

可得然胶和加水量对法兰克福香肠品质特性的影响

姜 帅, 陈益春, 曹传爱, 张 帅, 孔保华, 刘 骞*

(东北农业大学食品学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘 要: 探讨添加可得然胶(0.3%, 肉总质量计)以及不同加水量(20%、23%、26%和29%, 肉总质量计)对法兰克福香肠品质特性的影响。测定蒸煮损失率、乳化稳定性、色差、质构、流变特性、微观结构以及感官评价, 同时应用低场核磁共振(low field nuclear magnetic resonance, LF-NMR)技术测定法兰克福香肠内部水分子的迁移规律。结果表明, 在不添加可得然胶对照组中, 随着加水量的增加, 法兰克福香肠的蒸煮损失率和 L^* 值显著增加($P < 0.05$), 而乳化稳定性、硬度和总体可接受性显著降低($P < 0.05$)。然而, 在添加可得然胶后, 在相同加水量条件下显著降低法兰克福香肠的蒸煮损失率, 并显著提高肉制品的乳化稳定性、硬度、弹性和总体可接受性($P < 0.05$)。LF-NMR研究结果表明, 可得然胶的添加能够降低法兰克福香肠的弛豫时间, 在较高加水量条件下增强对水分子的束缚能力。另外, 肉糜的流变学测定结果表明, 在相同加水量条件下, 添加可得然胶能够提高肉糜在加热终点的储能模量(G')和损失模量(G''), 而且降低相位角正切值($\tan\delta$), 说明可得然胶能够在较高加水量条件下提高肉糜的黏弹性。同时, 扫描电镜结果表明, 较高的加水量会导致蛋白凝胶结构松散, 而可得然胶的添加能够显著改善蛋白凝胶的网状结构。上述结果表明, 虽然过多的加水量会导致法兰克福香肠的品质下降, 但是可得然胶的添加能够在较高加水量条件下显著提高法兰克福香肠的食用品质, 为可得然胶在乳化肉糜类肉制品中的应用提供理论依据。

关键词: 法兰克福香肠; 可得然胶; 加水量; 流变特性; 微观结构

Effect of Curdlan and Water Addition on Quality Characteristics of Frankfurters

JIANG Shuai, CHEN Yichun, CAO Chuan'ai, ZHANG Shuai, KONG Baohua, LIU Qian*

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

Abstract: This study investigated the influences of curdlan (0.3%) and water addition (20%, 23%, 26% or 29%) on the quality characteristics of frankfurters. Cooking loss, emulsion stability, color, texture profiles, rheological properties, microscopic structure and sensory evaluation were measured. The mobility of water molecules in sausages was measured by low field nuclear magnetic resonance (LF-NMR). The results showed that for the control group without curdlan added, cooking loss and L^* value significantly increased ($P < 0.05$), and emulsion stability, hardness, and overall acceptability decreased significantly ($P < 0.05$) with increasing water addition. However, for each addition level of water, frankfurters containing curdlan showed significantly lower cooking loss and significantly improved emulsion stability, hardness, springiness and overall acceptability than those without curdlan ($P < 0.05$). LF-NMR analysis showed that curdlan could decrease remarkably the relaxation time of water protons and increased the water binding capacity of frankfurters with higher amounts of water added. In addition, rheological analysis revealed that for each addition level of water, the addition of curdlan significantly increased the storage modulus (G') and loss modulus (G'') were and decreased the phase angle tangent ($\tan\delta$) of meat batter at the end of heating, indicating that curdlan could improve the viscoelasticity of meat gels. At the same time, scanning electron microscope showed that higher levels of water addition loosened the structure of protein gels, while the addition of curdlan could improve the network structure of protein gels remarkably. The above results showed that although excessive addition of water would lead to deterioration in the quality of frankfurters, the addition of curdlan

收稿日期: 2017-06-10

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项目 (UNPYSCT-2016006)

第一作者简介: 姜帅 (1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为畜产品加工。E-mail: Jiangshuai_1025@126.com

*通信作者简介: 刘骞 (1981—), 男, 教授, 博士, 研究方向为畜产品加工。E-mail: liuqian@neau.edu.cn

could reverse this deterioration. These findings can provide a theoretical basis for the application of curdlan in emulsified meat products.

Keywords: frankfurter; curdlan; water addition; rheological properties; microstructure

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201814009

中图分类号: TS251

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2018) 14-0057-10

引文格式:

姜帅, 陈益春, 曹传爱, 等. 可得然胶和加水量对法兰克福香肠品质特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(14): 57-66.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201814009. <http://www.spkx.net.cn>

JIANG Shuai, CHEN Yichun, CAO Chuan'ai, et al. Effect of curdlan and water addition on quality characteristics of frankfurters[J]. Food Science, 2018, 39(14): 57-66. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201814009. <http://www.spkx.net.cn>

法兰克福香肠是一种典型的低温肉糜类制品, 肥瘦比约为1:2的脂肪和肌肉蛋白经过斩拌加工后形成直径大约为1~50 μm 脂肪颗粒^[1]。由于在加工过程中蛋白质变性适度、斩拌适宜肉糜乳化程度高, 形成的香肠肉质细腻紧实富有弹性, 且能保持原有营养成分和良好风味^[2], 因此深受人们喜爱。在实际生产加工和贮藏运输中, 香肠往往存在质构状态不好、出水出油较多等问题, 为解决这一问题常在肉制品中加入卡拉胶、黄原胶、亚麻籽胶和魔芋胶等^[3-4]食用胶以改善香肠品质, 有研究表明食用胶能明显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后形成良好的三维凝胶网状结构, 并充分乳化脂肪, 进一步改善加工特性, 减少析水、析油现象, 从而提高产品的品质和产量^[4]。

可得然胶由于其悬浊液加热后既能形成硬而有弹性的热不可逆性凝胶又能形成热可逆性凝胶的特性, 引起了许多学者的兴趣。可得然胶又称凝胶多糖, 是由葡萄糖通过 β -D-(1 $\rightarrow$ 3)糖苷键形成的线性大分子^[5], 具有良好的凝胶性、持水性、增稠性、持油性等。Hsu等^[6]研究表明, 将可得然胶凝胶放置在4 $^{\circ}\text{C}$ 条件下20 h以后, 凝胶强度基本没有变化。Nakao等^[7]将可得然胶、琼脂、卡拉胶所形成的凝胶经过冻融处理, 研究发现可得然胶的凝胶强度变化甚微且脱水率几乎为零, 而琼脂、卡拉胶的凝胶强度分别减少至原来的10%~20%左右, 且凝胶块变成海绵状解冻后失水比较严重。Grandpierre等^[8]研究发现在可得然胶分散液中加入24%的油脂, 充分均质后加热形成凝胶, 凝胶在生成后长时间贮藏过程中不发生油脂析出的现象。由此可已经看出, 可得然胶的优良特性可提高食品的黏弹性及乳化稳定性。另外, 可得然胶含膳食纤维可达98.6%, 不易被人体消化^[9], 是适合高血糖病人和减肥人群的良好食品配料。目前国内外关于可得然胶的研究逐渐增多, 一方面是关于可得然胶和其他食用胶复配相互作用机理^[9-10], 另一方面是关于可得然胶的添加对于鱼糜类制品品质影响的研究^[11-12], 但可得然胶在肉制品中的应用研究较少。

加水量是肉制品加工中影响产品品质最大的因素之一, 适量的水分添加能改善乳化型灌肠质地、口感等品质特性^[13], 但过量的水分反而会导致产品可接受性的降低, 可通过调整产品配方选择合适加水量来改善。因此, 本研究将可得然胶添加到法兰克福香肠中, 探讨不同加水量情况下, 添加可得然胶后, 在较高加水量条件下是否仍能保持肉制品良好。进而探索可得然胶添加适合法兰克福香肠生产的最佳加工工艺, 为可得然胶在乳化肉糜类制品中进一步的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

冷鲜猪后道瘦肉、猪背膘 市购; 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 上海太乐食品有限公司; 胶原蛋白肠衣(直径18 mm) 河北保定唯新肠衣有限公司。

1.2 仪器与设备

GZB20高速斩拌机 石家庄晓进机械制造科技有限公司; RYX-25小型烟熏炉 浙江瑞邦智能装备股份有限公司; 10LB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-XT plus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(low field nuclear magnetic resonance, LF-NMR) 分析仪 德国布鲁克公司; Discovery DHR-1流变仪 美国TA仪器公司; S-3400N型

扫描电镜、ES-2030型冷冻干燥仪 日本Hitachi公司；
E-1010型离子溅射镀膜仪 日本Giko公司。

1.3 方法

1.3.1 可得然胶及水分添加

实验分为两大组：未加可得然胶对照组和加可得然胶处理组（可得然胶占总肉质量的0.3%），每一大组进一步分成4小组，水分添加量分别为总肉质量的20%、23%、26%、29%。

1.3.2 法兰克福香肠的配方

参考韩青荣^[14]的方法略有改动，法兰克福香肠的配方如下：主料：50%猪瘦肉，25%肥膘；配料：1.50%食盐、0.30%白胡椒粉、0.30%姜粉、0.01%亚硝酸盐、0.25%肉豆蔻粉、0.05%味精、0.40%复合磷酸盐、0.25%红辣椒粉、0.10%异抗坏血酸钠。

1.3.3 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。

1.3.4 法兰克福香肠的操作要点

参考韩青荣^[14]的方法略有改动。

斩拌：首先，将瘦猪肉、食盐、复合磷酸盐、亚硝酸盐以及冰水（1:1，*m/m*）混合物（20%、23%、26%、29%，肉总质量计）共同放入斩拌机中，高速斩拌3~5 min；之后，再分别加入未加和添加可得然胶（0.3%，肉总质量计）、香辛料等辅料高速斩拌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。干燥：在全自动一体化烟熏箱中进行，箱温45℃，相对湿度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℃，相对湿度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℃，相对湿度60%，时间30 min，风速2档，测定肠体温度达到72~74℃时即可。

1.3.5 蒸煮损失率测定

参考Álvarez等^[15]的方法略有改动，取35 g斩拌好的肉糜放入离心管中，以3 000 r/min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，然后取出离心管室温放置1 h，将离心管中溢出的液体倒入平板中。蒸煮损失率按公式（1）计算：

$$\text{蒸煮损失率/\%} = \frac{\text{加热前生肉糜质量/g} - \text{加热后剩余肉糜质量/g}}{\text{加热前生肉糜质量/g}} \times 100 \quad (1)$$

1.3.6 乳化稳定性测定

参考Colmenero等^[16]的方法略有改动，将1.3.5节中蒸煮损失的液体（离心管倒立40 min）倒入玻璃平皿

中，水分损失为蒸煮损失的液体在105℃加热16 h烘干后减轻的质量，而脂肪损失为蒸煮损失的液体烘干后剩余的样品质量。因此水分损失率和脂肪损失率按公式（2）、（3）^[17]计算：

$$\text{水分损失率/\%} = \frac{\text{加热后损失质量/g}}{\text{生肉糜质量/g}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{脂肪损失率/\%} = \frac{\text{加热后剩余质量/g}}{\text{生肉糜质量/g}} \times 100 \quad (3)$$

1.3.7 香肠颜色的测定

将4℃贮藏的法兰克福香肠放置在室温（20~22℃）条件下平衡1 h，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。

1.3.8 香肠的质构分析

将4℃贮藏的法兰克福香肠放置在室温（20~22℃）条件下平衡1 h，剥去肠衣用刀片将其切成2 cm长的圆柱，每批制作10个平行样品。测定参数如下：测试前速率5 mm/s，测试速率1 mm/s，测试后速率1 mm/s，压缩比为50%，触发力5 g，探头型号为P/50。

1.3.9 应用LF-NMR测定香肠内部水分的动态分布

参考Aursand等^[18]的方法，将法兰克福香肠样品放在专用试管中（试管直径为1.8 cm，高度为18 cm），LF-NMR分析仪的磁场强度为0.47 T，质子共振频率为20 MHz。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2 s。测定后的每个样品的 T_2 ，通过CONTIN软件进行反演，反映出相应的弛豫时间（ T_{20} 、 T_{21} 和 T_{22} ）。

1.3.10 香肠动态流变特性的测定

参考Yang Huijuan等^[19]的方法略作改动，用取样器取约5 g斩拌好的生肉糜样品，均匀涂于平板的下表面（40 mm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：频率为1 Hz，恒定应力为0.012，上下板夹缝为0.5 mm，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'' ）及相位角正切值（ $\tan\delta$ ）的变化，每个样品测定3次。

1.3.11 扫描电镜观察香肠微观结构

按Pan等^[20]的方法并略加调整，用光学显微镜对香肠微观结构进行分析。取待测样品，切成约2 mm×5 mm的小条，先用2.5%、pH 6.8戊二醛溶液浸泡过夜固定，之后用0.1 mol/L pH 6.8磷酸缓冲液洗涤3次，每次10 min。然后分别用50%、70%、80%、90%乙醇溶液

进行脱水, 每次10 min; 再用100%乙醇脱水3次, 每次10 min, 最后用氯仿脱脂1 h后, 依次用100%乙醇-叔丁醇(1:1, *V/V*)溶液和叔丁醇各置换1次, 每次15 min。用冷冻干燥仪对样品进行干燥。

扫描操作: 样品观察面向上黏贴在扫描电镜样品台上, 用离子溅射镀膜仪进行离子溅射喷金, 扫描电镜观察。

1.3.12 香肠的感官评价

参考Dolores等^[21]的方法并做适当改动, 邀请10名从事食品专业的研究生, 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。评价标准如表1所示。

表1 感官评价标准
Table 1 Criteria for sensory evaluation of frankfurters

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
气味	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	肉质略粗糙, 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)

1.4 数据统计分析

每个实验重复3次, 结果表示为 $\bar{x} \pm s$ 。数据统计分析采用Statistix 8.1 (美国Analytical Software公司) 软件包中Linear Models程序进行, 差异显著 ($P < 0.05$) 和差异极显著 ($P < 0.01$) 分析使用Tukey HSD程序。采用Sigmaplot 12.5软件 (美国Systat Software公司) 作图。

2 结果与分析

2.1 蒸煮损失和乳化稳定性的变化结果

表2 加水量对肉糜蒸煮损失和乳化稳定性的影响
Table 2 Influence of water addition on cooking loss and emulsion stability of meat batter

组别	加水量/%	蒸煮损失率/%	水分损失率/%	脂肪损失率/%
未添加胶对照组	20	3.05 ± 0.04 ^{ad}	0.39 ± 0.02 ^{cd}	2.65 ± 0.05 ^{cd}
	23	5.65 ± 0.34 ^c	0.57 ± 0.02 ^{cd}	5.08 ± 0.34 ^c
	26	8.77 ± 0.43 ^{ab}	0.71 ± 0.03 ^{ab}	8.06 ± 0.44 ^{ab}
	29	13.42 ± 0.27 ^a	1.05 ± 0.02 ^a	12.36 ± 0.25 ^a
添加胶处理组	20	1.74 ± 0.01 ^{de}	0.19 ± 0.02 ^{ef}	1.56 ± 0.03 ^{de}
	23	2.49 ± 0.09 ^{de}	0.28 ± 0.01 ^{ef}	2.21 ± 0.09 ^{de}
	26	3.13 ± 0.05 ^{cd}	0.30 ± 0.01 ^{ef}	2.83 ± 0.05 ^{cd}
	29	5.12 ± 0.09 ^c	0.55 ± 0.02 ^c	4.57 ± 0.09 ^c

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$); 同列不同大写字母表示差异极显著 ($P < 0.01$), 下同。

蒸煮损失和乳化稳定性是反映肉及肉制品品质的重要指标之一, 而肉制品的乳化稳定性主要是由水分损失率和脂肪损失率体现。从表2可以看出, 对于未添加可得然胶的各对照组来说, 随着加水量的增加, 其蒸煮损失率、水分损失率和脂肪损失率极显著增加 ($P < 0.01$), 说明过多的加水量会导致产品的乳化稳定性降低。马英俊等^[22]研究表明过多的水分会削弱肌肉的持水能力, 使蒸煮损失增加, 乳化稳定性降低。与此同时, 对于添加0.3%可得然胶的各处理组来说, 随着加水量的增加, 其蒸煮损失率、水分损失率和脂肪损失率同样显著增加 ($P < 0.05$)。但是, 在相同加水量条件下, 与未加胶对照组相比, 添加可得然胶以后, 能够极显著降低产品的蒸煮损失率、水分损失率和脂肪损失率 ($P < 0.01$), 说明可得然胶能够在一定程度上提高产品的乳化稳定性。这主要是由于可得然胶能与肌原纤维蛋白相互交织形成致密的三维网状结构, 从而能够束缚更多的水分子, 达到降低法兰克福香肠蒸煮过程中汁液流失的目的。然而, 虽然有相关研究表明可得然胶分子的螺旋结构可以吸收自身质量100倍的水^[23], 但在本实验中可得然胶的添加比例一定, 因此随着加水量的增加, 会导致在蒸煮过程中过多的水分不能被完全束缚而发生损失。芦嘉莹等^[24]研究表明, 在乳化肠中添加卡拉胶和黄原胶以后, 在相同加水量条件下, 能够显著降低乳化肠的蒸煮损失。

另外, 从表2可以看出, 添加0.3%可得然胶、26%加水量的处理组与未加胶20%加水量的对照组相比, 其蒸煮损失率和脂肪损失率差异不显著 ($P > 0.05$), 这说明添加可得然胶能够提高产品的保油性。Grandpierre等^[8]研究发现, 将3%的可得然胶溶液与不同添加量 (2%~24%) 的植物油混合均质后加热, 在凝胶生成时和生成后不发生油脂析出的现象。赵光辉^[25]研究也发现添加0.3%的可得然胶能显著降低蒸煮香肠的保水保油率, 即可得然胶的添加有效地提高了肉糜的乳化稳定性, 改善了肉糜的品质。

2.2 颜色变化结果

表3 加水量对法兰克福香肠颜色的影响

加水量/%	未添加胶对照组			添加胶处理组		
	<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *	<i>L</i> *	<i>a</i> *	<i>b</i> *
20	64.56 ± 0.18 ^g	10.54 ± 0.40 ^{ab}	16.90 ± 0.35 ^{ab}	66.13 ± 0.04 ^e	9.84 ± 0.15 ^{abc}	17.69 ± 0.34 ^a
23	65.21 ± 0.24 ^{fg}	10.27 ± 0.17 ^{ab}	16.73 ± 0.19 ^{ab}	67.97 ± 0.19 ^c	9.57 ± 0.10 ^{abc}	17.39 ± 0.16 ^{ab}
26	65.84 ± 0.29 ^{ef}	9.99 ± 0.16 ^{abc}	16.53 ± 0.06 ^{ab}	69.03 ± 0.17 ^b	9.23 ± 0.08 ^{abc}	17.40 ± 0.15 ^{ab}
29	67.02 ± 0.18 ^d	9.83 ± 0.15 ^{abc}	16.52 ± 0.47 ^{ab}	70.56 ± 0.32 ^a	9.05 ± 0.05 ^c	17.38 ± 0.24 ^{ab}

由表3可看出, 对于未添加可得然胶的各对照组来说, 随着加水量的增加, 法兰克福香肠的 L^* 值显著增加 ($P < 0.05$), 而 a^* 值和 b^* 值均无显著变化 ($P > 0.05$)。

与此同时，对于添加0.3%可得然胶的各处理组来说，随着加水量的增加，法兰克福香肠的 L^* 值极显著增加（ $P<0.01$ ），而 a^* 值和 b^* 值均无显著变化（ $P>0.05$ ）。加水量的增加能在一定程度上提高香肠内部水分含量，而随着香肠内部水分增加的光反射会随之增强，从而提高了法兰克福香肠的 L^* 值，这与Hong等^[26]的研究结果相同。在相同加水量条件下，与未加胶对照组相比，添加可得然胶以后，能够极显著增加法兰克福香肠的 L^* 值（ $P<0.01$ ），Mangolim等^[27]研究发现可得然胶自身的螺旋结构具有一定的旋光性，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。另外，蛋白质在加热过程中生成三维凝胶网状结构形成凝胶，而食用胶的多糖分子结构中含有强阴离子性硫酸酯基团能和水分子形成额外的氢键，将游离水分以成键的形式束缚进三维网络结构中^[28]。

2.3 香肠的质构分析结果

表 4 加水量对法兰克福香肠质构的影响
Table 4 Influence of water addition on texture profile of frankfurters

组别	加水量/%	硬度/N	弹性	咀嚼性/N	黏聚性	胶黏性/N	回弹性
未加胶 对照组	20	17.03±0.17 ^{cd}	0.83±0.01 ^{abc}	9.99±0.09 ^{ef}	0.73±0.01 ^{cd}	11.92±0.06 ^{ef}	0.37±0.02 ^{cd}
	23	15.96±0.31 ^{ef}	0.81±0.01 ^{abc}	9.67±0.20 ^{ef}	0.72±0.01 ^{cd}	10.50±0.25 ^{ef}	0.35±0.01 ^{cd}
	26	14.80±0.25 ^{ef}	0.79±0.01 ^{cd}	8.44±0.29 ^{ef}	0.70±0.01 ^{cd}	9.62±0.31 ^{ef}	0.33±0.01 ^{cd}
	29	13.10±0.36 ^{ef}	0.77±0.01 ^{cd}	7.43±0.34 ^{ef}	0.66±0.02 ^{cd}	7.94±0.53 ^{ef}	0.30±0.01 ^{ef}
添加胶 处理组	20	22.28±0.31 ^{ab}	0.88±0.02 ^{ab}	15.09±0.21 ^{ab}	0.79±0.01 ^{ab}	17.62±0.11 ^{ab}	0.45±0.02 ^{ab}
	23	19.28±0.39 ^{ab}	0.87±0.02 ^{ab}	13.66±0.19 ^{ab}	0.78±0.01 ^{ab}	16.66±0.28 ^{ab}	0.43±0.01 ^{ab}
	26	18.12±0.20 ^{bc}	0.87±0.01 ^{ab}	12.83±0.15 ^{bc}	0.76±0.02 ^{abc}	15.02±0.15 ^{bc}	0.39±0.01 ^{abc}
	29	17.04±0.08 ^{cd}	0.85±0.02 ^{abc}	11.38±0.26 ^{cd}	0.74±0.01 ^{abcd}	13.57±0.21 ^{cd}	0.37±0.02 ^{cd}

在肉制品中，质构分析不仅能精确反映消费者对产品的感官需求，而且能侧面反映出蛋白基质的结构完整性及与其他成分的结合状态^[29]。由表4可知，对于未添加可得然胶的各对照组来说，随着加水量的增加，法兰克福香肠的硬度和胶黏性均呈极显著下降趋势（ $P<0.01$ ），而弹性、黏聚性、回弹性均无显著变化（ $P>0.05$ ）。与未加胶对照组相似，对添加0.3%可得然胶的各处理组而言，随着加水量的增加，法兰克福香肠的硬度、咀嚼性和胶黏性均呈极显著下降趋势（ $P<0.01$ ），而弹性、黏聚性、回弹性均无显著变化（ $P>0.05$ ）。但是，在相同加水量条件下，与未加胶对照组相比，添加可得然胶以后，能够显著提高产品的硬度、咀嚼性和胶黏性（ $P<0.05$ ），说明可得然胶能够在一定程度上提高产品的品质。Mangolim等^[27]研究表明，肌原纤维蛋白在加热过程中，随着蛋白高级结构的展开，分子结构逐渐被打开，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。然而，由于蛋白网络结构滞留水分有限，过多的水分不能被滞留而损失，会使香肠的硬度、胶黏性等食用品质下降。在添加可得然胶

的处理组中，多糖分子与肌原纤维蛋白在加热过程中可以相互交联形成了更加致密稳定的三维网络结构，提高了肌原纤维蛋白凝胶的硬度和弹性^[30]。Chen Conggui等^[31]研究发现在高压鸭肉凝胶中添加可得然胶，能增强鸭肉的硬度和黏弹性，使凝胶结构更加致密均一从而提高鸭肉制品的品质特性。

另外，由于本实验中可得然胶的添加比例一定，因此随着加水量的增加，其质构特性仍会出现下降的趋势。从表4还可看出，添加0.3%可得然胶、29%加水量的法兰克福香肠的咀嚼性和胶黏性极显著高于未加胶20%加水量的处理组（ $P<0.01$ ），而硬度则无显著差异（ $P>0.05$ ），这说明添加可得然胶能够提高产品的品质。张海龙等^[5]研究表明，相同浓度的可得然胶凝胶强度要高于琼脂，其凝胶性质与琼脂脆性和明胶延展性相近，而且可得然胶在改善由于加水量过多引起的产品品质劣变方面，比其他胶体性质更为优越。Hsu等^[6]研究发现，相对于卡拉胶来说，可得然胶能够更好地提高肉丸的黏弹性、咀嚼性。

2.4 LF-MNR对香肠的水分子运动状态和水分分布情况测定结果

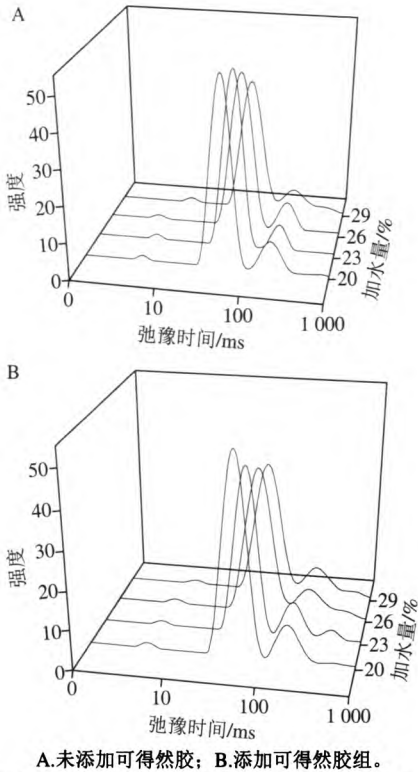


图 1 不同加水量的法兰克福香肠横向弛豫时间的变化三维图像
Fig. 1 Changes in transverse relaxation time in frankfurters with curdlan and different levels of water addition

LF-NMR能够对乳化肠乳化过程中的脂肪分子和水分子的结合状态进行分析^[32]，并且能反映出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^[33]，因此在肉及肉制品的测量中多用横向弛豫时间 T_2 间接表明水分的自由度^[32]。

表 5 加水量对法兰克福香肠横向弛豫时间值及强度的影响
Table 5 Influence of water addition on transverse relaxation time and intensity of frankfurters

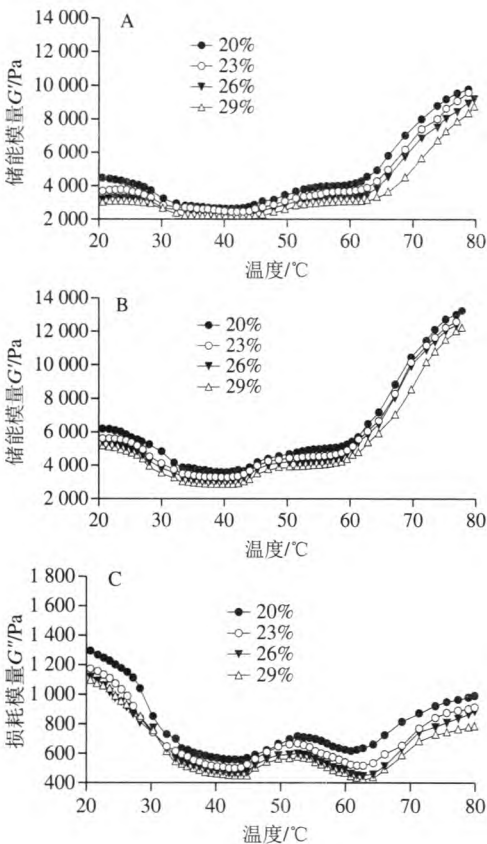
组别	加水量/%	T_2/m s	T_{21}/ms	T_{22}/ms	A_b	A_{21}	A_{22}
未加胶对照组	20	5.50±0.80 ^{AB}	48.80±0.30 ^{AB}	197.00±8.00 ^{ABC}	1.33±0.58 ^A	53.68±0.58 ^A	8.67±0.58 ^{AB}
	23	5.90±0.70 ^{AB}	52.80±0.20 ^{AB}	204.00±9.00 ^{AB}	1.00±0.01 ^A	50.67±0.58 ^B	7.33±0.58 ^B
	26	4.50±0.60 ^B	53.00±0.20 ^{AB}	213.00±8.00 ^A	1.00±0.01 ^A	45.67±0.58 ^C	8.33±0.58 ^{AB}
	29	7.50±1.00 ^{AB}	49.50±0.60 ^{AB}	200.00±20.00 ^{AB}	1.00±0.01 ^A	39.00±1.00 ^D	7.33±0.58 ^B
添加胶处理组	20	4.80±0.60 ^B	44.90±0.40 ^D	180.00±10.00 ^{AB}	1.00±0.01 ^A	52.67±0.58 ^{AB}	9.67±0.58 ^A
	23	5.00±0.70 ^B	46.30±0.50 ^{CD}	168.00±9.00 ^{AB}	1.33±0.58 ^A	44.33±0.58 ^C	8.67±0.58 ^{AB}
	26	5.20±0.70 ^{AB}	45.00±0.30 ^{CD}	203.00±9.00 ^{AB}	1.00±0.01 ^A	39.00±1.00 ^D	7.33±0.58 ^B
	29	6.30±0.90 ^{AB}	48.50±0.40 ^{AB}	205.00±7.00 ^{AB}	1.33±0.58 ^A	35.67±0.58 ^E	8.67±0.58 ^{AB}

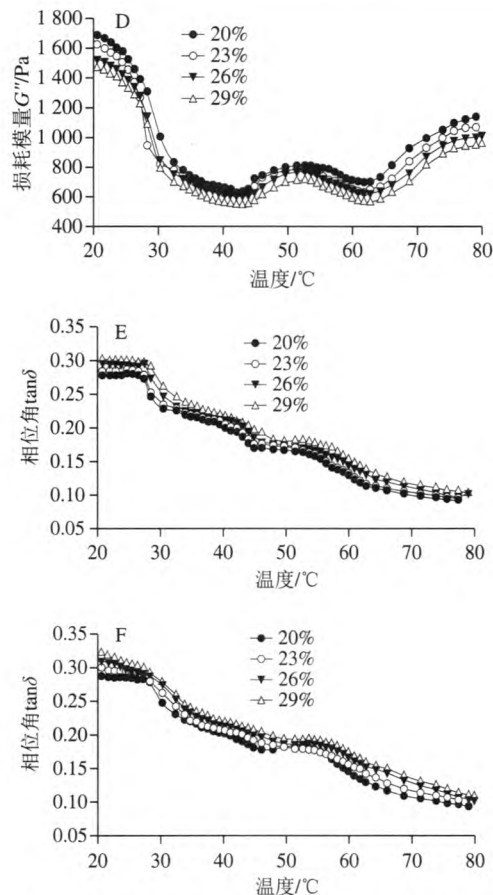
由图1、表5可知，香肠的核磁衰减信号被拟合为3个峰，分别代表着香肠制品存在的结合水（ T_{2b} ）、不易流动水（ T_{21} ）和自由水（ T_{22} ）的分布情况，即3种水分与肌肉蛋白的结合情况和自由移动程度。对照组3个峰出现在4.50~7.50、48.80~53.00 ms和193.00~213.00 ms之间，而处理组出现在4.80~6.30、44.90~48.50 ms和168.00~205.00 ms之间。在对照组中，随着加水量的增加，每种水分的弛豫时间均向弛豫时间长的方向移动，其中 T_{21} 尤为显著，这说明香肠中不易流动水向自由水方向转变，水分子摆脱凝胶蛋白网络的束缚，与肌肉蛋白结合趋于疏松。对于未添加可得然胶的各对照组来说，随着加水量的增加， T_{21} 、 T_{2b} 和 T_{22} 无显著性差异（ $P>0.05$ ）。添加0.3%可得然胶的各处理组与未加胶对照组相似，随着加水量的增加， T_{21} 、 T_{2b} 和 T_{22} 无显著性差异（ $P>0.05$ ）。但在相同加水量条件下，0.3%可得然胶的各处理组与未加胶组相比，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降低，尤其是 T_{21} 的弛豫时间移动极显著（ $P<0.01$ ），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，可能可得然胶与大量的自由水通过疏水键和氢键结合，使其转变为不易流动水^[34]。但在加水量较高时，横向弛豫时间的移动性差异不显著。可能是在香肠蒸煮时，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^[35]，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，加水量过多，由二者间的转变与蛋白间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。

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 ）能反映出这3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^[36]，从而可以间接反

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5可知，对于未添加可得然胶的各对照组来说，随着加水量的增加， A_{21} 均呈现极显著降低的趋势（ $P<0.01$ ），而 A_{2b} 和 A_{22} 无显著影响（ $P>0.05$ ）。而添加0.3%可得然胶的各处理组与未加胶对照组相似，随着加水量的增加， A_{21} 均呈现极显著降低的趋势（ $P<0.01$ ）， A_{2b} 和 A_{22} 无显著影响（ $P>0.05$ ）。而在相同加水量（除20%加水量外）条件下，添加可得然胶与未加胶对照组相比， A_{21} 极显著降低（ $P<0.01$ ）。由对照组可知，加水量的变化主要影响法兰克福香肠内部中不易流动水的强度，这可能是由于结合水是与肉中蛋白质紧密结合的水，二者的结合量是一定的，加水量过多也很难影响结合水的迁移，而不易流动水不稳定，容易受到外界影响；而处理组中，添加可得然胶使不易流动水向弛豫时间短的方向移动，且强度显著降低。有研究表明，可得然胶分散液在高速斩拌且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。在加热时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主要的化学作用力^[11]，因此添加可得然胶可以有效地提高凝胶强度、增加凝胶持水性。

2.5 香肠动态流变特性的测定





A、C、E分别代表未添加可得然胶，B、D、F分别代表添加可得然胶（0.3%）香肠样品的 G' 、 G'' 和 $\tan\delta$ 的变化曲线。

图2 不同加水量条件下，未添加和添加可得然胶对法兰克福香肠的流变行为的影响

Fig. 2 Influence of water addition on rheological behavior of frankfurters

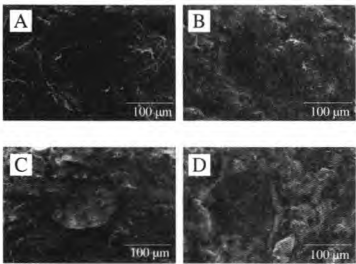
G' 代表弹性和刚度部分，由图2A、B可以看出，未加胶的各对照组在20~45℃时，香肠样品的凝胶弹性呈先下降后趋平的趋势，在45~60℃之间，呈现先增加后减少的趋势，在60~80℃，凝胶弹性呈迅速上升的趋势，而添加0.3%可得然胶的各处理组与其变化趋势一致，这表明可得然胶的添加并不影响蛋白在加热过程中变性温度的改变。在不同加水量条件下，未加胶的各对照组对应的 $G'_{\max}$ 分别为9 998.34、9 723.98、9 247.5、8 745.13 Pa。而添加0.3%可得然胶的各处理组对应的 $G'_{\max}$ 分别为13 248.8、12 847.98、12 712.67、12 203.8 Pa，可明显看出添加可得然胶能提高产品的 G' 。对照组中，在 G' 的初始阶段，即温度为53℃时，蛋白质受热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^[37]。随着温度升高， 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^[38]。随后 G' 又开始上升，凝胶进一步开始加强。在处理组中，当可得然胶在75℃加热后，可得然胶开始由单分子链转

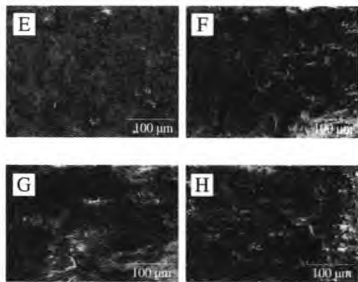
变为三螺旋结构形成不可逆凝胶，并与变性蛋白质相互交织缠绕增强了蛋白质原有的三维网状结构，这一结果也与质构测定黏弹性结果相一致，当加水量增加至超过蛋白持水能力时，蛋白在凝胶形成过程中被稀释其弹性降低，而可得然胶的添加能显著提高凝胶的弹性。马瑶兰等^[11]研究发现，在鱼糜加热过程中，凝胶三维网络结构的形成由以鱼肉蛋白为主体逐渐变为以可得然胶为主体，其中可得然胶主要与蛋白-亲水胶体弱键相互作用和鱼糜蛋白-可得然胶复合凝胶骨架结构的转变有一定的联系。Wu Chunhua等^[39]发现在重组带鱼中添加可得然胶也能使鱼糜凝胶结构致密，提高凝胶保水性及凝胶强度，从而提高凝胶的 G' 。

G'' 代表黏性和流动性部分，由图2C、D可以看出，不同加水量的未加胶对照组和添加0.3%可得然胶的处理组的 G'' 变化趋势与 G' 一致，可明显看出添加可得然胶能提高产品的 G'' ，即可得然胶可以形成具有黏弹性的网络结构来促进蛋白凝胶的形成。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，使凝胶黏性急速升高，添加可得然胶处理组的黏性明显高于对照组。随着加水量的增加，肉糜内部的不易流动水分含量相对增加，对凝胶形成起到一定的稀释作用，黏弹性必定降低。

$\tan\delta$ 表示 G'' 与 G' 的比值， $\tan\delta$ 越小则凝胶的黏性较小弹性较大^[40]，就香肠制品而言其品质越好。从图2E、F可看出，随着加水量的增加，对照组和处理组的 $\tan\delta$ 逐渐增大，在加热终点时，对照组相应的 $\tan\delta$ 分别为0.090 1、0.098 3、0.102 7、0.109 7，处理组相应的 $\tan\delta$ 分别为0.087 5、0.092 3、0.095 5、0.101 0。在对照组中，由于加水量的增加，在凝胶形成过程中肉蛋白与更多水分子结合，将水分子滞留从而使凝胶黏性增加，而过多的水分起到稀释作用会使弹性降低。在处理组中，可能是可得然胶分子与纤维状的肌原纤维蛋白分子相互缠结，通过分子键进一步结合，将水分子被包裹在网络结构中，使其流动性减弱，从而蛋白内部网络结构趋于稳定，这也与低场核磁不易流动水趋于结合水方向移动的结果一致。Jian Wenjie等^[41]研究发现，在罗非鱼中添加魔芋葡甘聚糖可以填埋凝胶中的孔洞，增强凝胶网络的结构，从而改善鱼肉凝胶的流变特性，有效的提高产品品质。

2.6 香肠的微观结构观察





A~D.不同加水量（20%、23%、26%、29%）未添加可得然胶的香肠样品；E~H.不同加水量（20%、23%、26%、29%）添加可得然胶（0.3%）的香肠样品。

图3 未添加和添加可得然胶对不同加水量法兰克福香肠的微观结构影响

Fig.3 Influence of curdlan and water addition on microstructure of frankfurters

如图3所示，不同的加水量对照组和处理组的微观结构差异明显。由图3A~D可知，在未加胶的对照组中，随着加水量的增加，蛋白凝胶的网络结构逐渐松散呈无序状，同时伴随“破乳”现象出现，乳化稳定性逐渐变差，这一结果与过多的加水量会导致产品的乳化稳定性降低相似。而从图3E~H可看出，添加0.3%可得然胶的各处理组中，也随着加水量的增加，蛋白凝胶结构逐渐变差。添加可得然胶的处理组较未加胶的对照组而言，在相同加水量条件下，添加可得然胶能明显改善凝胶的组织状态，香肠中肌原纤维蛋白形成的三维网络结构较为致密且孔洞较小，但随着加水量的增加，对凝胶网络结构也产生一定的破坏作用。可能是由于可得然胶与肌原纤维蛋白的三维网络结构相互交织，起到空间充填作用，使香肠具有比较紧凑的凝胶结构，乳化能力得到提高，从而改善了产品的组织结构，并提高了对水的束缚力，增加了肉制品的保水性，这也与前面蒸煮损失率与乳化稳定性结果相一致。马瑶兰等^[11]也发现，鱼糜凝胶的不连续和孔隙较大三维网络结构的形成，主要是由于加热过程中构建凝胶骨架结构的主要成分肌球蛋白和肌动蛋白等被热降解，可得然胶的加入可起到骨架支撑作用，且可得然胶在高温加热过程中自身结构也变为更稳定的三级结构，能填充凝胶网络结构使其趋于致密稳定。Wu Chunhua^[39]和Hu Yaqin^[42]等将可得然胶添加到重组带鱼制品中，加热后可得然胶可形成低位（可逆）或高位（不可逆）凝胶，凝胶在鱼糜凝胶形成过程中主要起到凝胶增强剂的作用，以增强与蛋白凝胶三维网络结构的相互关联，使鱼糜凝胶孔洞细小结构细腻。

2.7 香肠的感官评价

感官评定是评价产品好坏的关键，主要取决于消费者对产品的感性认识。由表6可以看出，对于未添加可得然胶的各对照组来说，随着加水量的增加，色

泽、组织状态、口感和总体接受性均呈现显著降低趋势（ $P<0.05$ ）。而添加0.3%可得然胶的各处理组与未加胶对照组相似，随着加水量的增加，各感官指标均呈下降趋势。对照组随着加水量的增加，产品失去原有光泽香肠发白，组织状态疏松多孔、口感发柴、弹性和咀嚼性较差，导致其总体接受性差，消费者接受程度低。相同加水量条件下，添加可得然胶的处理组较未加胶的对照组而言，色泽、气味、组织状态和总体接受性有了极显著的提高（ $P<0.01$ ），添加可得然胶的处理组较有光泽、口感细腻、质地均一致密，其总体接受性较好，说明添加可得然胶能明显提高消费者对法兰克福香肠的感性认识，显著改善香肠品质特性，这一结果与前面的实验结果相似，也与马芙俊^[22]和芦嘉莹^[24]等的研究一致，添加食品胶能显著弥补加水量过多引起肉制品的劣变，对提高产品品质和产量有着重要的作用。

表6 加水量对添加可得然胶的法兰克福感官质量影响

Table 6 Influence of water addition on sensory evaluation of frankfurters

组别	加水量/%	色泽	气味	组织状态	口感	总体接受性
未加胶 对照组	20	6.82±0.20 ^{abc}	7.00±0.35 ^{abcd}	7.16±0.32 ^{abc}	7.16±0.32 ^{abc}	6.96±0.36 ^{abc}
	23	6.42±0.40 ^{cd}	6.96±0.36 ^{cd}	6.72±0.26 ^c	6.86±0.22 ^c	6.67±0.23 ^{bc}
	26	5.86±0.22 ^d	6.80±0.42 ^{cd}	5.60±0.42 ^d	6.00±0.35 ^d	6.30±0.27 ^c
	29	5.00±0.35 ^e	6.42±0.40 ^d	5.08±0.11 ^d	5.20±0.27 ^{de}	5.40±0.42 ^d
添加胶 处理组	20	7.92±0.11 ^a	7.70±0.18 ^{ab}	7.92±0.11 ^a	7.82±0.47 ^{ab}	7.82±0.20 ^a
	23	7.82±0.20 ^{ab}	7.72±0.22 ^{ab}	7.78±0.18 ^{ab}	7.90±0.26 ^{ab}	7.78±0.18 ^a
	26	7.90±0.11 ^a	7.88±0.11 ^a	7.38±0.16 ^{ab}	7.59±0.29 ^{abc}	7.54±0.29 ^{ab}
	29	7.36±0.35 ^{abc}	7.20±0.27 ^{abc}	7.00±0.14 ^{bc}	7.10±0.26 ^{bc}	7.00±0.38 ^{bc}

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。

3 结 论

在法兰克福香肠制作过程中，相同加水量条件下，添加可得然胶能显著减少香肠的蒸煮损失率，提高香肠的乳化稳定性并改善香肠质构特性、光泽。LF-MNR结果显示，随着加水量的增加，香肠内部 T_{21} 向弛豫时间长的方向移动，水分子与肉蛋白结合趋于疏松。而可得然胶的添加能使 T_{21} 向弛豫时间短的方向移动。流变特性结果表明，在相同加水量条件下，可得然胶的添加能够显著提高法兰克福香肠肉糜的 G' 、 G'' 以及黏弹性，改善由于过多加水量引起的品质破坏；而从微观结构看出，随着加水量的增加，蛋白凝胶的网络结构逐渐松散呈无序状，乳化性降低，而添加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致密稳定；感官评定结果发现，可得然胶的加入能明显提高香肠的感官品质，改善过多的加水量对香肠的不利影响，

因此可得然胶可应用于肉糜类制品中以提高产品品质和产量。在该工艺相同加水量条件下,添加可得然胶能束缚住更多的水分,仍保持肉制品良好的品质,为可得然胶在肉制品加工中进一步的应用提供理论依据。

参考文献:

- [1] XI F, SEBRANEK J G, LEE H Y, et al. Effects of adding red wine on the physicochemical properties and sensory characteristics of uncured frankfurter-type sausage[J]. *Meat Science*, 2016, 121: 285-291. DOI:10.1016/j.meatsci.2016.06.027.
- [2] ÁLVAREZ D. A novel fiber optic sensor to monitor beef meat emulsion stability using visible light scattering[J]. *Meat Science*, 2009, 81(3): 456-466. DOI:10.1016/j.meatsci.2008.09.007.
- [3] 孙健, 王鹏, 徐幸莲, 等. 猪肉肠中亚麻籽胶、卡拉胶和黄原胶的相互作用[J]. *食品科学*, 2012, 33(13): 134-139.
- [4] 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.
- [5] 张海龙, 关志炜, 杨俊杰. 可得然胶的性质及应用[J]. *中国食物与营养*, 2010(1): 36-39.
- [6] HSU S Y, CHUNG H Y. Interactions of konjac, agar, curdlan gum, κ -carrageenan and reheating treatment in emulsified meatballs[J]. *Journal of Food Engineering*, 2000, 44(4): 199-204. DOI:10.1016/S0260-8774(00)00026-1.
- [7] NAKAO Y, KONNO A, TAGUCHI T, et al. Curdlan: properties and application to foods[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 56(3): 769-772. DOI:10.1111/j.1365-2621.1991.tb05378.x.
- [8] GRANDPIERRE C, JANSSEN H G, LAROCHE C, et al. Enzymatic and chemical degradation of curdlan targeting the production of β -1 leads to 3) oligoglucans[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2008, 71(2): 277-286. DOI:10.1016/j.carbpol.2007.05.042.
- [9] 蒋明峰. 魔芋葡甘聚糖/可得然胶流变特性的研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2016.
- [10] 蔡路昀, 冯建慧, 聂小华, 等. 草鱼皮明胶-可得然胶混体系流变特性及作用机理的研究[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(1): 49-64. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2017.01.001.
- [11] 马瑶兰, 熊善柏, 尤娟, 等. 加热模式和可得然胶对白鲢鱼糜凝胶特性的影响[J]. *现代食品科技*, 2017, 33(4): 1-7. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.4.034.
- [12] 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. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2015.17.045.
- [13] 彭增起, 周光宏, 徐幸莲. 磷酸盐混合物和加水量对低脂牛肉灌肠硬度和保水性的影响[J]. *食品工业科技*, 2003, 24(3): 38-40. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2003.03.015.
- [14] 韩青荣. 实用香肠加工工艺[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1995.
- [15] 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. DOI:10.1016/j.meatsci.2013.02.011.
- [16] 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): 781-788. DOI:10.1016/j.meatsci.2004.11.011.
- [17] 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. DOI:10.1111/j.1365-2621.1987.tb14032.x.
- [18] 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 ^1H NMR study[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2008, 56(15): 6252-6260. DOI:10.1021/jf800369n.
- [19] YANG H J, 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. DOI:10.1016/j.meatsci.2016.06.004.
- [20] PAN B S, YEH W T. Biochemical and morphological changes in grass shrimp (*Penaeus monodon*) muscle following freezing by air blast and liquid nitrogen methods[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 1993, 17(3): 147-160. DOI:10.1111/j.1745-4514.1993.tb00464.x.
- [21] DOLORES G M, EGEE M, BELÉN L M, et al. Sensory characteristics of meat and meat products from entire male pigs[J]. *Meat Science*, 2017, 129: 50-53. DOI:10.1016/j.meatsci.2017.02.011.
- [22] 马美俊, 孔保华. 滚揉时间和加水量对重组牛肉品质特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2011, 32(2): 123-126. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2011.02.029.
- [23] WANG L H, LI Y, YANG S N, et al. Gambogic acid synergistically potentiates cisplatin-induced apoptosis in non-small-cell lung cancer through suppressing NF- κ B and MAPK/HO-1 signalling[J]. *British Journal of Cancer*, 2014, 110(2): 341-352. DOI:10.1038/bjc.2013.752.
- [24] 芦嘉莹, 孔保华, 刘寿, 等. 加水量对添加不同食用胶的乳化肠品质的影响[J]. *食品科学*, 2012, 33(15): 57-60.
- [25] 赵光辉. 食用胶对熏煮香肠品质的影响研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2014.
- [26] 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. DOI:10.5713/ajas.2006.1484.
- [27] 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. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.04.031.
- [28] FOEGEDING E A, RAMSEY S R. Rheological and water-holding properties of gelled meat batters containing iota carrageenan, kappa carrageenan or xanthan gum[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 52(3): 549-553. DOI:10.1111/j.1365-2621.1987.tb06672.x.
- [29] SOUISSI N, JRIDI M, NASRI R, et al. Effects of the edible cuttlefish gelatin on textural, sensorial and physicochemical quality of octopus Sausage[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 65: 18-24. DOI:10.1016/j.lwt.2015.07.051.
- [30] 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.
- [31] CHEN C G, WANG R, SUN G, et al. Effects of high pressure level and holding time on properties of duck muscle gels containing 1% curdlan[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2010, 11(4): 538-542. DOI:10.1016/j.ifset.2010.05.004.
- [32] SHAO J H, DENG Y M, JIA N, et al. Low-field NMR determination of water distribution in meat batters with NaCl and polyphosphate addition[J]. *Food Chemistry*, 2016, 200: 308-314. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.01.013.
- [33] 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. DOI:10.1016/j.foodres.2014.05.062.

- [34] MIKLOS R, CHEONG L Z, XU X, et al. Water and fat mobility in myofibrillar protein gels explored by low-field NMR[J]. Food Biophysics, 2015, 10(3): 316-323. DOI:10.1007/s11483-015-9392-5.
- [35] GAGNON M A, 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. DOI:10.1366/000370207780466136.
- [36] SÁNCHEZ-ALONSO I, MARTINEZ 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): 1626-1634. DOI:10.1016/j.foodchem.2012.06.038.
- [37] XU X L, HAN M Y, FEI Y, et al. Raman spectroscopic study of heat-induced gelation of pork myofibrillar proteins and its relationship with textural characteristic[J]. Meat Science, 2011, 87(3): 159-164. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.10.001.
- [38] WANG Z, LIANG J, JIANG L, et al. Effect of the interaction between myofibrillar protein and heat-induced soy protein isolates on gel properties[J]. CyTA-Journal of Food, 2015, 13(4): 527-534. DOI:10.1080/19476337.2015.1011240.
- [39] WU C H, 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. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.01.125.
- [40] 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. DOI:10.1016/j.procbio.2013.03.015.
- [41] JIAN W J, 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. DOI:10.1016/j.carbpol.2016.05.001.
- [42] HU Y Q, LIU W, YUAN C, et al. Enhancement of the gelation properties of hairtail (*Trichiurus haumela*) muscle protein with curdlan and transglutaminase[J]. Food Chemistry, 2015, 176: 115-122. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.12.006.