

添加可得然胶对法兰克福香肠品质特性的影响

姜 帅,牛海力,刘 骞,张宏伟,孔保华*

(东北农业大学食品学院,哈尔滨黑龙江 150030)

摘 要:在法兰克福香肠的制作中,分别添加0、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%和0.5% (可得然胶与总肉重的质量比)的可得然胶。测定蒸煮损失、乳化稳定性、色差、质构以及流变特性,同时应用低场核磁技术(LF-NMR)测定香肠内部水分子的迁移规律,并通过激光共聚焦显微镜(CLSM)研究香肠微观结构的变化。结果表明,随着可得然胶添加量的增加,法兰克福香肠的蒸煮损失显著降低($p < 0.05$),亮度、硬度和粘结性均显著增加($p < 0.05$)。同时,LF-NMR 研究结果表明添加可得然胶可以限制水分子在肉糜加热过程中的移动,并增强对水分子的束缚能力。流变学测试结果表明可得然胶添加能够显著提高法兰克福肉糜的储能模量、损失模量以及弹性($p < 0.05$)。CLSM 结果表明可得然胶的添加促进了香肠内部凝胶网络结构的形成。因此,可得然胶在一定程度上可以改善法兰克福香肠的品质特性,并且在本研究设定范围内的最佳添加量为0.3%。

关键词:法兰克福香肠,可得然胶,低场核磁共振,流变特性,微观结构

Effect of curdlan addition on the quality of Frankfurt sausage

JIANG Shuai, NIU Hai-li, LIU Qian, ZHANG Hong-wei, KONG Bao-hua*

(College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In the preparation of the Frankfurt sausage, curdlan was added at 0, 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4% and 0.5% (mass ratio of curdlan to total meat weight). The effects were studied by measuring cooking loss, emulsion stability, colors, texture profiles and rheological properties. The mobility regularity of water molecules in Frankfurt sausage were measured by low field nuclear magnetic resonance (LF-NMR), and the microstructures were observed by confocal laser scanning microscopy (CLSM). The results showed that cooking loss of Frankfurt sausage decreased significantly with the increased addition of curdlan ($p < 0.05$). However, the L^* -value, hardness and adhesiveness of Frankfurt sausage obviously increased with the increased addition of curdlan ($p < 0.05$). Moreover, LF-NMR results confirmed that the incorporated curdlan restricted the mobility of the aqueous phase during the heating progress of Frankfurt sausage meat batter, and increased water binding capacity. Compared with control group, the addition of curdlan significantly increased the storage modulus values (G'), and loss modulus values (G'') and elasticity of Frankfurt sausage meat batter upon heating ($p < 0.05$). CLSM results showed that the addition of curdlan facilitated the formation of a closer microstructure in Frankfurt sausage. Therefore, curdlan could be used as quality improver to incorporate into Frankfurt sausage and its optimal dosage was 0.3%.

Key words: Frankfurt sausage; curdlan; low field nuclear magnetic resonance; rheological properties; microstructure

中图分类号: TS251.6*5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2017)19-0218-09

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2017.19.040

肉及肉制品中含有丰富的营养物质,是人体营养的重要来源。肉糜类低温肉制品由于加工过程中蛋白质变性适度,肉质结实富有弹性,能最大限度地保持原有营养成分和固有风味^[1],因此深受人们的欢迎。通常情况下,人们将肌肉蛋白和脂肪经过斩拌加工后形成的肉糜类制品(比如法兰克福香肠、维也纳香肠和博洛尼那香肠等)统称为“乳化肠”^[2]。这类产品中的脂肪颗粒直径大约为1~50 μm ,具有改

善产品硬度、提高产品多汁性以及提供良好风味等多种功能^[3]。

在实际生产中由于选料不当或工艺参数控制不科学,极易造成产品析水、析油、结构疏松和切片性差等问题。在肉制品中加入卡拉胶、黄原胶和亚麻籽胶等^[4]食用胶能有效地改善肌原纤维蛋白的乳化和凝胶特性,促使肌原纤维蛋白在加热和冷却后形成良好的三维凝胶网状结构,并充分乳化脂肪,进一

收稿日期: 2017-03-24

作者简介: 姜帅(1992-),女,在读硕士研究生,研究方向:畜产品加工, E-mail: Jiangshuai_1025@126.com。

* 通讯作者: 孔保华(1963-),女,博士,教授,研究方向:畜产品加工, E-mail: kongbh@163.com。

基金项目: 黑龙江省普通高等学校青年科技创新人才培养计划(UNPYSCT-2016006);东北农业大学“学术骨干”项目(16XG18)。

步改善加工特性,减少析水、析油现象,提高产品的品质和产量^[5]。近年来,可得然胶(Curdlan)作为食品主要成分或者食品品质改良剂,已经引起了许多学者的兴趣。可得然胶具有良好的凝胶性、持水性、增稠性和稳定性,并且加热后既能形成硬且有弹性的热不可逆性凝胶又能形成热可逆性凝胶。目前国内外关于可得然胶的研究主要集中在两个方面,第一方面是关于可得然胶的凝胶流变特性方面^[6],第二方面是关于可得然胶的添加对于淡水鱼糜制品品质影响的研究^[7-8],但可得然胶在肉制品中的应用研究较少。

本研究将可得然胶添加到法兰克福香肠中,探讨不同可得然胶添加量对法兰克福香肠的蒸煮损失、乳化稳定性、颜色、质构以及流变特性、微观及感官特性方面的影响,进而探索在该工艺条件下,适合法兰克福香肠生产的可得然胶的最佳添加量。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

冷鲜猪后道瘦肉、猪背膘 哈尔滨大润发超市北大荒肉业;复合磷酸盐、亚硝酸钠、异抗坏血酸钠 哈尔滨亿人食品添加剂公司;可得然胶 东京Dongye 国际的株式会社;白胡椒粉、肉豆蔻粉、姜粉、红辣椒粉 上海味好美食品有限公司;食盐 中盐上海市盐业公司;味精 上海太太乐食品有限公司;肠衣直径为18 mm的胶原蛋白肠衣 河北保定唯新肠衣有限公司。

125 型真空斩拌机 山东诸城威尔食品机械有限公司;30 型烟熏箱 诸城市兴和机械有限公司;真空灌肠机 临沂大浩机械厂;ZE-6000 色差计 日本色电工业株式会社;TA-XTplus 型质构分析仪 英国Stable Micro System 公司;GL-21M 高速冷冻离心机 湖南长沙湘仪离心机仪器有限公司;JD500-2 型电子天平 沈阳龙腾电子称量仪器有限公司;MC-SH2115型电磁炉 广州美的生活电器制造有限公司;DK-98-1 型电热恒温水浴锅 天津泰斯特仪器有限公司;Mq-20 低场核磁共振分析仪 德国布鲁克公司;TA 流变仪 Discovery DHR-1 美国TA 仪器公司;S-3400N 型激光共聚焦电子显微镜 日本日立公司。

1.2 实验方法

1.2.1 法兰克福香肠的配方 参考韩青荣^[9]的方法略有改动,法兰克福香肠的配方如表1所示。

1.2.2 法兰克福香肠的加工工艺流程 原料的选择与预处理→绞碎→冷藏→斩拌→灌制→干燥→烟熏→煮制→冷却→成品

1.2.3 法兰克福香肠的操作要点 参考韩青荣^[9]的

方法略有改动,原料的选择:选择经兽医卫生检验合格的猪肉作为原料,剔除可见筋膜修整后进行清洗,洗去血污等杂质。瘦肉以腿肉和臀肉为最好,脂肪以背部的脂肪为最好。

绞碎:用刀盘孔径为3 mm 的绞肉机分别将瘦猪肉和脂肪绞碎。

冷藏:将绞碎的原料肉在4℃冰箱中冷藏过夜12 h左右。

斩拌:首先,将瘦猪肉、食盐、复合磷酸盐、亚硝酸盐以及50%重量的碎冰共同放入斩拌机中,高速斩拌3~5 min;之后,再分别加入0、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%和0.5%(可得然胶与总肉重的质量比)的可得然胶、香辛料、味精等辅料高速斩拌3~5 min;再加入脂肪(事先3 mm筛孔绞好)和剩余的碎冰,继续高速斩拌;最后,在斩拌终点前加入异抗坏血酸钠,肠陷温度为12℃,即达到斩拌终点。

灌制:用灌肠机将肉馅灌入肠衣内(口径18 mm的胶原蛋白肠衣)。灌装时,要求均匀、结实。联结到所需长度,然后再盘绕起来。

干燥:在全自动一体化烟熏箱中进行,箱温45℃,湿度0,时间20 min,风速2档。烟熏:在全自动一体化烟熏箱中烟熏,箱温60℃,湿度0,时间30 min,风速2档。蒸煮:在全自动一体化烟熏箱中蒸煮,箱温78℃,湿度60%,时间30 min,风速2档,测定肠体温度达到72~74℃时即可。

冷却:肠体迅速从蒸煮箱中取出,放在冰水中浸泡,使肠体的中心温度迅速降低到30℃以下,捞出以后控干水分,迅速放入4℃成品间冷藏。冷藏10~12 h以后,将肠体进行真空包装。

1.2.4 肉糜蒸煮损失 参考Barbut等^[10]的方法略有改动,取35 g斩拌好的肉糜放入离心管中,以3000 r/min转速离心5 min排除管内气泡,将离心后的样品放在75℃的水浴锅中加热30 min,然后取出离心管放置于室温(20~22℃)下1 h,将离心管中溢出的液体倒入平板中。蒸煮损失计算公式如下:

蒸煮损失(%) = [加热前肉糜质量(g) - 加热后肉糜质量(g)] / 加热前肉糜质量(g) × 100

1.2.5 肉糜乳化稳定性 参考Colmenero等^[11]的方法略有改动,将1.2.4中蒸煮损失的液体(离心管倒立40 min)倒入玻璃平皿中,水分散失为蒸煮损失的液体在105℃加热16 h烘干后减轻的重量,而脂肪散失为蒸煮损失的液体烘干后剩余的样品重量。因此水分散失量和脂肪散失量计算公式^[12]如下:

水分损失率(%) = 加热散失的水分(g) / 生肉糜的质量(g) × 100

脂肪损失率(%) = 加热后剩余的质量(g) / 生肉糜的质量(g) × 100

表1 法兰克福香肠的配方
Table 1 Formula of Frankfurt sausage

配料	重量(kg)	配料	重量(g)	配料	重量(g)	配料	重量(g)
瘦猪肉	2.5	食盐	75	白胡椒粉	15	姜粉	15
肥膘	1.25	亚硝酸盐	0.375	肉豆蔻粉	12.5	味精	2.5
冰水化合物	1.25	复合磷酸盐	20	红辣椒粉	12.5	异抗坏血酸钠	5

表2 感官评价标准

Table 2 The standard of sensory evaluation

评价指标	评分标准(满分9分)		
	7~9分	4~6分	1~3分
色泽	色泽金黄有食欲,有光泽	色泽一般,食欲差,光泽一般	色泽苍白无食欲,光泽较差
滋味	肠香味浓郁,无异味	肠香味欠缺,稍有异味	肠香味很淡,有异味
组织状态	切面光滑、肉质紧密、弹性好	切面略粗糙、肉质一般、弹性稍欠	切面粗糙、肉质疏松、弹性稍欠
口感	肉质细腻,耐嚼,回味好	肉质略微柴感,干涩,回味较好	肉质有柴感、硬感,回味差
总体可接受性	高(喜欢)	适中	低(不接受)

1.2.6 香肠颜色测定 将4℃贮藏的法兰克福香肠放置在室温(20~22℃)下平衡1h,用色差计测定法兰克福香肠的 L^* 值、 a^* 值和 b^* 值, L^* 、 a^* 、 b^* 分别表示样品的亮度值、红度值和黄度值。白板色度值 L^* 为96.22, a^* 为6.03, b^* 为15.06,选择O/D测试头。

1.2.7 香肠质构分析(TPA) 质构分析主要是模拟人口腔的咀嚼运动,对固体或半固体样品进行两次压缩测试两次咀嚼测试,与计算机连接通过界面输出如硬度、弹性、胶黏性、咀嚼性、回复性等指标及测试的特征曲线^[13],能在肉制品检测中客观反映出肉制品的食用品质。测定结果主要取硬度、弹性、咀嚼性和粘聚性,其中硬度和咀嚼性的单位以牛顿(N)表示。将4℃贮藏的法兰克福香肠放置在室温(20~22℃)下平衡1h,剥去肠衣用刀片将其切成2cm长的圆柱,每批制作10个平行样品。测定参数如下:测试前速度为5mm/s,测试速度为1mm/s,测试后速度为1mm/s,压缩比为50%,触发力为5g,探头型号为P/50。

1.2.8 香肠内部水分动态分布的测定 参考Aursand等^[14]的方法,将法兰克福香肠样品放在专用试管中(试管直径为1.8cm,高度为18cm),LF-NMR分析仪的磁场强度为0.47T,质子共振频率为20MHz。使Carr-Purcell-Meiboom-Gill(CPMG)程序测定肉样中的 T_2 。每个样品测定时程序自动扫描16次,每次扫描重复的间隔时间为2s。测定后的每个样品的 T_2 ,通过其自带软件CONTIN进行反演,反映出相应的弛豫时间(T_{2b} 、 T_{21} 和 T_{22})。

1.2.9 肉糜动态流变特性的测定 参考Yang等^[15]的方法略作改动,用取样器取约5g斩拌好的生肉糜样品,均匀涂于平板的下表面(40mm直径)中心,驱动平板上表面缓慢下降,机器自动调节间距,平行板外肉糜与空气接触处用石蜡封住以防止水分蒸发。测试参数为:频率为1Hz,恒定应力为0.012,上下板夹缝为0.5mm,以1℃/min的速率从20℃升温到80℃。测定不同样品的储能模量(G')和损耗模量(G'')及相位角正切($\tan\delta$)的变化,每个样品测定三次。

1.2.10 香肠微观结构分析 参照Liu和Irmischer^[16-17]的方法略作改动,利用激光共聚焦扫描显微镜观察法兰克福香肠的微观结构。将4℃贮藏的法兰克福香肠放置在室温(20~22℃)下平衡1h,用专用刀片切成约5mm×5mm×1mm的薄片置于载玻片上,在香肠切片表面滴加20μL的0.2%的尼罗红溶液,室温下避光静置10min,再滴加20μL的

0.02%的尼罗红溶液,在激光共聚焦显微镜下观察并对图像进行采集和组合。尼罗蓝染料和尼罗红染料的激发光波长分别为633nm和488nm。

1.2.11 香肠感官评价 参考Gök等^[18]的方法并做适当改动,邀请10名从事食品专业且经过专门感官训练培训的研究生,其中5男5女,组成评定小组,采用双盲法进行检验。主要对产品的色泽、气味、组织状态、口感和整体可接受性进行评定,每项指标的最高得分为9分,最低为1分,根据评分来判定样品的优劣,评价标准^[18]如表2所示:

1.2.12 数据统计分析 每个实验重复三次,结果表示为平均数±标准差。数据统计分析采用Statistix 8.1分析软件(美国Analytical Software公司)软件包中Linear Models程序进行,差异显著性($p < 0.05$)分析使用Tukey HSD程序。采用Sigmaplot 12.5软件(美国Systat Software公司)作图。用SPSS 22.0分析软件(美国IBM公司)进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 肉糜蒸煮损失和乳化稳定性

蒸煮损失和乳化稳定性是决定乳化肠品质和感官质量的重要指标。由表3可以看出,与对照组相比,随着可得然胶添加量的增加,肉糜的蒸煮损失显著降低($p < 0.05$),这可能是由于可得然胶能束缚住更多的水分,从而可以有效的减少肉糜在蒸煮过程中水分的流失。Hu等^[19]研究表明,在肉糜加热过程中,可得然胶能够以一种高位凝胶的形式吸收大量的水分,而且可得然胶的添加量越大,其束缚的水分越多,从而导致蒸煮损失的下降。就该产品配方而言,添加0.3%和0.4%可得然胶的肉糜,其蒸煮损失基本上没有显著差异($p > 0.05$),而添加0.5%可得然胶的肉糜基本上不存在蒸煮损失。与此同时,可得然胶的添加能够明显降低加热后肉糜的水分损失率和脂肪损失率($p < 0.05$),而且在添加量达到0.5%时,基本上没有任何水分和脂肪的损失。另外,可得然胶的添加能够明显降低加热后肉糜的水分与脂肪损失比($p < 0.05$)。由此可得,可得然胶的添加有效地提高了法兰克福香肠的保水保油性,同时提高了产品的乳化稳定性,改善了香肠的整体的品质。

2.2 香肠的颜色

不同添加量的可得然胶对香肠颜色的影响如表4所示,与对照组相比,随着可得然胶添加量的增加,香肠的亮度值和黄度值显著增加($p < 0.05$);而香肠的红度值无显著变化($p > 0.05$)。Marchessault等^[20]

表3 不同可得然胶添加量对法兰克福香肠肉糜蒸煮损失和乳化稳定性的影响

Table 3 Cooking losses and emulsion stability of Frankfurt sausage meat batter added with different concentration of curdlan

可得然胶添加量 (%)	蒸煮损失 (%)	水分损失率 (%)	脂肪损失率 (%)	水分/脂肪损失比 (%/%)
0	5.29 ± 0.09 ^a	13.81 ± 0.33 ^a	1.34 ± 0.02 ^a	10.33 ± 0.36 ^a
0.1	4.28 ± 0.04 ^b	11.01 ± 0.32 ^b	1.19 ± 0.02 ^b	9.28 ± 0.33 ^b
0.2	1.06 ± 0.05 ^c	2.59 ± 0.02 ^c	0.43 ± 0.01 ^c	6.02 ± 0.11 ^d
0.3	0.94 ± 0.03 ^d	2.30 ± 0.07 ^{cd}	0.35 ± 0.02 ^d	6.66 ± 0.45 ^{cd}
0.4	0.81 ± 0.05 ^d	2.02 ± 0.02 ^d	0.29 ± 0.01 ^e	6.97 ± 0.17 ^e
0.5	0.09 ± 0.03 ^e	n.d	n.d	n.d

注:数据表示为平均值 ± 标准差(n = 3)。a~e 在同一列字母中,相同表示差异不显著($p > 0.05$),不同则表示差异显著($p < 0.05$)。n.d 表示未检出,表 4~表 6 同。

表5 不同可得然胶添加量对法兰克福香肠质构的影响

Table 5 Texture profiles of Frankfurt sausage added with different concentration of curdlan

可得然胶添加量 (%)	硬度(N)	弹性(mm)	粘结性	咀嚼性 (N × mm)	回复性 (ratio)
0	17.03 ± 0.03 ^e	0.92 ± 0.01 ^c	0.76 ± 0.01 ^d	12.48 ± 0.02 ^e	0.41 ± 0.01 ^d
0.1	17.85 ± 0.02 ^d	0.93 ± 0.01 ^b	0.78 ± 0.01 ^c	12.91 ± 0.03 ^c	0.44 ± 0.01 ^{ab}
0.2	18.94 ± 0.02 ^c	0.94 ± 0.01 ^a	0.79 ± 0.01 ^{bc}	12.98 ± 0.02 ^b	0.43 ± 0.01 ^{bc}
0.3	19.13 ± 0.01 ^b	0.94 ± 0.01 ^a	0.80 ± 0.01 ^{ab}	13.19 ± 0.03 ^a	0.45 ± 0.01 ^a
0.4	19.17 ± 0.01 ^b	0.93 ± 0.01 ^b	0.81 ± 0.01 ^a	12.73 ± 0.03 ^d	0.43 ± 0.01 ^{cd}
0.5	19.36 ± 0.03 ^a	0.93 ± 0.01 ^b	0.81 ± 0.01 ^a	12.36 ± 0.02 ^f	0.43 ± 0.01 ^{cd}

研究发现由于可得然胶自身的螺旋结构具有一定的旋光性,因此其晶体结构中存在大量的氢键,这些氢键可以结合更多的水分,因此能够提高肉制品的亮度^[21]。本实验中随着可得然胶的加入,香肠的蒸煮损失降低,也说明了蛋白凝胶的网络内水分含量增加,因而增加了香肠的亮度值。Jung 等^[22]表明猪肉的红度值和高铁肌红蛋白的含量关系密切,而本实验添加可得然胶对香肠红度值影响不显著,这说明添加可得然胶对高铁肌红蛋白没有显著的影响。

表4 不同可得然胶添加量对法兰克福香肠颜色的影响

Table 4 Color of Frankfurt sausage added with different concentration of curdlan

可得然胶 添加量(%)	L^*	a^*	b^*
0	64.41 ± 0.15 ^f	10.42 ± 0.29 ^a	14.24 ± 0.27 ^d
0.1	64.81 ± 0.17 ^e	10.54 ± 0.54 ^a	14.71 ± 0.19 ^{cd}
0.2	65.42 ± 0.15 ^d	10.86 ± 0.17 ^a	15.07 ± 0.12 ^{bc}
0.3	66.36 ± 0.12 ^c	10.92 ± 0.21 ^a	15.09 ± 0.28 ^{bc}
0.4	66.86 ± 0.05 ^b	10.88 ± 0.22 ^a	15.59 ± 0.17 ^b
0.5	67.26 ± 0.09 ^a	11.23 ± 0.52 ^a	16.30 ± 0.34 ^a

2.3 香肠的质构分析

不同可得然胶添加量对法兰克福香肠质构的影响如表 5 所示,与对照组相比,随着可得然胶添加量的添加,香肠的硬度显著增强($p < 0.05$)。肌原纤维蛋白在加热过程中,蛋白质分子适度变性,分子结构被打开后,部分活性基团暴露出来,使得肌原纤维蛋白会具有较高的表面活性,蛋白分子间发生相互作用形成三维网络结构^[23]。在添加可得然胶的处理组中,由于可得然胶主要成分为可溶性多糖,其本身具

有较好的凝胶性,溶于水即可形成结构稳定的凝胶^[24],因此将其加入到肌原纤维蛋白中,多糖分子与肌原纤维蛋白可以相互交联形成了更加稳定的三维网络结构,从而使肌原纤维蛋白凝胶强度增大,提高了产品的硬度和弹性。同时可以看出,随着可得然胶添加量的增加,香肠的硬度、弹性、粘结性、咀嚼性和回复性都显著增强($p < 0.05$),这是由于可得然胶的吸水能力极强,加热后能够吸收相当于自身质量约 100 倍的水量^[24],因此能改善肉糜的品质。然而,在可得然胶添加量从 0.3% 增加到 0.5% 时,法兰克福香肠的粘结性变化差异不显著($p > 0.05$),且 0.3% 组的弹性、回复性、咀嚼性最高,因此说明,0.3% 的可得然胶的添加在一定程度上就能够显著提高法兰克福香肠的质构特性。

2.4 应用 LF-NMR 测定香肠内部水分的动态分布

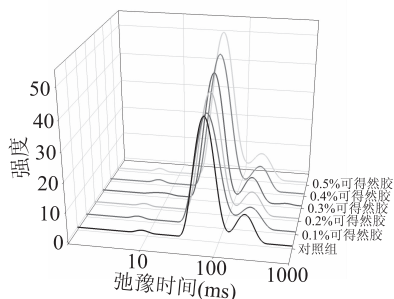
LF-NMR 能够反映出热诱导的肌原纤维蛋白凝胶内部水分的流动性及分形系数的变化,肌原纤维蛋白中肌节长度和肌丝空间与保水性关系以及肌原纤维蛋白的持水性在蒸煮过程中的变化^[25],因此在肉及肉制品的测量中多用横向弛豫时间 T_2 来间接表明水分的自由度^[26]。不同处理组法兰克福香肠样品的 T_2 弛豫时间分布如图 1,计算出来的弛豫时间见表 6。

由表 6 可见,香肠的核磁衰减信号被拟合为 3 个峰,出现在 4.20~9.00,43.23~58.60、184.00~217.00 ms 之间,分别代表着香肠制品存在的结合水(T_{2b})、不易流动水(T_{21})和自由水(T_{22})的分布情况,即三种水分与肉的结合情况和自由移动程度。从图 1 可看出,与对照组相比,添加可得然胶的处理组中每种水分的弛豫时间均向弛豫时间短的方向移动且其强度显

表6 不同可得然胶添加量对法兰克福香肠横向弛豫时间(T_{2b} , T_{21} 和 T_{22})及振幅(A_{2b} , A_{21} 和 A_{22})的影响Table 6 Changes of relaxation times(T_{2b} , T_{21} , and T_{22}) and amplitudes (A_{2b} , A_{21} , and A_{22}) of Frankfurt sausage added with different concentration of curdlan

可得然胶 添加量(%)	T_{2b} (ms)	T_{21} (ms)	T_{22} (ms)	A_{2b}	A_{21}	A_{22}
0	8.00 ± 1.00^a	58.00 ± 0.60^a	211.00 ± 6.00^a	1.00 ± 0.01^a	41.00 ± 1.00^d	9.90 ± 0.36^a
0.1	5.80 ± 1.00^{ab}	47.20 ± 0.30^c	192.00 ± 6.00^{ab}	1.00 ± 0.01^a	37.67 ± 0.58^e	7.50 ± 0.50^b
0.2	5.60 ± 0.90^b	51.40 ± 0.20^b	205.00 ± 6.00^{ab}	1.00 ± 0.01^a	40.67 ± 0.58^d	8.33 ± 0.58^{ab}
0.3	4.90 ± 0.70^b	47.90 ± 0.20^c	190.00 ± 10.00^b	1.00 ± 0.01^a	44.00 ± 1.00^c	8.67 ± 0.58^{ab}
0.4	5.57 ± 0.42^b	51.80 ± 0.20^b	206.00 ± 10.00^{ab}	0.67 ± 0.57^a	47.33 ± 0.58^b	9.33 ± 0.58^a
0.5	7.00 ± 0.90^{ab}	52.30 ± 0.60^b	192.00 ± 5.00^{ab}	1.00 ± 0.01^a	49.33 ± 1.15^a	9.17 ± 0.76^a

著降低($p < 0.05$), 尤其是不易流动水的弛豫时间移动的最显著, 这说明香肠中原有的不易流动水与肉中蛋白结合更加紧密, 但由于可得然胶为亲水性胶体, 它易与水分子通过疏水键和氢键相结合, 因此在蒸煮加热过程中可得然胶与大量的自由水结合, 使其转变为不易流动水^[27]。但在可得然胶添加量较高(0.4%和0.5%)时, 横向弛豫时间的移动性差异不显著。这可能是在蒸煮加热时, 可得然胶在由单螺旋链向三螺旋结构转变的过程中与肌原纤维蛋白等大分子紧密结合^[28], 形成致密的三维网络结构, 因而能束缚住部分的不易流动水, 使其转变为结合水, 但由于可结合的肌原纤维蛋白等大分子的数量一定, 随着可得然胶添加量的增加, 由二者间的转变与蛋白间的形成的三维网络结构达到饱和, 所以不易流动水数量不再发生改变。

图1 添加不同浓度可得然胶的法兰克福香肠横向弛豫时间(T_2)分布的变化Fig.1 Distribution of T_2 relaxation times of Frankfurt sausage added with different concentration of curdlan

有研究表明, 低场核磁图像中弛豫时间(T)及其对应的强度(A)能显著的反映出这三种水分群在肌肉中的分布, CONTIN 直观的解释了肌肉结构中不同水分的变化, 而双指数分析也起到一定的对照作用^[29], 从而可以间接的反映各种状态水分的相对比例及不同状态水分间的转移变化情况。

由表6可知, 随着可得然胶添加量的增加, A_{21} 呈现逐渐增加的趋势($p < 0.05$), 这说明随着可得然胶的添加, 香肠凝胶中不易流动水的强度增大, 然而可得然胶添加对 A_{2b} 和 A_{22} 整体上无显著影响($p > 0.05$), 这可能是由于结合水是与肉中蛋白质紧密结合的水, 可得然胶的添加很难影响结合水的迁移。

有研究表明, 可得然胶分散液在加热过程中发生溶胀, 并促使蛋白质分子间发生相互作用, 形成更多的氢键, 同时溶胀的可得然胶可将蛋白质分子包埋, 使蛋白质分子间的疏水性相互作用增加^[8,30]。同时, 在蒸煮过程中添加可得然胶还可以促进二硫键的生成, 而疏水性相互作用和二硫键是维持肌肉蛋白凝胶特性的主要的化学作用力^[7], 因此添加可得然胶可以有效地提高凝胶强度, 且本实验结果表明, 0.3%的可得然胶添加能显著增强对水分子的束缚能力, 可以显著的改善香肠品质。

2.5 肉糜的动态流变特性

G' (储能模量)代表弹性和刚度部分, 由图2可以看出, 在20~45℃时, 香肠样品的凝胶弹性呈先下降后趋平的趋势, 在45~60℃之间, 呈现先增加后减少的趋势且在53℃到达峰值, 在60~80℃, 凝胶弹性呈显著上升的趋势。

在 G' 的初始阶段, 即峰值温度为53℃时, 开始形成结构疏松的凝胶。肌球蛋白的结构发生改变, 大多数的肌球蛋白分子发生部分的聚集^[31]。随着温度继续升高, G' 逐渐减少, 这是因为肌球蛋白尾部的螺旋被打开, 向线圈结构转变, 因此可能破坏一些已经形成的蛋白质网络, 使半凝胶的流动性大幅提高^[32]。当峰值温度高于75℃时, G' 呈现上升的趋势, 凝胶强度逐渐增大。从图2可以看出, 随着可得然胶的添加量从0增加到0.5%时, 对应的 G' 最大值分别为9161.36、10828.10、10420.05、11132.50、11757.20、11402.50 Pa, 即适量的可得然胶存在可以提高样品凝胶的 G' , 但过量反而使 G' 减小, 可得然胶添加量大于0.3%, 凝胶的弹性显著提高。这说明可得然胶的添加可以增加肌原纤维蛋白的凝胶弹性, 使得凝胶中分子间的交联结构更加致密。有文献研究表明, 大多数的肌球蛋白分子在适度变性过程中可能展开并形成随机线性结构, 它可以增加蛋白质聚集体之间的聚集和交叉连接; 同时, 在蛋白质网络中存在的一些变性蛋白的沉积也可以增强凝胶基质, 因此形成稳固空间的网络结构^[33]。毕崇浩等^[34]研究大豆分离蛋白-刺槐豆胶混合凝胶样品发现, 刺槐豆胶的加入和浓度的上升可以引起蛋白聚合物相对密度的增加, 加入了刺槐豆胶后混合凝胶体系的凝胶结构更趋于固体, 弹性增大。可得然胶在由单分子链转变为三螺旋结构的过程中也会与肌

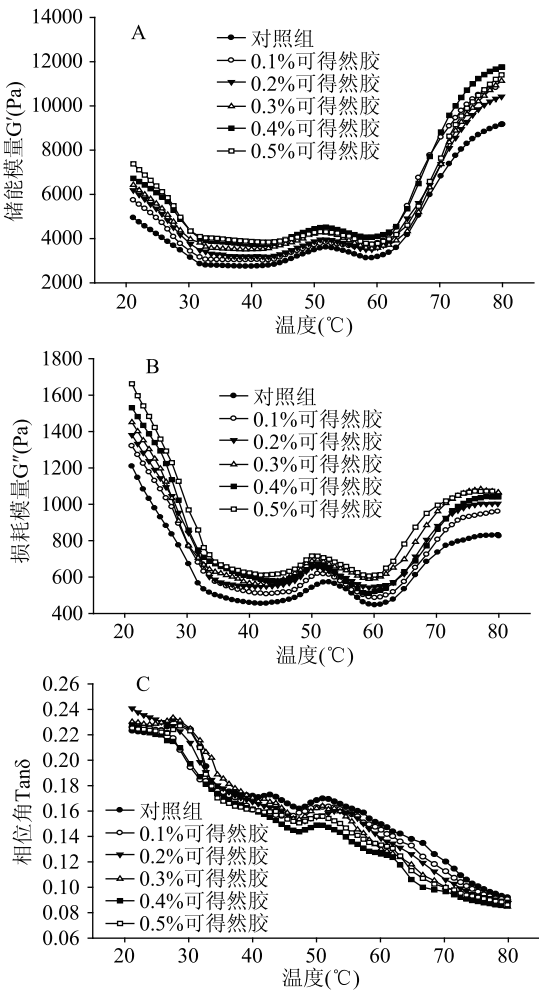


图2 添加不同浓度可得然胶对法兰克福香肠肉糜流变特性的影响
Fig.2 Effect of different concentration of curdlan on the rheological properties

原纤维蛋白相互交织,从而导致蛋白质的聚集,而使G'增大^[29]。

G''(损耗模量)代表黏性和流动性部分,不同可得然胶添加量的G''变化趋势与G'一致,即可得然胶可以形成具有粘弹性的网络结构来促进凝胶的形成。加热促进了可得然胶三螺旋的尾端松动,减弱了分子间的氢键相互作用,因此结构疏松的水分子脱离束缚,使凝胶粘性急速升高。当可得然胶在75℃加热后,可得然胶单分子链大部分转变为三螺旋结构并与变性蛋白质相互交织,增强了蛋白质原有的三维网状结构。

Tanδ(相位角正切)反映凝胶中弹性和黏性组分的相对含量,表示为G''(储能模量)和G'(耗能模量)的比值。Tanδ越小则凝胶的粘性较小弹性较大^[32]。由图2可以看出,当可得然胶添加量从0增加到0.5%时,其对应Tanδ分别为0.0921、0.0905、0.0877、0.0847、0.0856和0.0862,Tanδ主要表现为随着可得然胶浓度的增加逐渐降低的变化趋势,这表明肌原纤维蛋白与可得然胶混合样品的G''随温度和浓度变化增速的慢于G',香肠样品更趋于弹性,即可得然胶增加了分子链间互相连接的可能性从而使混合凝胶

形成更强的网络结构。浓度较高(0.4%和0.5%)时,香肠样品的粘弹性变化并没有随浓度的增加而显著降低,可能由于过高浓度的可得然胶使蛋白内部的粘弹性变化已达到饱和,导致粘弹性差异不显著。Jian等人^[35]研究发现在罗非鱼中添加魔芋葡甘聚糖可以改善其流变特性,魔芋葡甘聚糖可以填埋凝胶中的孔洞,从而增强凝胶网络的结构。Kerry等人^[36]研究发现在猪肉混合物中添加多糖和乳清蛋白能减少蒸煮损失,改善凝胶的流变性能,从而提高肉制品的粘弹性等。之前的研究也证明,在肉中添加乳清蛋白、大豆分离蛋白、卡拉胶、果胶以及变性淀粉等会提高凝胶的G'。

2.6 应用 CLSM 观察香肠的微观结构

由图3可以看出,在对照组的香肠样品中,凝胶的结构疏松甚至出现大的孔洞,并且凝胶的分布不均匀。然而,随着可得然胶添加量的增加,香肠中脂肪和蛋白质的结合越来越紧密,大的孔洞也逐渐消失,在可得然胶添加量大于0.3%后,其改善香肠质地的效果更加显著。这一实验结果与Zhang等^[37]研究魔芋葡甘聚糖能显著改变凝胶网络结构的结论类似,即可得然胶的添加可以使网络框架更紧凑且减少其中的孔洞,形成一个相对均匀分散相,束缚住更多的水分以减少自由水的散失。这可能是由于可得然胶与蛋白质之间的相互作用,使得凝胶网络结构加强,或者由于长链多糖的空间位阻效应阻碍蛋白质分子的聚集。W等^[38]研究可得然胶的分子结构及其凝胶机制时发现可得然胶分子绝大部分呈三螺旋构象,螺旋链与链间的水分子通过氢键结合形成胶束区,胶束间缠绕构成可得然胶凝胶网络。在低强度凝胶中,可得然胶的分子胶束主要是以单螺旋的形式与内部的水分子通过氢键结合,其主要作用力是氢键;而高强度凝胶中,大部分可得然胶分子以三螺旋形式存在,其主要作用力是疏水相互作用。因此,高强度凝胶与肉中蛋白形成三维网络结构比低强度凝胶结合的更致

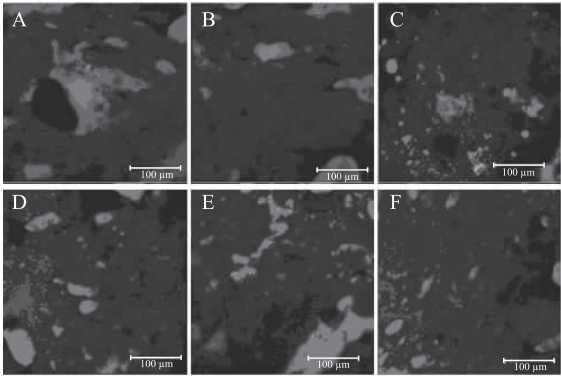


图3 添加不同浓度的可得然胶香肠样品的激光共聚焦 (CLSM) 显微图(400 ×)
Fig.3 Typical CLSM micrographs at 400 × magnification of Frankfurt sausage added with different concentration of curdlan(400 ×)

注:A、B、C、D、E、F代表添加不同浓度的可得然胶(0、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%)的香肠样品同时在488 nm和633 nm的激发波长下的叠加图片。

表7 不同浓度的可得然胶对法兰克福香肠感官质量的影响

Table 7 Sensory quality of Frankfurt sausage added with different concentration of curdlan

可得然胶添加量(%)	色泽	气味	组织状态	口感	总体接受性
0	6.20 ± 0.27 ^c	6.46 ± 0.46 ^a	6.10 ± 0.42 ^b	6.50 ± 0.35 ^b	6.30 ± 0.76 ^b
0.1	6.62 ± 0.39 ^{bc}	6.96 ± 0.36 ^a	6.90 ± 0.42 ^{ab}	6.96 ± 0.36 ^{ab}	6.86 ± 0.22 ^{ab}
0.2	7.10 ± 0.42 ^{ab}	7.00 ± 0.61 ^a	6.92 ± 0.40 ^{ab}	7.36 ± 0.35 ^a	7.20 ± 0.57 ^{ab}
0.3	7.30 ± 0.45 ^{ab}	7.20 ± 0.57 ^a	7.40 ± 0.65 ^a	7.56 ± 0.44 ^a	7.40 ± 0.42 ^a
0.4	7.56 ± 0.38 ^a	7.20 ± 0.57 ^a	7.46 ± 0.46 ^a	7.40 ± 0.42 ^a	7.50 ± 0.50 ^a
0.5	7.10 ± 0.42 ^{bc}	7.30 ± 0.27 ^a	7.46 ± 0.46 ^a	7.20 ± 0.27 ^{ab}	7.40 ± 0.42 ^a

注:分值为7.5~8 很好;7~7.5 较好;6.5~7 一般;6~6.5 可接受;6 以下为差,不可接受。数据表示为平均值 ± 标准差(n = 3)。a~e 在同一列字母中,相同表示差异不显著($p > 0.05$),不同则表示差异显著($p < 0.05$)。

表8 法兰克福香肠5种理化指标间的相关性分析

Table 8 Correlation analysis among five physicochemical indexes in Frankfurt sausage

项目	指标	蒸煮损失	水分损失率	脂肪损失率	L^*	b^*	硬度	弹性	粘聚性	T_{21}	A_{21}
蒸煮损失	模型 p 值	1	1.000 **	0.991 **	-0.903 *	-0.860 *	-0.989 **	-0.664	-0.935 **	0.329	-0.740
	R^2		0.000	0.000	0.014	0.028	0.000	0.150	0.006	0.524	0.093
水分损失率	模型 p 值	1.000 **	1	0.991 **	-0.902 *	-0.861 *	-0.990 **	-0.667	-0.936 **	0.335	-0.737
	R^2	0.000		0.000	0.014	0.028	0.000	0.148	0.006	0.516	0.095
脂肪损失率	模型 p 值	0.991 **	0.991 **	1	-0.937 **	-0.903 *	-0.972 **	-0.574	-0.936 **	0.253	-0.813 *
	R^2	0.000	0.000		0.006	0.014	0.001	0.234	0.006	0.629	0.049
L^*	模型 p 值	-0.903 *	-0.902 *	-0.937 **	1	0.936 **	0.900 *	0.351	0.960 **	-0.237	0.917 **
	R^2	0.014	0.014	0.006		0.006	0.014	0.496	0.002	0.652	0.010
b^*	模型 p 值	-0.860 *	-0.861 *	-0.903 *	0.936 **	1	0.852 *	0.280	0.906 *	-0.199	0.855 *
	R^2	0.028	0.028	0.014	0.006		0.031	0.590	0.013	0.705	0.030
硬度	模型 p 值	-0.989 **	-0.990 **	-0.972 **	0.900 *	0.852 *	1	0.703	0.961 **	-0.454	0.693
	R^2	0.000	0.000	0.001	0.014	0.031		0.119	0.002	0.365	0.127
弹性	模型 p 值	-0.664	-0.667	-0.574	0.351	0.280	0.703	1	0.525	-0.698	0.020
	R^2	0.150	0.148	0.234	0.496	0.590	0.119		0.285	0.123	0.970
粘聚性	模型 p 值	-0.935 **	-0.936 **	-0.936 **	0.960 **	0.906 *	0.961 **	0.525	1	-0.442	0.780
	R^2	0.006	0.006	0.006	0.002	0.013	0.002	0.285		0.381	0.068
T_{21}	模型 p 值	0.329	0.335	0.253	-0.237	-0.199	-0.454	-0.698	-0.442	1	0.154
	R^2	0.524	0.516	0.629	0.652	0.705	0.365	0.123	0.381		0.771
A_{21}	模型 p 值	-0.740	-0.737	-0.813 *	0.917 **	0.855 *	0.693	0.020	0.780	0.154	1
	R^2	0.093	0.095	0.049	0.010	0.030	0.127	0.970	0.068	0.771	

注: $p \leq 0.1$ 具有相关性(双尾),*表示在 $p = 0.05$ 显著相关(双尾);**表示在 $p = 0.01$ 极显著相关(双尾)。

密。Wu 等^[39]研究证明,随着可得然胶添加量的增加,在鱼糜凝胶中的可得然胶与蛋白质间的相互交联更加紧密,形成的凝胶结构也更致密,凝胶强度也更大,硬度指标也能很好证明这一点。

2.7 香肠的感官评价

由表7可以看出,与对照组相比,添加可得然胶的实验组,产品的光泽、组织状态、口感和总体接受性均呈上升趋势($p < 0.05$)。对照组产品颜色发暗,组织状态疏松多孔口感发柴弹性和咀嚼性较差,其总起接受性差。随着可得然胶浓度的增加,尤其是组织状态、口感和总体接受性表现出显著的增加($p < 0.05$),添加可得然胶的处理组较有光泽、口感细腻、质地均一致密,能明显改善香肠品质特性($p < 0.05$),这一结果也与质构分析的结果相一致。由此可知,在香肠中添加可得然胶能减少产品的水分和油脂流失,束缚住更多的营养物质从而改善产品品

质。综合经济角度在该工艺条件下,可得然胶最佳添加量为0.3%。

2.8 香肠的相关性分析

用SPSS 22.0 软件对法兰克福香肠的蒸煮损失、乳化稳定性(水分损失率和脂肪损失率)、颜色(L^* 和 b^*)、质构特性(硬度、弹性和粘聚性)和水分的动态分布(T_{21} 和 A_{21})进行相关性分析。由表8相关性结果可知,蒸煮损失、水分损失率和脂肪损失率呈极显著正相关,这也与三者间的计算公式有关。黄度值与亮度值呈极显著正相关,且与硬度、粘聚性呈显著正相关,Warriss 等^[40]的研究表明,亮度值与黄度值均是肉色等级重要的指示值且存在密切相关性,此外据 Warner 等^[41]报道,沃氏剪切力(WBS)、硬度等与黄度值有较高相关性。亮度值与蒸煮损失、乳化稳定性呈显著负相关,与硬度、粘聚性呈显著正相关,根据 Hong 等^[21]的报道,香肠亮度值与水分含量密切

相关,随着可得然胶添加量的增加,香肠蒸煮损失减小,水分损失率和脂肪损失率降低,乳化稳定性提高,则香肠中水分含量增加,亮度值必然上升;随着香肠水分含量的增加,蛋白凝胶网络结构中束缚的水分子相对增加,蛋白结构趋于致密,从而使凝胶强度增大,因此香肠的硬度和粘聚性也随之增大^[33]。

3 结论

在法兰克福香肠中添加可得然胶能有效的改善香肠的品质,减少香肠的蒸煮损失,降低水分损失率和脂肪损失率,从而提高香肠的乳化稳定性,且能提高香肠的弹性、粘结性和咀嚼性并改善香肠光泽。低场 NMR 结果显示,随着可得然胶添加量的增加不易流动水(弛豫时间 T_{21})向短的弛豫方向移动,可得然胶与大量的水分子通过疏水键和氢键结合使其转变为不易流动水,能有效束缚住更多的水分从而使凝胶强度增强,使香肠硬度提高,口感更加紧实致密。流变特性表明,可得然胶的添加能够显著提高法兰克福肉糜的储能模量、损失模量以及弹性,使产品品质得以改良,感官评定中随着可得然胶的添加量的增加其得分值也呈增加的趋势,而从微观结构中可以看出可得然胶能填充肌原纤维蛋白三维结构中的孔隙增加其交联密度使结构更加均匀稳定。因此可得然胶可以作为品质改良剂应用于肉制品加工中,且根据本文的实验结果并结合实际生产的经济可使用性,在该工艺条件下,可得然胶在法兰克福香肠中添加量为 0.3% 较适宜。

参考文献

- [1] 汪张贵,闫利萍,彭增起,等.脂肪剪切乳化和蛋白基质对肉糜乳化稳定性的重要作用[J].食品工业科技,2011(8):466-469.
- [2] Baker R C, Darfler J, Vadehra D V. Type and level of fat and amount of protein and their effect on the quality of chicken frankfurters[J]. Food Technology, 1969, 23(6):100-103.
- [3] Álvarez D, Castillo M, Payne F A, et al. A novel fiber optic sensor to monitor beef meat emulsion stability using visible light scattering[J]. Meat Science, 2009, 81(3):456-466.
- [4] 钱毅玲,赵谋明,赵强忠.亲水胶体在乳化肠体系的 Plackett-Burman 法筛选中的应用[J].食品科学,2009,30(22):192-196.
- [5] 芦嘉莹,夏秀芳,孔保华,等.复配食用胶对乳化肠品质的影响[J].食品科学,2013,34(5):31-35.
- [6] Funami T, Nishinari K. Gelling characteristics of Curdlan aqueous dispersions in the presence of salts [J]. Food Hydrocolloids, 2007, 21(1):59-65.
- [7] 刘文娟,陈瑶,姜晴晴,等.可得然胶对带鱼肌肉蛋白凝胶特性的影响[J].现代食品科技,2014(9):126-133.
- [8] 丁丽丽,郭宏明,吴俊,等.可得然胶在淡水鱼糜制品中的应用研究[J].食品工业科技,2015,36(17):262-264.
- [9] 韩青荣.实用香肠加工工艺[M].天津科学技术出版社,1995.
- [10] Álvarez D, Barbut S. Effect of inulin, β -Glucan and their

- mixtures on emulsion stability, color and textural parameters of cooked meat batters[J]. Meat Science, 2013, 94(3):320-327.
- [11] Colmenero F J, Ayo M J, Carballo J. Physicochemical properties of low sodium frankfurter with added walnut: effect of transglutaminase combined with caseinate, KCl and dietary fibre as salt replacers[J]. Meat Science, 2005, 69(4):781-8.
 - [12] Ensor S A, Mandigo R W, Calkins C R, et al. Comparative Evaluation of Whey Protein Concentrate, Soy Protein Isolate and Calcium-Reduced Nonfat Dry Milk as Binders in an Emulsion-Type Sausage [J]. Journal of Food Science, 1987, 52(5):1155-1158.
 - [13] Caine W R, Aalhus J L, Best D R, et al. Relationship of texture profile analysis and Warner-Bratzler shear force with sensory characteristics of beef rib steaks[J]. Meat Science, 2003, 64(4):333-9.
 - [14] Aursand I G, Gallart-jornet L, Erikson U, et al. Water distribution in brine salted cod (*Gadus morhua*) and Salmon (*Salmo salar*): A low-field LF-NMR study [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(15):6252-6260.
 - [15] Yang H, Khan M A, Yu X, et al. Changes in protein structures to improve the rheology and texture of reduced-fat sausages using high pressure processing[J]. Meat Science, 2016, 121:79-87.
 - [16] Liu W, Lanier T C. Combined use of variable pressure scanning electron microscopy and confocal laser scanning microscopy best reveal microstructure of comminuted meat gels [J]. LWT - Food Science and Technology, 2015, 62(2):1027-1033.
 - [17] Irmischer S B, Terjung E M, Gibis M, et al. Substitution of ice by a curing salt solution during meat batter production using the vane pump-grinder technology [J]. LWT - Food Science and Technology, 2016, 68:439-445.
 - [18] Veli G, Ersel O, Levent A. Effects of packaging method and storage time on the chemical, microbiological, and sensory properties of Turkish pastirma-A dry cured beef product [J]. Meat Science, 2008, 80(2):335-344.
 - [19] Hu Y Q, Liu W J, Yuan C H, et al. Enhancement of the gelation properties of hairtail (*Trichiurus haumela*) muscle protein with curdlan and transglutaminase [J]. Food Chemistry, 2015, 176:115-122.
 - [20] Marchessault R H, Deslandes Y. Fine structure of (1 $\rightarrow$ 3)- β -D-glucans: Curdlan and paramylon [J]. Carbohydrate Research, 1979, 75(OCT):231-242.
 - [21] Hong G P, Park S H, Kim J Y, et al. The effects of high pressure and various binders on the physico-chemical properties of restructured pork meat [J]. Asian Australasian Journal of Animal Sciences, 2006, 19(10):1484-1489.
 - [22] Jung S, Ghoul M, Lamballerie-Anton M D. Influence of high pressure on the color and microbial quality of beef meat [J]. LWT - Food Science and Technology, 2003, 36(6):625-631.
 - [23] 孔保华,王宇,夏秀芳,等.加热温度对猪肉肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J].食品科学,2011,32(5):50-54.
 - [24] Mangolim C S, Silva T T D, Fenelon V C, et al. Use of FT-

IR, FT-Raman and thermal analysis to evaluate the gel formation of curdlan produced by *Agrobacterium*, sp. IFO 13140 and determination of its rheological properties with food applicability [J]. *Food Chemistry*, 2017, 232:369–378.

[25] Han M, Wang P, Xu X, et al. Low-field NMR study of heat-induced gelation of pork myofibrillar proteins and its relationship with microstructural characteristics [J]. *Food Research International*, 2014, 62:1175–1182.

[26] Shao J H, Deng Y M, Song L, et al. Investigation the effects of protein hydration states on the mobility water and fat in meat batters by LF-NMR technique [J]. *Lebensmittel – Wissenschaft und – Technologie*, 2016, 66:1–6.

[27] Trout G R. Techniques for measuring water-binding capacity in muscle foods – A review of methodology [J]. *Meat Science*, 1988, 23(4):235–252.

[28] Gagnon, Marc-andré, Lafleur M. From Curdlan powder to the triple helix gel structure; an attenuated total reflection-infrared study of the gelation process. [J]. *Applied Spectroscopy*, 2007, 61(4):374–378.

[29] Sánchez-alonso I, Martínez I, Sánchez-valencia J, et al. Estimation of freezing storage time and quality changes in hake (*Merluccius merluccius*, L.) by low field NMR [J]. *Food Chemistry*, 2012, 135(3):1626.

[30] Cai Z X, Zhang H B. Recent progress on curdlan provided by functionalization strategies [J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 68:128–135.

[31] Wonnop Visessanguan, Masahiro Ogawa, Shuryo Nakai A, et al. Physicochemical Changes and Mechanism of Heat-Induced Gelation of Arrowtooth Flounder Myosin [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2000, 48(4):1016–1023.

[32] Sano T, Noguchi S F, Tsuchiya T, et al. Dynamic Viscoelastic Behavior of Natural Actomyosin and Myosin during Thermal

Gelation [J]. *Journal of Food Science*, 1988, 53(3):924–928.

[33] Li Y, Kong B, Xia X, et al. Structural changes of the myofibrillar proteins in common carp (*Cyprinus carpio*) muscle exposed to a hydroxyl radical-generating system [J]. *Process Biochemistry*, 2013, 48(5–6):863–870.

[34] 毕崇浩. 大豆分离蛋白酸诱导凝胶的流变学特性和分形分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.

[35] Jian W, Wu H, Wu L, et al. Effect of molecular characteristics of Konjac, glucomannan on gelling and rheological properties of Tilapia, myofibrillar protein [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 150:21–31.

[36] Kerry J F, Morrissey P A, Buckley D J. The rheological properties of exudates from cured porcine muscle; effects of added polysaccharides and whey protein/polysaccharide blends [J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 1999, 79(79):1260–1266.

[37] Zhang T, Li Z, Wang Y, et al. Effects of konjac glucomannan on heat-induced changes of physicochemical and structural properties of surimi gels [J]. *Food Research International*, 2016, 83:152–161.

[38] W. S. Fulton, E. D. T. Atkins. The Gelling Mechanism and Relationship to Molecular Structure of Microbial Polysaccharide Curdlan [J]. *Fiber Diffraction Methods*. 1980, 141:385–410.

[39] Wu C, Yuan C, Chen S, et al. The effect of Curdlan on the rheological properties of restructured ribbonfish (*Trichiurus*, spp.) meat gel [J]. *Food Chemistry*, 2015, 179:222–231.

[40] Warriss P D, Brown S N, Paáciak P. The colour of the adductor muscle as a predictor of pork quality in the loin [J]. *Meat Science*, 2006, 73(4):565–569.

[41] Warner R D, Kauffman R G, Greaser M L. Muscle protein changes post mortem, in relation to pork quality traits [J]. *Meat Science*, 1997, 45(3):339–352.

欢迎光临我们的网站

www.spgykj.com