂肪回收率较对照组增加最多, 分别为 13.56%、1.77%、9.34%; 加入 0.03% λ -卡拉胶后, 与对照组相比, 实验组凝乳时间($G' = 1 \text{ Pa}$)显著增加($P < 0.05$), 自发性乳清析出率减小($P < 0.05$), 硬度、弹性显著降低($P < 0.05$), 流变性无显著影响($P > 0.05$)。综上, 添加 0.03% λ -卡拉胶后的减脂实验组, 凝胶理化指标和质构特性与全脂空白对照组无显著性差异($P > 0.05$), 表明 0.03% λ -卡拉胶具有增加凝胶的蛋白质回收率, 软化质地, 改善低脂干酪品质的潜力。

关键词: λ -卡拉胶; 酶凝胶; 理化指标; 质构特性; 流变特性

中图分类号: TS252.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)10-0267-07

Effect of λ -carrageenan on Structural and Rheological Properties of Reduced-fat Renneted Milk Gels

Peng Haixin¹ Luo Xugang² Luo Jie³ Wang Fang¹ Wang Pengjie¹ Ren Fazheng¹

(1. The Innovation Centre of Food Nutrition and Human Health, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Institute of Animal Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China

3. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: To improve the low quality of low-fat cheese, effects of λ -carrageenan on the physicochemical, structural and rheological characteristics of rennet milk gels made from milk of different fat contents (3.80%, 1.83% and 0.48%) were investigated. The results showed that with the addition of 0.03% λ -carrageenan, the moisture of all experimental samples was increased; the yield, protein and fat recoveries of the rennet gel made from the reduced-fat milk (1.83%) were significantly increased by 13.56%, 1.77% and 9.34%, respectively. In the low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) results, the T_2 transverse relaxation time data demonstrated three distinct water populations. After the addition of λ -carrageenan, the adsorption water proportion was increased, but free water proportion was reduced. The gel time ($G' = 1 \text{ Pa}$) of all the experimental groups was increased significantly after the addition of 0.03% λ -carrageenan ($P < 0.05$), while the spontaneous whey precipitation was decreased ($P < 0.05$). Meanwhile, the hardness, elasticity of milk gels were decreased significantly ($P < 0.05$). However, the addition of λ -carrageenan did not significantly affect the rheological characteristics of gel ($P > 0.05$). Above all, there was no significant difference in the physicochemical and structural characteristics between the full-fat control and the reduced-fat milk rennet gel (1.83%) after the

收稿日期: 2016-02-04 修回日期: 2016-04-26

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD12B08)

作者简介: 彭海鑫(1992—), 女, 博士生, 主要从事乳品加工研究, E-mail: 18410068275@163.com

通信作者: 任发政(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事乳品科学与加工研究, E-mail: renfazheng@263.net

addition of λ -carrageenan ($P > 0.05$). In conclusion, the addition of λ -carrageenan could increase protein recovery rate of reduced-fat gel while softening the texture simultaneously, which proved its great potential in improving the quality of low-fat cheese.

Key words: λ -carrageenan; milk gel; physicochemical indexes; texture characteristic; rheological property

引言

干酪是我国消费增长最快的乳制品之一,随着人们健康意识逐渐提高,低脂干酪逐渐流行。但是,由于脂肪的减少,干酪产生一系列质构和功能特性缺陷,如质地坚硬、融化性差等,因此改善低脂干酪品质一直是乳品工业研究的热点^[1]。

卡拉胶是一种水溶性、高分子量、线性阴离子多糖,因所带硫酸基团数量、位置和 3,6-无水半乳糖位置上的差异,分为 ι 型、 κ 型和 λ 型,具有增稠、凝胶和稳定蛋白等加工特性^[2],在低脂产品中运用广泛^[3-5]。在低脂含羧甲基纤维素钠乳制品中,添加 0.04% λ -卡拉胶的组与全脂空白对照组的流变特性无显著性差异^[3];此外, κ -卡拉胶截流部分乳清蛋白、糖分和灰分,可以改善低脂产品结构特性^[4]。

在前期研究中^[6],课题组探讨了不同浓度、不同种类的卡拉胶对单一酪蛋白胶束酶凝胶形成的影响。结果发现, λ -卡拉胶硫酸基团最多,以环式吸附与酪蛋白胶束静电斥力结合;通过增加负电荷区域占据更多酶切位点,从而影响凝乳形成过程。在不同 λ -卡拉胶质量分数(0.01% ~ 0.1%)中,添加 0.03% 凝乳时间滞后最为显著,凝胶强度显著性降低,是改善低脂干酪的潜在脂肪替代物。然而,对存在不同脂肪含量的乳体系, λ -卡拉胶与酪蛋白的作用及其对干酪的结构和流变学性质的影响尚未阐明。

凝乳是干酪制作关键步骤,其结构和流变特性对干酪品质有决定性影响。凝胶网络结构中蛋白交联键的数量和强度与干酪品质密切相关;流变学特性则直接反映粘弹性、流动性等宏观特性^[7]。其中,不同脂肪含量产品在结构、流变上存在较大差异。因此,本文参照有关文献,分别设置全脂、减脂和低脂(脂肪质量分数 3.80%、1.83%、0.48%)的原料乳体系,与加入 0.03% λ -卡拉胶后检测的乳酶凝胶的理化指标、结构及流变特性进行比较,探究应用 λ -卡拉胶改善低脂干酪品质的可能性,为更好地开发脂肪替代品提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

新鲜牛乳:北京三元食品股份有限公司春山农

场; λ -卡拉胶:Sigma Chemical Co. (St Louis, Mo, USA);凝乳酶(Chr. Hansen, 丹麦, Stamix 1150 NB),活性成分是牛胃蛋白酶(EC 3.4.23.3)和小牛皱胃酶(EC 3.4.23.1),总酶活力为 120 000 U/g;其余试剂均为分析纯级。

1.2 实验仪器与设备

KDY-9830 型凯氏定氮仪(北京思贝得研究所);PQ001 型核磁共振分析仪(苏州纽迈电子设备公司);TMS Pro 型质构仪(美国 Food Technology 公司);AiRsi 型激光共聚焦显微镜(日本尼康公司);AR-1500ex 型流变仪(美国 TA 仪器设备公司);TGL-16B 型离心机(上海安亭科学仪器厂)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品制备

将原料乳经 4 200 g、25℃ 离心 20 min 后,移除上层的脂肪,得到脱脂乳^[8-9];取全脂乳、低脂乳调配标准化后,设置含不同质量分数脂肪(4.0%、1.5%、0.5%)的原料乳体系,全脂组脂肪质量分数实测值为(3.80 ± 0.10)%,减脂组脂肪质量分数实测值为(1.83 ± 0.08)%,低脂组脂肪质量分数实测值为(0.48 ± 0.02)%,分别标记为 FC (full-fat control) 全脂对照组、RC (reduce-fat control) 减脂对照组、LC (low-fat control) 低脂对照组;选取最佳 λ -卡拉胶添加质量分数 0.03%,添加至实验组中,分别标记为 FCG 全脂实验组、RCG 减脂实验组、LCG 低脂实验组。空白对照组不添加卡拉胶。在 32℃ 下,加入 0.05 g/L 凝乳酶后,调节 pH 值至 6.7,凝乳 1 h。切割、静置,离心计算得率,并进行理化指标测定。

1.3.2 物化成分的测定及相关参数计算

含水率测定采用干燥法(GB 5009.3—2010);蛋白质含量测定采用凯氏定氮法^[10];脂肪含量测定采用罗兹-哥特里法(GB 5413.3—2010)。以上每个样品重复测定 3 次。

水分分布采用低场核磁共振(Nuclear magnetic resonance, NMR)测定,参照相关文献,通过处在恒定磁场中氢质子在射频脉冲下的横向弛豫时间 T_2 反映水分子结合力和水分迁移情况^[11]。样品 2 g 置于 $\phi 12$ mm 样品管中,测量温度为 32℃。弛豫时间 T_2 用核磁共振分析仪的 CPMG (Carr - Purcell -

Meiboom - Gill) 脉冲序列测定样品中间部位 T_2 , 所用参数为 τ 值(90°脉冲和 180°脉冲之间的时间)为 200 μ s。重复采样 4 次, 重复间隔时间为 2 000 ms, 得到以指数形式衰减的核磁信号。

此外, 物化指标中相关参数计算公式为

$$M = C_m / (1 - C_f) \times 100\% \quad (1)$$

$$W = C_m / C_p \quad (2)$$

$$R_p = (M_c C_p) / (M_r C_{rp}) \times 100\% \quad (3)$$

$$R_f = (M_c C_f) / (M_r C_{rf}) \times 100\% \quad (4)$$

式中 M ——非脂固形物的含水率, %

C_m ——凝胶含水率, %

C_f ——凝胶脂肪质量分数, %

W ——水分蛋白比

C_p ——凝胶蛋白质质量分数, %

R_p ——蛋白质回收率, %

M_c ——凝胶质量, g

M_r ——原料乳质量, g

C_{rp} ——原料乳蛋白质质量分数, %

R_f ——脂肪回收率, %

C_{rf} ——原料乳脂肪质量分数, %

得率计算公式为

$$Y = M_c / M_r \times 100\% \quad (5)$$

1.3.3 结构特性的测定

凝胶质构特性的测定参考 Drake 质构剖面分析法^[12], 测试速度为 2.4 mm/s, 下压距离为 30%。

微观结构用激光共聚焦显微镜进行观测^[13]。取样切 5 mm × 5 mm × 2 mm 凝胶置于载玻片上, 用 1 mg/mL 的尼罗红染色剂及 1 mg/mL 的快绿染色剂在暗盒中充分染色, 覆盖 0.17 mm 盖玻片。观测条件为: Ar/Kr 激光源, 尼罗红激发光源波长 488 nm, 快绿激发光源波长 633 nm, 63 倍油镜观察。调整至视野清晰后采集图片。

1.3.4 流变学特性的测定

凝乳过程监测: 探头直径为 60 mm, 间距为 1 mm; 剪切应变为 0.50% (线性粘弹区范围内), 角频率为 1 Hz。在 32℃ 加入凝乳酶后测定凝胶形成过程。以 $G' = 1$ Pa (G' 为弹性模量) 时所对应时间为凝乳时间; $G' = 20$ Pa 所对应时间为切割时间; 凝胶强度为凝乳 60 min 时 G' 值^[14]。

流变性测定: 室温下平衡 30 min, 从中心进行取样。探头直径为 40 mm, 间距为 2 mm。温度扫描程序设置参数如下: 剪应变 0.50% (线性粘弹区范围内), 角频率 1 Hz, 温度扫描范围为 20 ~ 80℃, 升温速率为 3℃/min。

1.3.5 数据分析

实验数据采用 Excel 整理和制图, SPSS 17.0 统

计软件 (SPSS Inc., 2008) 进行单因子方差分析, 各表中数值以平均值 \pm 标准差表示, 以 $P < 0.05$ 作为差异显著性判断标准。

2 结果与讨论

2.1 λ -卡拉胶对乳凝胶理化指标的影响

脂肪和蛋白质共同维持干酪的整体结构。如表 1 所示, 与全脂空白对照组相比, 随着原料乳脂肪含量的降低, 干酪水分和蛋白质含量显著增加 ($P < 0.05$), 这与 COOKE 等^[15] 研究结果一致。添加 0.03% λ -卡拉胶后, 各实验组凝胶含水率均显著增加 ($P < 0.05$), 分别为 2.04%、3.29% 及 3.09%; 但蛋白质含量变化不显著 ($P > 0.05$)。

在干酪生产过程中, 得率为重要指标; 干酪中的主要固形物为蛋白质和脂肪, 因而对蛋白质和脂肪回收率进行分析也具有重要的意义^[16]。从表 2 可以看出, 随着脂肪含量的降低, 得率显著下降 ($P < 0.05$); 而 λ -卡拉胶的加入, 使得率显著增加 ($P < 0.05$)。其中, 添加 λ -卡拉胶后的全脂实验组较对照组得率增加最小, 为 5.68%; 减脂实验组和低脂实验组得率分别增加 13.56% 和 8.91%。此外, 添加 λ -卡拉胶的减脂实验组 (RCG) 得率与全脂空白对照组 (FC) 无显著性差异 ($P > 0.05$)。在蛋白质、脂肪回收率方面, 随着脂肪含量减少, 脂肪回收率降低, 蛋白质回收率降低。添加 λ -卡拉胶后, 全脂实验组 (FCG) 和全脂空白对照组 (FC) 的蛋白质、脂肪回收率差异均不显著 ($P > 0.05$); 低脂实验组 (LCG) 蛋白质回收率较低脂对照组 (LC) 显著提高 ($P < 0.05$)、脂肪回收率差异不显著 ($P > 0.05$); 而减脂实验组 (RCG) 中蛋白质、脂肪回收率较对照组 (RC) 均显著提高 ($P < 0.05$), 分别为 1.77%、9.34%, 得率上升也最为显著 ($P < 0.05$)。 λ -卡拉胶的添加, 一方面可加强蛋白凝胶网状结构的水结合能力, 另一方面可以环式吸附与酪蛋白胶束结合^[6], 从而增加蛋白质回收率, 增加得率。

在凝胶中, 水或与凝胶网状蛋白质基质结合, 或在乳清通道中呈流动状态, 影响干酪的流变、质构特性等^[17]。采用低场核磁共振实验探究 λ -卡拉胶是否对水分分布产生影响。横向弛豫时间 (T_2) 反映水分结合力和水分迁移相关信息, 如表 3 所示。 T_{2b} 、 T_{21} 、 T_{22} 分别表示结合水、束缚水和自由水出峰时间, P_{2b} 、 P_{21} 、 P_{22} 表示出峰面积对应比例^[18]。其中, 所有组凝胶均为结合水比例最小, 束缚水比例最大, 该结果与乳清浓缩蛋白热诱导凝胶弛豫峰特性一致^[19]。在弛豫时间方面, 随着脂肪含量的降低,

T_{21} 均显著下降($P < 0.05$),表明束缚水中水分子移动性降低,凝胶结构结合更紧密(表3); λ -卡拉胶加入后, P_{21} 和 P_{22} 峰面积比例变化均显著($P < 0.05$), P_{21} 从空白对照组 91.45% 增加为 93.35%, P_{22} 由 7.28% 降低为 5.17%。该结果与高压处理后保水

性提高结果一致^[20]。亲水性多糖 λ -卡拉胶加入后,自由水向束缚水变化,凝胶持水性提高;从而与大多数碳水化合物类脂肪取代物相似,通过提高含水率,进一步使非脂固形物中含水率和水分蛋白比达到全脂水平。

表1 λ -卡拉胶对凝胶理化指标的影响

Tab.1 Effect of λ -carrageenan on physicochemical indexes of milk gels

参数	FC	FCG	RC	RCG	LC	LCG
蛋白质质量分数/%	14.26 ± 0.14 ^d	13.74 ± 0.32 ^d	16.96 ± 0.23 ^b	14.95 ± 0.25 ^c	19.45 ± 0.21 ^a	19.01 ± 0.17 ^a
脂肪质量分数/%	16.66 ± 0.47 ^a	15.33 ± 0.14 ^b	9.01 ± 0.16 ^c	8.55 ± 0.28 ^c	2.79 ± 0.10 ^d	2.67 ± 0.08 ^d
含水率/%	68.13 ± 0.20 ^d	69.52 ± 0.44 ^c	69.50 ± 0.59 ^c	71.79 ± 0.24 ^b	71.83 ± 0.22 ^b	74.05 ± 0.09 ^a
非脂固形物中含水率/%	80.69 ± 0.12 ^a	81.12 ± 0.81 ^a	76.37 ± 0.28 ^b	79.80 ± 0.82 ^a	73.82 ± 0.25 ^c	76.08 ± 0.34 ^b
水分蛋白比	4.77 ± 0.05 ^b	5.06 ± 0.08 ^a	4.09 ± 0.04 ^c	4.90 ± 0.03 ^{ab}	3.69 ± 0.06 ^d	3.90 ± 0.15 ^{cd}

注:小写字母相同表示同一行数没有显著性差异, $P > 0.05$,下同。

表2 λ -卡拉胶对凝胶蛋白质、脂肪回收率及得率的影响

Tab.2 Effect of λ -carrageenan on protein, fat recoveries and yields of milk gels

参数	FC	FCG	RC	RCG	LC	LCG
蛋白质回收率	75.60 ± 0.42 ^a	75.25 ± 0.57 ^a	73.89 ± 0.12 ^c	75.20 ± 0.84 ^{ab}	71.45 ± 0.32 ^d	74.25 ± 0.17 ^{bc}
脂肪回收率	86.36 ± 1.35 ^b	83.59 ± 1.28 ^{bc}	83.30 ± 0.96 ^{bc}	91.08 ± 1.14 ^a	81.49 ± 1.21 ^c	84.90 ± 0.85 ^{bc}
得率	19.70 ± 0.28 ^b	20.82 ± 0.30 ^a	17.18 ± 0.14 ^c	19.51 ± 0.08 ^b	14.02 ± 0.39 ^e	15.27 ± 0.12 ^d

表3 λ -卡拉胶对凝胶水分分布的影响

Tab.3 Effect of λ -carrageenan on water proportion of milk gels

参数	FC	FCG	RC	RCG	LC	LCG
T_{21} /ms	1.305 ± 0.007 ^b	1.311 ± 0.006 ^b	1.316 ± 0.005 ^{ab}	1.325 ± 0.008 ^a	1.323 ± 0.010 ^a	1.331 ± 0.006 ^a
T_{21} /ms	27.58 ± 0.81 ^b	29.12 ± 0.18 ^a	24.25 ± 0.35 ^c	24.90 ± 0.14 ^c	21.25 ± 0.35 ^d	22.25 ± 0.35 ^d
T_{22} /ms	282.3 ± 9.9 ^a	295.0 ± 7.1 ^a	227.5 ± 9.6 ^b	239.7 ± 2.4 ^b	193.6 ± 2.8 ^c	207.4 ± 3.5 ^c
P_{21} /%	1.36 ± 0.04 ^a	1.39 ± 0.05 ^a	1.26 ± 0.03 ^a	1.35 ± 0.03 ^a	1.03 ± 0.06 ^b	1.26 ± 0.08 ^a
P_{21} /%	93.65 ± 0.49 ^a	94.25 ± 0.35 ^a	91.45 ± 0.08 ^b	93.35 ± 0.21 ^a	90.25 ± 0.35 ^c	91.50 ± 0.71 ^b
P_{22} /%	4.92 ± 0.48 ^c	4.15 ± 0.35 ^c	7.28 ± 0.28 ^b	5.17 ± 0.24 ^c	8.69 ± 0.26 ^a	7.24 ± 0.71 ^b

2.2 λ -卡拉胶对酶凝胶结构学特性变化

2.2.1 酶凝胶结构的形成

原料乳酶凝过程中酪蛋白网络结构形成及脱水收缩过程中乳清的排出程度决定了凝胶的物理特性^[21]。

在酪蛋白凝胶网络结构形成中,随着脂肪含量的降低,凝乳时间增加(图1)。加入0.03% λ -卡拉胶后,各实验组凝乳时间均显著增加($P < 0.05$),切割时间也相应增加;凝胶强度显著降低($P < 0.05$) (表4)。该结果与脱脂体系结果相符, λ -卡拉胶与酪蛋白胶束环状吸附作用,酶结合位点相应增加,从而凝乳时间增加,凝胶强度降低^[6]。此外,由于凝乳速度降低,乳中蛋白质、脂肪可及时被凝胶体网状结构包裹,不易进入乳清,因而回收率提高。

脱水缩合方面,在酪蛋白胶体收缩的同时,蛋白质凝胶网络重排,稳定性发生变化,宏观上表现为乳清析出^[22]。如图2所示,对照组中,全脂、减脂、低

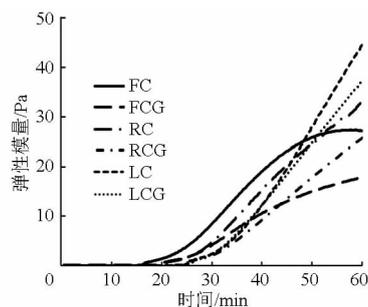
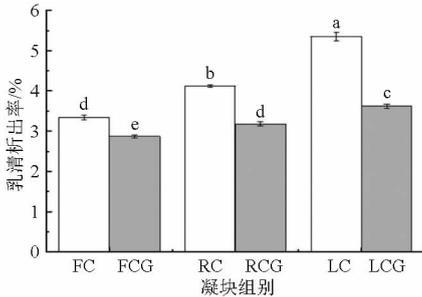


图1 λ -卡拉胶对凝乳过程中弹性模量值的影响
Fig.1 Effect of λ -carrageenan on storage modulus during rennet gel formation

脂对照组乳清析出率依次增加,分别为 3.34%、4.21%、5.33%;当 λ -卡拉胶加入后,乳清析出显著减少($P < 0.05$),且减脂、低脂实验组(RCG、LCG)与全脂对照组(FC)无显著性差异($P < 0.05$)。研究表明^[23],乳清析出持水能力能反映水分保留能力,与干酪融化、流变等功能特性密切相关。在制作过程中,脂肪可减少凝胶网络收缩程度及乳清排出;

表 4 λ -卡拉胶对酶凝乳特性的影响Tab. 4 Effect of λ -carrageenan on rennet coagulation characteristics of milk gels

参数	FC	FCG	RC	RCG	LC	LCG
凝乳时间/min	17.85 ± 1.20 ^d	22.60 ± 0.56 ^{bc}	21.90 ± 1.25 ^c	24.89 ± 1.17 ^b	24.80 ± 1.13 ^b	27.70 ± 0.98 ^a
切割时间/min	40.00 ± 1.35 ^c	—	44.35 ± 0.49 ^b	50.85 ± 0.20 ^a	44.85 ± 0.21 ^b	45.65 ± 0.48 ^b
凝胶强度 G' /Pa	27.11 ± 0.94 ^c	17.75 ± 1.42 ^d	33.12 ± 0.41 ^b	25.70 ± 2.26 ^c	44.52 ± 3.50 ^a	37.55 ± 0.94 ^b

图 2 λ -卡拉胶对自发性乳清析出的影响Fig. 2 Effect of λ -carrageenan on spontaneous whey separation of milk gels

而实验组中, λ -卡拉胶可因强水分结合能力、强持水性起到类似脂肪替代效果。在低酰基结冷胶/酪蛋白酸钠复合凝胶研究中发现,复合凝胶保水性随着低酰基结冷胶含量增加而增加^[24]。

2.2.2 酶凝胶质构特性

干酪质构受化学组分和加工工艺影响,水分在干酪基质中被酪蛋白吸收,酪蛋白融胀,网络结构弹性增强,硬度减弱^[25]。质构测试 TPA 结果如表 5 所示。对照组中,随着脂肪含量的降低,酪蛋白分子间交联程度紧密,硬度、凝聚性、弹性显著增加 ($P < 0.05$)。当减脂实验组 (RCG) 加入 0.03% λ -卡拉胶后,凝聚性变化不显著 ($P > 0.05$); 硬度从 4.11 N 减少为 3.19 N,弹性从 0.89 减小为 0.85,与全脂空白对照组 (FC) 无显著性差异 ($P > 0.05$)。KOMMINENI 等^[26]将木糖醇加入低脂再制干酪中也得到类似结论,发现随着添加浓度增加,干酪弹性降低。

微观结构方面,如图 3 所示,蛋白质形成凝胶网

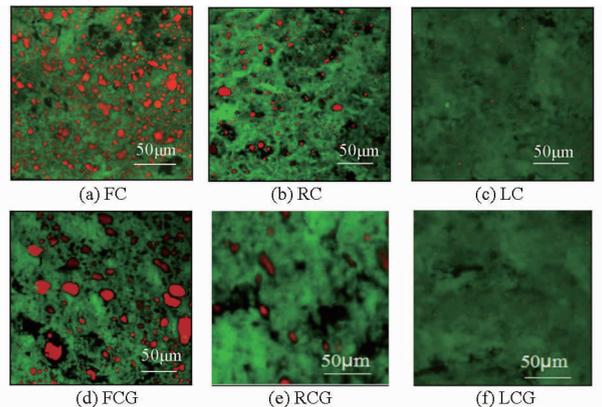
表 5 λ -卡拉胶对凝胶质构特性的影响Tab. 5 Effect of λ -carrageenan on texture profile of milk gels

参数	FC	FCG	RC	RCG	LC	LCG
硬度/N	3.29 ± 0.10 ^d	2.96 ± 0.08 ^e	4.11 ± 0.07 ^b	3.19 ± 0.12 ^d	5.16 ± 0.22 ^a	3.88 ± 0.05 ^c
弹性	0.81 ± 0.03 ^{de}	0.75 ± 0.02 ^e	0.89 ± 0.03 ^{bc}	0.85 ± 0.02 ^{ed}	0.96 ± 0.04 ^a	0.92 ± 0.02 ^b
凝聚性/($g \cdot s^{-1}$)	0.45 ± 0.03 ^{bc}	0.40 ± 0.03 ^c	0.54 ± 0.02 ^b	0.53 ± 0.04 ^b	0.69 ± 0.01 ^a	0.70 ± 0.02 ^a

状结构,脂肪镶嵌其中^[14]。随着脂肪含量降低,干酪蛋白凝胶网状结构更为致密紧凑。 λ -卡拉胶加入后,孔洞不同程度变大。一方面,带负电荷的卡拉胶与酪蛋白结合覆盖其表面后,通过颗粒间静电相互作用,保持了蛋白网络体系稳定分散的状态。另一方面,实验组中孔洞变疏松,一定程度上有利于水分、脂肪的保留。该结果也与蛋白质、脂肪回收率提高及质构结果一致。朱巧梅等^[27]则发现添加 W/O 乳液凝固剂可显著改善大豆分离蛋白冷凝胶网络结构,网络孔隙分布均匀变小。

2.3 λ -卡拉胶对酶凝胶流变学特性的影响

凝胶是一种具有粘弹特性的材料,受外力作用后会发生微小形变,具有流动变形能力,不同脂肪含量下差异较大。其中,融化性和流动性,作为重要功能指标,可通过流变扫描进行测定。温度扫描从 25℃ 到 80℃,在线性粘弹区进行; G' 和 $\tan\delta$ 值变化结果如图 4、5 所示, G' ($T = 40^\circ\text{C}$ 、 $T = 70^\circ\text{C}$) 和 $\tan\delta$ 最大值见表 6。

图 3 λ -卡拉胶对凝胶微观结构的影响Fig. 3 Effect of λ -carrageenan on microstructure of samples

随着温度升高,凝胶逐渐呈松软坍塌,主要与加热时弹性降低有关;当弹性模量低于粘性模量时发生流动性。如图 4 所示,所有样品中随温度上升, G' 下降,主要是熔化过程中酪蛋白胶束收缩和酪蛋白间的相互作用减弱^[28]。而在低脂空白对照中,当温度为 65 ~ 80℃ 时, G' 增加。MA 等^[29]也在蛋白质、脂肪比与干酪品质相关性分析中也得到类似结果,

推测是因为水分可软化质地,而脂肪可保留水分。加热过程中,低脂中有限的脂肪不能阻止水分流失。而在菊粉替代物研究中,发现 G' 回弹效果显著,甚至大于原值,这是因为高浓度菊粉引起干酪凝胶基质的凝胶或固化所致^[30]。如表 6 所示,空白对照组中,随着脂肪含量降低, $G'_{40^\circ\text{C}}$ 、 $G'_{70^\circ\text{C}}$ 呈显著增加 ($P < 0.05$); 实验组中, $G'_{40^\circ\text{C}}$ 、 $G'_{70^\circ\text{C}}$ 则不同程度降低。其中,减脂实验组加入 0.03% λ -卡拉胶与全脂组粘弹性水平无显著差异 ($P > 0.05$)。

粘弹特性 ($\tan\delta$) 是粘性模量 G'' 与弹性模量 G' 的比值,可表征材料流动变形能力。值越大,表明粘弹性材料的流动性越大,越趋近液体特性。如图 5 所示,所有样品中 $\tan\delta$ 值先随着温度升高而增大,表明流动性随着温度的升高而增大。对照组中,随着脂肪含量降低, $\tan\delta_{\text{max}}$ 显著降低 ($P < 0.05$); 实验组加入 λ -卡拉胶后, $\tan\delta_{\text{max}}$ 不同程度增加。一方面,样品未完全排出乳清,含水率较高。另一方面, λ -卡拉胶添加后,含水率高于对照组,蛋白质含量降低;且水分促进蛋白质的水化,分散凝胶网络,流动性增加。

表 6 λ -卡拉胶对凝胶流变特性的影响

Tab. 6 Effect of λ -carrageenan on dynamic small amplitude oscillatory rheology of milk gels

参数	FC	FCG	RC	RCG	LC	LCG
$G'_{40^\circ\text{C}}/\text{kPa}$	15.03 ± 0.25 ^d	9.57 ± 0.12 ^f	20.28 ± 0.62 ^b	15.26 ± 0.45 ^c	24.42 ± 0.58 ^a	14.47 ± 0.32 ^e
$G'_{70^\circ\text{C}}/\text{kPa}$	3.61 ± 0.23 ^{cd}	2.67 ± 0.04 ^e	4.46 ± 0.21 ^b	3.52 ± 0.71 ^d	5.82 ± 0.30 ^a	3.71 ± 0.09 ^c
$\tan\delta_{\text{max}}$	0.74 ± 0.01 ^b	0.75 ± 0.01 ^a	0.72 ± 0.01 ^d	0.73 ± 0.01 ^c	0.71 ± 0.01 ^e	0.72 ± 0.01 ^d

3 结束语

研究了 λ -卡拉胶对不同脂肪含量凝胶的理化指标、结构及流变特性的影响。随着 λ -卡拉胶的添加,低脂实验组乳凝胶的含水率显著增加,同时显著提高

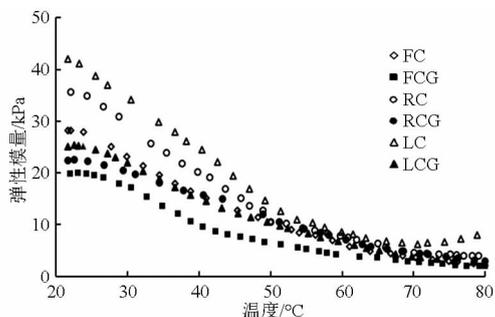


图 4 λ -卡拉胶对凝胶加热过程中弹性模量的影响

Fig. 4 Effect of λ -carrageenan on elastic modulus of milk gels

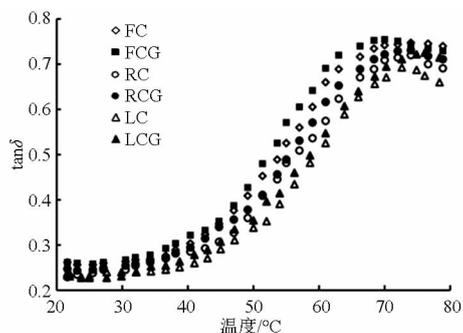


图 5 λ -卡拉胶对凝胶加热过程中 $\tan\delta$ 值的影响

Fig. 5 Effect of λ -carrageenan on $\tan\delta$ value of milk gels

了蛋白质、脂肪回收率。结构学特性中, λ -卡拉胶可增加凝胶持水性,稳定结构;质构结果表明,添加 λ -卡拉胶的减脂实验组(1.83%)与全脂对照组硬度、弹性无显著性差异,达到期望质构特性。综上, λ -卡拉胶具有改善减脂干酪产品结构和质地的潜力。

参 考 文 献

- JOHNSON M E, KAPOOR R, MCMAHON D J, et al. Reduction of sodium and fat levels in natural and processed cheeses: scientific and technological aspects[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2009, 8(3): 252–268.
- PRAJAPATI V D, MAHERIVA P M, JANI G K, et al. Carrageenan: a natural seaweed polysaccharide and its applications[J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 105: 97–112.
- BAVARRI S, CHULIA I, COSTELL E. Comparing λ -carrageenan and an inulin blend as fat replacers in carboxymethyl cellulose dairy desserts. Rheological and sensory aspects[J]. Food Hydrocolloids, 2010, 24(6): 578–587.
- RAMIREZ-SUCRE M O, VELEZ-RUIZ J F. Physicochemical, rheological and stability characterization of a low-fat flavored yogurt [J]. LWT—Food Science and Technology, 2013, 51(1): 233–241.
- GAO X, KANG Z, ZHANG W, et al. Combination of κ -carrageenan and soy protein isolate effects on functional properties of chopped low-fat pork batters during heat-induced gelation[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(7): 1524–1531.
- WANG F, LIU X, HU Y, et al. Effect of carrageenan on the formation of rennet-induced casein micelle gels [J]. Food Hydrocolloids, 2014, 36: 212–219.
- LUCEY J A. Formation and physical properties of milk protein gels[J]. Journal of Dairy Science, 2002, 85(2): 281–294.
- VAN HEKKEN D L, PARK Y W, Tunick M H. Effects of reducing fat content on the proteolytic and rheological properties of

- Cheddar-like caprine milk cheese[J]. *Small Ruminant Research*, 2013, 110(1): 46–51.
- 9 SANCHEZ-MACIA D, MORENO-INDIAS I, ÁLVAREZ S, et al. Physicochemical analysis of full-fat, reduced-fat and low-fat artisan-style goat cheese[J]. *Journal of Dairy Science*, 2010, 93(9): 3950–3956.
- 10 LYNCH J M, BARBANO D M, FLEMING J R. Indirect and direct determination of the casein content of milk by kjeldahl nitrogen analysis: collaborative study[J]. *Journal of AOAC International*, 1997, 81(4): 763–774.
- 11 吕为乔, 韩清华, 李树君, 等. 微波干燥姜片模型建立与去水机理分析[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(4): 233–237.
LÜ Weiqiao, HAN Qinghua, LI Shujun, et al. Analysis of microwave drying model and water removing mechanism of ginger slices [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(4): 233–237. (in Chinese)
- 12 DRAKE M A, GERARD P D, TRUONG V D, et al. Relationship between instrumental and sensory measurements of cheese texture[J]. *Journal of Texture Studies*, 1999, 30(4): 451–476.
- 13 SRINIVASAN M, LUCEY J A. Effects of added plasmin on the formation and rheological properties of rennet-induced skim milk gels[J]. *Journal of Dairy Science*, 2002, 85(5): 1070–1078.
- 14 ONG L, DAGASTINE R R, KENTIS S E, et al. Microstructure of milk gel and cheese curd observed using cryo scanning electron microscopy and confocal microscopy[J]. *LWT—Food Science and Technology*, 2011, 44(5): 1291–1302.
- 15 COOKE D R, KHOSROSHAHI A, MCSWEENEY P L H. Effect of gum tragacanth on the rheological and functional properties of full-fat and half-fat Cheddar cheese[J]. *Dairy Science & Technology*, 2013, 93(1): 45–62.
- 16 刘会平, 南庆贤, 马长伟, 等. Mozzarella 干酪加工过程中主要理化指标变化及其产率计算[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(3): 148–152.
LIU Huiping, NAN Qingxian, MA Changwei, et al. Changes of main chemical and physical indexes and the calculation of yield ratio during processing Mozzarella cheese[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(3): 148–152. (in Chinese)
- 17 HINRICHS R, GOTZ J, NOLL M, et al. Characterisation of the water-holding capacity of fresh cheese samples by means of low resolution nuclear magnetic resonance[J]. *Food Research International*, 2004, 37(7): 667–676.
- 18 LUO J, PAN T, GUO H Y, et al. Effect of calcium in brine on salt diffusion and water distribution of Mozzarella cheese during brining[J]. *Journal of Dairy Science*, 2013, 96(2): 824–831.
- 19 LE Dean A, MARIETTE F, Marin M. ¹H nuclear magnetic resonance relaxometry study of water state in milk protein mixtures [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(17): 5449–5455.
- 20 LI T, RUI X, WANG K, et al. Study of the dynamic states of water and effects of high-pressure homogenization on water distribution in tofu by using low-field nuclear magnetic resonance[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2015, 30: 61–68.
- 21 BANKS J M. The technology of low-fat cheese manufacture[J]. *International Journal of Dairy Technology*, 2004, 57(4): 199–207.
- 22 LUCEY J A. The relationship between rheological parameters and whey separation in milk gels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2001, 15(4): 603–608.
- 23 WALSTRA P, VAN Dijk H J M, Geurts T J. The syneresis of curd. 1. General considerations and literature review[J]. *Netherlands Milk and Dairy Journal*, 1985, 39: 209–246.
- 24 陈青, 王磊, 向琪瑞, 低酰基结冷胶/酪蛋白酸钠复合凝胶特性影响因素分析[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(6): 226–232.
CHEN Qing, WANG Lei, XIANG Qirui. Factors influencing gelling properties of low acyl gellan/sodium caseinate mixtures[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(6): 226–232. (in Chinese)
- 25 GUNASEKARAN S, AK M M. *Cheese rheology and texture*[M]. Florida: CRC Press, 2002.
- 26 KOMMINENI A, AMAMCHARLA J, METZGER L E. Effect of xylitol on the functional properties of low-fat process cheese[J]. *Journal of Dairy Science*, 2012, 95(11): 6252–6259.
- 27 朱巧梅, 酃金龙, 范鑫, 等. W/O 乳液凝固剂对 SPI 冷凝胶流变特性与微观结构的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(2): 240–246.
ZHU Qiaomei, LI Jinlong, FAN Xin, et al. Effect of W/O emulsion coagulants on rheological properties and microstructure of cold-set SPI gels[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(2): 240–246. (in Chinese)
- 28 LUCEY J A, JOHNSON M E, HORNE D S. Invited review: perspectives on the basis of the rheology and texture properties of cheese[J]. *Journal of Dairy Science*, 2003, 86(9): 2725–2743.
- 29 MA X, JAMES B, ZHANG L, et al. Correlating Mozzarella cheese properties to its production processes and microstructure quantification[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 115(2): 154–163.
- 30 HENNELLY P J, DUNNE P G, O'SULLIVAN M, et al. Textural, rheological and microstructural properties of imitation cheese containing inulin[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006, 75(3): 388–395.