再生纤维素-乳清分离蛋白乳化液对乳化肠品质的影响

赵尹毓，田筱娜，周光宏，张万刚*

（南京农业大学食品科技学院，江苏省肉类生产与加工质量安全控制协同创新中心，
肉品加工与质量控制教育部重点实验室，江苏 南京 210095）

摘　要：利用再生纤维素（regenerated cellulose，RC）-乳清分离蛋白（whey protein isolate，WPI）乳化液替代乳化肠中0%、33%、66%和100%的猪背膘，研究RC乳化液对乳化肠化学组成、颜色、蒸煮损失、质构、脂肪酸组成、脂肪氧化以及肉糜动态储存模量（G'）的影响。结果表明：随着RC-WPI乳化液含量的增加，乳化肠中脂肪含量和脂肪氧化程度显著降低（P＜0.05），亮度值显著提高（P＜0.05）；与对照组（C）相比，替代66%（T2）组蒸煮损失显著降低（P＜0.05）；添加乳化液肉糜的动态G'高于对照组，替代33%（T1）和66%（T2）的猪背膘时，乳化肠的硬度、弹性和咀嚼性显著高于对照组（P＜0.05）；随着替代比例的增加单不饱和脂肪酸含量显著提高，饱和脂肪酸含量显著降低（P＜0.05）。结果表明，RC-WPI橄榄油乳化液替代66%猪背膘时，可以提高乳化肠品质并且改善脂肪酸组成。

关键词：再生纤维素；乳清分离蛋白；乳化液；低脂乳化肠；脂肪酸

Effect of Regenerated Cellulose-Whey Protein Isolate Emulsion on the Quality of Emulsified Sausages

ZHAO Yinyu, TIAN Xiaona, ZHOU Guanghong, ZHANG Wangang*

(Key Laboratory of Meat Processing and Quality Control, Ministry of Education,
Jiangsu Collaborative Innovation Center of Meat Production and Processing, Quality and Safety Control,
College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: The purpose of this study was to investigate the effects of regenerated cellulose (RC)-whey protein isolate (WPI) emulsion used as pork back fat replacer (0%, 33%, 66% and 100%) on the proximate composition, color, cooking loss, texture, fatty acid profile, lipid oxidation and dynamic storage modulus (G') of low-fat emulsified sausages. The results indicated that the emulsified sausages showed a significant reduction in fat content and lipid oxidation (P < 0.05) and a significant increase in lightness (P < 0.05) with increasing percentage of RC-WPI emulsion. The 66% emulsion (T2) group showed a significant reduction in cooking loss (P < 0.05). Dynamic storage modulus (G') was higher for samples with RC-WPI emulsion compared to the control (C). The hardness, springiness and chewiness of the emulsified sausages with 33% (T1) and 66% (T2) emulsion were significantly higher than those of the control (C) (P < 0.05). Emulsified sausages showed a significant increase in polyunsaturated fatty acid content and a significant decrease in saturated fatty acid content with increasing proportion of pork fat replacement by the emulsion (P < 0.05). In conclusion, olive oil emulsion stabilized by RC and WPI as a substitute for pork back fat could effectively improve the quality and fatty acid profile of emulsified sausages.

Keywords: regenerated cellulose; whey protein isolate; emulsion; low-fat emulsified sausage; fatty acid

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180314-182

中图分类号：TS251.5.1　　文献标志码：A　　文章编号：1002-6630（2019）10-0015-06

收稿日期：2018-03-14

基金项目：“十三五”国家重点研发计划重点专项（2016YFD0400700；2016YFD0400703；2018YFD0400101）；
国家生猪产业技术体系建设专项（CARS-35）；
肉类食品质量安全控制及营养学创新引智基地（“111基地”）项目（B14023）

第一作者简介：赵尹毓（1993—）（ORCID: 0000-0002-6149-6527），女，硕士研究生，研究方向为肉品质量安全控制。
E-mail: 2016108071@njau.edu.cn

*通信作者简介：张万刚（1977—）（ORCID: 0000-0001-8425-198X），男，教授，博士，研究方向为肉品质量安全控制。
E-mail: wangang.zhang@njau.edu.cn

引文格式：
赵尹毓, 田筱娜, 周光宏, 等. 再生纤维素-乳清分离蛋白乳化液对乳化肠品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(10): 15-20. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180314-182. http://www.spkx.net.cn
ZHAO Yinyu, TIAN Xiaona, ZHOU Guanghong, et al. Effect of regenerated cellulose-whey protein isolate emulsion on the quality of emulsified sausages[J]. Food Science, 2019, 40(10): 15-20. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180314-182. http://www.spkx.net.cn

在传统乳化类肉制品中通常含有30%的动物脂肪[1]，脂肪在改善乳化类肉制品品质方面起着重要作用[2]，不仅为产品提供特殊的风味，良好的质构和多汁的口感，还有助于改善肉糜体系的稳定性，减少蒸煮损失[3]。然而，有研究表明，动物脂肪的摄入与高血压、心血管疾病、糖尿病和肥胖等慢性疾病有关[4-5]。随着消费者对于肉制品营养健康要求的不断提高，低脂肉制品受到更多消费者的青睐，其成为食品领域的重要研究方向[6]。但有研究指出，降低脂肪添加量会显著降低肉制品的感官品质与质构特性[7]，因此研究在降低脂肪含量的同时，可以保持或改善肉制品品质的脂肪替代物，对于生产低脂肉制品具有重要意义。

近年来，很多研究将蛋白质稳定的植物油预乳化液作为脂肪替代物应用到低脂肉制品中，以预乳化液形式存在的植物油可以形成较小的脂肪球颗粒，从而可以更好的与肉基质结合并产生更加稳定的肉糜体系，提高乳化类肉制品的质构特性[8-10]。Gao Leng等[11]利用预乳化向日葵油取代麋鹿肠中的不同比例的猪背膘，结果显示乳化向日葵油取代度越高，低脂香肠的蒸煮损失降低，脂肪含量和硫代巴比妥酸反应物（thiobarbituric acid reactive substances，TBARS）值降低，氧化稳定性提高，并且乳化液可以改善香肠质构。王晓娟等[12]利用酪蛋白酸钠-葵花籽油乳化液替代脂肪可显著改善乳化肠的品质及营养特性。Bishop等[13]研究玉米油预乳化液替代猪背膘对博洛尼亚肠品质的影响，结果表明预乳化处理可以降低产品的脂肪含量和硬度，而且玉米油乳化液组的产品颜色不受影响。

与动物脂肪相比，不含胆固醇的橄榄油具有较高的不饱和脂肪酸，可以降低胆固醇水平，而且由于橄榄油中含有丰富的亚油酸，可以预防心血管疾病等[8]。但是预乳化液容易出现分层、絮凝等脱稳问题，在实际应用中存在一定的局限性[14]。由微晶纤维素通过磷酸溶解和水再生得到的凝胶态再生纤维素（regenerated cellulose，RC）具有较高的表面活性，有疏水和亲水基团，本课题组研究表明RC具有很强的增稠能力，可以增加脂肪球周围的吸附层的厚度以及形成空间位阻实现乳液体系的稳定[15]。由于RC具有很好的持水性而呈现出凝胶状态，具有与动物脂肪相似的质地和口感[16]。

通过之前的研究发现[17]，在含有30%橄榄油和2%乳清分离蛋白（whey protein isolate，WPI）的预乳化液中，添加1.2% RC可以得到性质稳定的RC-WPI乳化液，但是将RC-WPI乳化液作为脂肪替代物应用到低脂乳化肠的研究鲜见报道。因此，本研究旨在用RC稳定的WPI-橄榄油预乳化液作为脂肪替代物制备低脂乳化肠，探究不同比例乳化液对乳化肠理化品质、脂肪酸组成、脂肪氧化以及肉糜动态储存模量（G'）的影响。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜猪后腿肉、猪背膘 江苏省雨润集团；微晶纤维素 山东曲阜天利药用辅料有限公司；WPI（蛋白质质量分数90%） 河南正兴食品有限公司；欧丽薇兰橄榄油 南京苏果超市；脂肪酸标准品 美国Supelco公司；85%磷酸（食品级） 江苏澄星磷化工有限公司；其他试剂均为市售分析纯。

1.2 仪器与设备

LSHZ-300型冷冻水浴恒温振器 常州诺基仪器有限公司；Beckman Avanti J-E离心机 美国Beckman Coulter公司；Ultra Turrax T-25 Basic高速匀浆机、C-MAG HS7磁力搅拌器 德国IKA公司；FE20 pH计 梅特勒-托利多仪器有限公司；电热恒温鼓风干燥箱 上海亚荣生化仪器厂；BZBJ-40斩拌机 杭州艾博科技工程有限公司；2300凯氏定氮仪 瑞士FOSS公司；CR-400色差计 日本Konica Minolta公司；TA-XT plus质构仪 英国Stable Micro Systems公司；TRACE GC Ultra气相色谱仪 美国Thermo公司；MCR301旋转流变仪 奥地利安东帕（中国）有限公司。

1.3 方法

1.3.1 RC及RC-WPI乳化液的制备

RC的制备根据Jia Xuejuan等[16]方法有部分修改。称取4 g微晶纤维素，加入12 g去离子水润湿，再加入160 mL预冷过的食品级磷酸，充分摇匀后置于4 ℃低温振荡器中匀速振荡；24 h后取出，并向澄清黏稠的液体中加入800 mL去离子水，用玻璃棒混匀，然后在16 500×g离心15 min取沉淀，水洗离心操作重复数次，直到上清液pH值恒定在6.0～6.5，最终获得半固体凝胶态的RC，通过烘箱称重法得到RC质量分数为4.35%。

RC-WPI乳化液的制备：将WPI过夜溶解在去离子水中，然后加入橄榄油，12 000 r/min匀浆1.5 min获得预乳化液；向预乳化液中加入RC和去离子水，继续以12 000 r/min匀浆1.5 min，最终得到稳定的RC-WPI乳化液。乳化液中橄榄油、WPI和RC的质量分数分别为30%、2.0%和1.2%。为了避免高速匀浆过热使WPI变性，保证匀浆操作在冰浴条件下进行。乳化液制备完成后置于4 ℃储存，24 h内使用。

1.3.2 乳化肠的制作

本实验制备4 组乳化肠，对照组（C）：猪后腿肉添加量为50%，猪背膘添加量为30%，预乳化液替代比例为0%。另外3 组为取代组，猪后腿肉比例不变，RC-WPI乳化液分别取代33%（T1）、66%（T2）、100%（T3）的猪背膘，猪背膘和RC-WPI乳化液的添加量以及其他辅料含量如表1所示。

表 1 不同比例RC-WPI乳化液替代猪背膘的乳化肠配方

Table 1 Formulation of emulsified sausages with different proportions of RC-WPI emulsion

%

配料	C	T1	T2	T3
猪后腿肉	50	50	50	50
猪背膘	30	20	10	0
冰水	20	20	20	20
乳化液	0	10	20	30
食盐	1.5	1.5	1.5	1.5
三聚磷酸盐	0.3	0.3	0.3	0.3
蔗糖	0.5	0.5	0.5	0.5
白胡椒粉	0.24	0.24	0.24	0.24

注：C.对照组，表示RC-WPI乳化液替代0%猪背膘；T1.替代组，表示RC-WPI乳化液替代33%猪背膘；T2.替代组，表示RC-WPI乳化液替代66%猪背膘；T3.替代组，表示RC-WPI乳化液替代100%猪背膘。

乳化肠制备工艺流程：以新鲜猪后腿肉为原料肉，去除结缔组织和肌内脂肪。将猪后腿肉和猪背膘分别通过绞肉机绞碎。取后腿肉，加入1.5 g食盐、0.3 g三聚磷酸钠、0.5 g蔗糖、0.24 g白胡椒和1/3冰水，用真空切碎机以1 500 r/min的转速斩拌30 s，随后以3 000 r/min斩拌1 min；再加入猪背膘或RC-WPI乳化液和1/3冰水加入并以3 000 r/min继续斩拌1 min。最后，加入剩余的1/3冰水，以3 000 r/min斩拌1 min，得到肉糜。在整个操作过程中，肉糜的温度不得高于12 ℃。将部分生肉糜直接放入4 ℃储存用于测定肉糜动态G'，测试在肉糜制备好12 h内完成。将剩下的肉糜真空填充到直径为25 mm的胶原肠衣中，并在80 ℃的水浴中煮至中心温度为72 ℃，冷却至室温后，乳化肠样品贮藏在4 ℃并在7 d内进行测定。

1.3.3 乳化肠化学组成测定

水分含量测定：方法参照GB/T 5009.3—2010《食品中水分的测定》[18]；脂肪含量测定：参照Bligh等[19]的方法；蛋白质含量测定：采用凯氏定氮法；脂肪酸组成测定：根据Salcedo-Sandoval等[20]方法。

1.3.4 色差测定

使用色差计测定乳化香肠的颜色，用白板（L^*＝96.86，a^*＝－0.15，b^*＝1.87）校准，将样品室温放置0.5 h，切成高20 mm的圆柱体，选取3 个不同的区域测定L^*（亮度）、a^*（红度）、b^*（黄度）的值。

1.3.5 蒸煮损失测定

蒸煮损失表示乳化肠样品蒸煮前后质量的损失率，计算公式如下：

$$蒸煮损失/\% = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

式中：m_1为乳化肠样品蒸煮前质量/g；m_2为乳化肠样品蒸煮后质量/g。

1.3.6 质构测定

乳化肠质构测定参照Gao Xueqin等[21]的方法。在测试之前，使样品在室温放置2 h，然后将乳化肠样品切成20 mm高×25 mm直径的圆柱体，使用TA-XT plus质构仪测定乳化肠的硬度、弹性、内聚性和咀嚼性等指标。测试条件如下：探头类型为P/50圆柱形；测试前速率和测试速率均为2.0 mm/s，测试后速率为5.0 mm/s，压缩比为50%，触发力为5 g。

1.3.7 肉糜动态G'测定

参照Kang Zhuangli等[22]的方法并稍作修改。用Physica MCR301流变仪测定肉糜动态G'，选用50 mm直径的平行板探头（PP50），将肉糜样品涂匀，在20 ℃平衡3 min。测试参数为狭缝空隙1 mm，角频率2 Hz，应变7%，测试初始温度20 ℃，终止温度80 ℃，升温速率2 ℃/min。为了防止升温过程中样品中水分等的蒸发，滴加硅油密封。

1.3.8 脂肪氧化测定

根据Zhang Wangang等[23]的方法测定乳化肠样品第1、3、7天的TBARS含量，以确定样品中脂肪氧化的程度。取5 g绞碎的乳化肠样品，加入5 倍体积7.5%的TCA（含有0.1% EDTA的三氯乙酸溶液），混合物在8 000 r/min匀浆1 min，然后3 000×g离心5 min，取2 mL上清液再加入2 mL硫代巴比妥酸溶液（0.02 mol/L）于离心管中充分混匀，并在95 ℃水浴中加热35 min，取出后冷却至室温并测定在532 nm波长处的吸光度。通过1,1,3,3-四乙氧基丙烷的标准曲线计算TBARS值，结果表示为mg/kg。

1.4 统计分析

实验重复测定4 次，数据结果采用SAS 8.1软件进行单因素方差分析（One-way ANOVA），数据的表示形式为$\bar{x} \pm s$，多重比较采用Duncan方法，不同字母表示差异显著（P＜0.05）。

2　结果与分析

2.1　乳化肠化学组成分析

表 2　不同比例RC-WPI乳化液替代猪背膘对乳化肠化学组成的影响
Table 2　Proximate composition of emulsified sausages with different proportions of RC-WPI emulsion

%

化学组成	C	T1	T2	T3
水分质量分数	57.50±0.44[d]	62.61±0.38[c]	66.58±1.00[b]	70.41±1.01[a]
脂肪质量分数	25.69±0.74[a]	19.32±0.91[b]	14.10±1.46[c]	8.78±0.60[d]
蛋白质质量分数	13.24±0.78[c]	13.80±0.71[bc]	14.52±0.58[ab]	15.06±0.14[a]

注：同行不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。下同。

由表2可知，随着RC-WPI乳化液替代比例增加，乳化肠的水分含量显著提高（P<0.05），这是因为乳化液中水分含量高于猪背膘乳并且RC具有很好的保水性；而脂肪含量显著降低（P<0.05），由对照组（C）的25.69%减低到T3替代组的8.78%；蛋白质含量逐渐增加，当乳化液替代66%（T2）和100%（T3）猪背膘时，乳化肠中的蛋白质含量显著高于对照组（C）（P<0.05），主要是因为乳化液中使用WPI作为乳化剂，从而提高了乳化肠中的蛋白质含量。王晓娟等[12]用酪蛋白酸钠-葵花籽油预乳化液替代猪背膘生产乳化肠，增加替代比例后，乳化肠的水分含量、蛋白质含量提高，而脂肪含量显著降低，与本研究结果相似。

2.2　乳化肠颜色分析

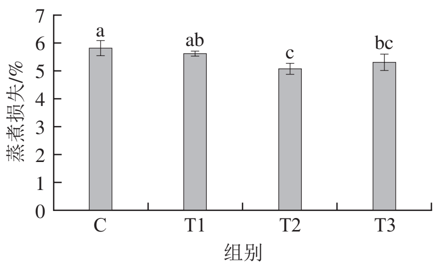
表 3　不同比例RC-WPI乳化液替代猪背膘对乳化肠颜色的影响
Table 3　Color comparison of emulsified sausages with different proportions of RC-WPI emulsion

色差	C	T1	T2	T3
L^*	80.65±0.58[c]	81.12±0.99[c]	82.57±0.72[b]	83.79±0.62[a]
a^*	3.10±0.15[a]	2.97±0.15[a]	2.45±0.08[b]	2.11±0.10[c]
b^*	11.79±0.18[a]	11.70±0.13[a]	11.45±0.08[b]	11.12±0.12[c]

如表3所示，当RC-WPI乳化液替代比例为33%（T1）时，乳化肠的L^*、a^*和b^*值与对照组（C）没有显著差异（P>0.05），随着替代比例增加到66%（T2）和100%（T3）时，乳化肠的L^*值显著高于对照组（C）（P<0.05），而a^*和b^*值显著降低（P<0.05）。Jiménez-Colmenero等[8]研究发现，用不同蛋白稳定的橄榄油乳化液替代脂肪降低了法兰克林香肠的b^*值，但是同时提高了L^*和a^*值。有研究表明，低脂肉制品中L^*、a^*和b^*值受到脂肪替代物来源的影响[24]，而在本研究中，RC-WPI乳化液呈现出亮白色，这可能是导致L^*值增加而a^*和b^*值下降的原因。

2.3　乳化肠蒸煮损失分析

如图1所示，随着RC-WPI乳化液含量的增加，蒸煮损失呈先降低后增加的趋势，但替代组均低于对照组，当替代66%（T2）的脂肪时乳化肠的蒸煮损失是最低的（P<0.05）。有研究结果与本实验相似，以乳清蛋白-大豆油乳化液为脂肪替代物，当替代66%猪背膘时，乳化肠的乳化稳定性最好，蒸煮损失最低。相比与猪背膘，用RC稳定的乳化液的脂肪颗粒更小，可以在肉糜体系中均匀分布[25]，而且乳化液中添加的WPI可以包裹住一些游离脂肪球颗粒，利于肌原纤维蛋白在加热后形成紧密的蛋白凝胶，从而可以更好的结合水分和脂肪，减少加热过程中的蒸煮损失。



不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

图 1　不同比例乳化液替代猪背膘对乳化肠蒸煮损失的影响
Fig. 1　Cooking loss of emulsified sausages with different proportions of RC-WPI emulsion

2.4　乳化肠质构特性分析

表 4　不同比例乳化液替代猪背膘对乳化肠质构的影响
Table 4　Texture profile of emulsified sausages with different proportions of RC-WPI emulsion

质构特性	C	T1	T2	T3
硬度/N	40.11±0.86[b]	44.95±1.43[a]	42.96±1.65[a]	39.60±1.74[b]
弹性	0.852±0.012[c]	0.880±0.012[b]	0.894±0.007[ab]	0.897±0.011[a]
内聚性	0.686±0.009[ab]	0.696±0.004[a]	0.687±0.011[ab]	0.674±0.006[b]
咀嚼性/（N•mm）	24.01±0.73[c]	28.24±0.94[a]	26.30±1.05[b]	23.32±0.84[c]

如表4所示，RC-WPI乳化液替代33%（T1）和66%（T2）的猪背膘时，乳化肠的硬度和咀嚼性都显著高于对照组（C）（P<0.05）。Jiménez-Colmenero等[8]研究认为较小的乳化液颗粒在斩拌过程中可以更加均匀的分布在肉糜体系中，而且乳化液中的RC颗粒可以有效地填充到肉蛋白质基质中而不破坏蛋白质网络结构[26-27]，从而促进肌原纤维蛋白形成更高强度的凝胶，使乳化肠的硬度和咀嚼性显著增强。但当替代比例增加到100%时，硬度显著降低，与对照组没有显著差异（P>0.05），这可能是因为乳化液中水分含量较高，而导致最终乳化肠产品中含有过高的水分，使乳化肠的硬度降低[20]。与对照组（C）相比，添加乳化液的乳化肠弹性均显著提高（P<0.05），而内聚性没有显著差异（P>0.05）。

2.5　肉糜动态G'分析

图2显示出了乳化肠肉糜凝胶形成过程中G'变化过程，从整体看，添加与不添加RC-WPI乳化液的

肉糜，热诱导凝胶过程的变化趋势相似，属于典型的肌原纤维蛋白凝胶化过程，主要经历3 个阶段[28]。第1阶段，43～48 ℃左右，G'不断升高并达到最大值，这是由于肌原纤维蛋白头部变形发生蛋白交联引起的；第2阶段，当温度超过48 ℃时，G'开始下降，主要是因为肌原纤维蛋白的尾部逐渐展开，导致肉糜凝胶的流动性增加，破坏了已经形成的蛋白网络结构；第3阶段，60～80 ℃，G'急剧上升，这是因为温度的升高，肌原纤维蛋白分子展开，分子间相互交联增强，由松散的蛋白网络结构转向紧密结构，从而形成不可逆的三维网络凝胶结构。替代33%（T1）和66%（T2）猪背膘的肉糜凝胶强度要显著高于对照组（C），乳化肠中的部分脂肪被RC-WPI乳化液所替代，由于乳化液中脂肪粒径较小，可以与RC颗粒一起有效的填充在肌原纤维网络结构中，有助于形成更紧密的凝胶结构，在一定程度上提高了乳化肠的凝胶强度和弹性，这与乳化肠的质构研究结果一致（表4）。

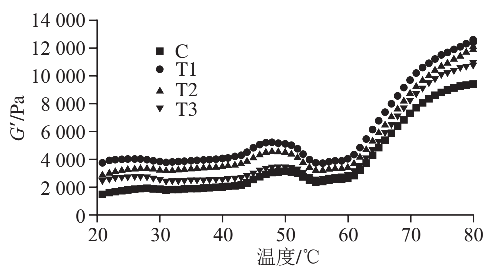


图 2　不同比例乳化液替代猪背膘对乳化肠肉糜G'的影响

Fig. 2　Dynamic storage modulus (G') of meat batter with different proportions of RC-WPI emulsion

2.6　乳化肠脂肪酸组成分析

表 5　不同比例乳化液替代猪背膘对乳化肠脂肪酸组成的影响（占总脂肪酸的百分比）

Table 5　Fatty acid composition of emulsified sausages with different proportions of RC-WPI emulsion

%

脂肪酸	C	T1	T2	T3
肉豆蔻酸$C_{14:0}$	$1.33±0.04^a$	$1.09±0.02^b$	$0.77±0.01^c$	$0.12±0.01^d$
棕榈酸$C_{16:0}$	$24.08±0.27^a$	$22.12±0.09^b$	$18.88±0.09^c$	$12.31±0.03^d$
硬脂酸$C_{18:0}$	$10.89±0.23^a$	$10.07±0.14^b$	$8.02±0.03^c$	$3.36±0.04^d$
花生酸$C_{20:0}$	$0.17±0.008^a$	$0.20±0.003^b$	$0.24±0.005^c$	$0.33±0.007^d$
棕榈酸$C_{16:1}$	$2.38±0.06^a$	$2.12±0.02^b$	$1.82±0.01^c$	$1.28±0.01^d$
油酸$C_{18:1}$	$41.47±0.41^d$	$46.01±0.10^c$	$53.76±0.06^b$	$69.50±0.09^a$
二十碳烯酸$C_{20:1}$	$0.76±0.03^a$	$0.70±0.05^a$	$0.58±0.04^b$	$0.30±0.01^c$
亚油酸$C_{18:2}$	$15.15±0.57^a$	$13.85±0.16^b$	$11.76±0.08^c$	$7.32±0.02^d$
亚麻酸$C_{18:3}$	$0.77±0.040^a$	$0.67±0.027^b$	$0.62±0.010^c$	$0.45±0.001^d$
二十碳二烯酸$C_{20:2}$	$0.65±0.022^a$	$0.57±0.002^b$	$0.42±0.010^c$	$0.05±0.004^d$
二十碳四烯酸$C_{20:4}$	$0.20±0.011^c$	$0.22±0.014^{bc}$	$0.24±0.004^{ab}$	$0.25±0.002^a$
ΣSFA	$38.43±0.43^a$	$35.74±0.08^b$	$30.74±0.14^c$	$20.80±0.09^d$
ΣMUFA	$44.79±0.38^d$	$48.94±0.13^c$	$56.24±0.04^b$	$71.13±0.10^a$
ΣPUFA	$16.78±0.66^a$	$15.32±0.18^b$	$13.02±0.11^c$	$8.06±0.02^d$
SAF/UFA	$0.62±0.01^a$	$0.56±0.002^b$	$0.44±0.003^c$	$0.26±0.001^d$

注：SAF.饱和脂肪酸；UFA.不饱和脂肪酸；PUFA.多不饱和脂肪酸。

如表5所示，随着预乳化液替代比例的增加饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸在总脂肪酸组成中所占比例显著降低（P＜0.05），饱和脂肪酸由对照组的38.43%降低到100%替代组（T3）替代组的20.80%，单不饱和脂肪酸比例显著升高（P＜0.05），尤其是乳化肠中的油酸由对照组的41.47%增加到100%替代组（T3）的69.50%，所以替代100%（T3）猪背膘时乳化肠具有最低的SAF/UFA值。猪背膘中含有较多的饱和脂肪酸和油酸，而橄榄油中饱和脂肪酸含量低，却富含80%左右的单不饱和脂肪酸（油酸）[14]，这与本研究结果一致。利用其他植物油乳化液替代猪背膘的乳化肠在脂肪酸组成与本实验存在差异，如王晓娟等[12]用葵花籽油预乳化液替代猪背膘制备乳化肠时，单不饱和脂肪酸在总脂肪酸组成中所占比较降低，多不饱和脂肪酸比例逐渐升高。这是由于不同来源植物油中脂肪酸组成不同，但是最终饱和脂肪酸所占的比例都是显著降低，不饱和脂肪酸的比例显著增高，SAF/UFA值显著降低。由此可见，用RC-WPI乳化液替代猪背膘制备乳化肠可以有效改善了乳化肠中的脂肪酸成分组成，低脂乳化肠中单不饱和脂肪酸比例显著提高。

2.7　乳化肠脂肪氧化分析

表 6　不同比例乳化液替代猪背膘对乳化肠脂肪氧化（TBARS值）的影响

Table 6　TBARS values of emulsified sausages with different proportions of RC-WPI emulsion

贮藏时间/d	C	T1	T2	T3
1	$0.35±0.01^a$	$0.22±0.01^b$	$0.18±0.01^c$	$0.08±0.01^d$
3	$0.54±0.03^a$	$0.32±0.01^b$	$0.21±0.01^c$	$0.12±0.01^d$
7	$0.72±0.06^a$	$0.43±0.01^b$	$0.26±0.01^c$	$0.13±0.01^d$

如表6所示，在同一贮藏时间内，添加乳化液替代猪背膘的乳化肠中，TBARS值均显著低于对照组（C）（P＜0.05），随着贮藏时间延长，同一处理组的TBARS值均升高，脂肪氧化程度增加。肉制品中的脂肪氧化程度一般受脂肪含量和脂肪酸组成影响较大[23,29]，虽然乳化液中的橄榄油不饱和脂肪酸含量较高，但是由于添加到乳化肠中的橄榄油含量很低，所以含有乳化液的乳化肠中TBARS值要低于对照组。有研究用葵花籽油乳化液替代脂肪[12]，替代组的脂肪氧化程度要显著低于对照组，与本研究结果一致。而且有研究表明微晶纤维素表现出抗氧化活性，可以作为抗氧化剂来提高乳化液的氧化稳定性[30]，在本研究中，乳化液中添加的RC是来源于微晶纤维素，可能也起到了一定的抗氧化作用，所以，添加RC-WPI乳化液可以有效改善乳化肠产品在加工过程中的氧化稳定性。

3 结 论

在乳化肠中添加RC-WPI乳化液部分或完全替代猪背膘，可以显著影响乳化肠的理化品质，脂肪氧化以及脂肪酸组成。随着乳化液替代比例增加，由于乳化肠的脂肪含量显著降低，乳化肠在贮藏期间的脂肪氧化得到显著抑制，对于延长产品的货架期很有益。在脂肪酸组成方面更加营养健康，饱和脂肪酸在总脂肪酸组成中所占比例显著降低，单不饱和脂肪酸比例显著增加。替代66%（T2）的猪背膘时，乳化肠的蒸煮损失降到最低，可以显著提高产品得率，但是当替代100%猪背膘时蒸煮损失显著提高。相比与对照组（C），替代33%（T2）和66%（T2）的猪背膘时，乳化肠的硬度、弹性和咀嚼性明显得到改善。所以，综合以上结果用RC-WPI乳化液替代猪背膘生产乳化肠时最佳替代比例为66%，既可以有效提高产品质构和产品得率，又可以改善乳化肠脂肪酸组成，提高其营养特性。

参考文献：

[1] CHOI Y S, CHOI J H, HAN D J, et al. Effects of replacing pork back fat with vegetable oils and rice bran fiber on the quality of reduced-fat frankfurters[J]. Meat Science, 2010, 84(3): 557-563. DOI:10.1016/j.meatsci.2009.10.012.

[2] CHOI Y S, KIM H W, SONG D H, et al. Quality characteristics and sensory properties of reduced-fat emulsion sausages with Brown Rice Fiber[J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2011, 31(4): 521-529. DOI:10.5851/kosfa.2011.31.4.521.

[3] YOO S S, KOOK S H, PARK S Y, et al. Physicochemical characteristics, textural properties and volatile compounds in comminuted sausages as affected by various fat levels and fat replacors[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2007, 42(9): 1114-1122. DOI:10.1111/j.1365-2621.2006.01402.x.

[4] OEZVURAL E B, VURAL H. Utilization of interesterified oil blends in the production of frankfurters[J]. Meat Science, 2008, 78(3): 211-216. DOI:10.1016/j.meatsci.2007.06.012.

[5] VICKERY A P, ROGERS R W. The use of fat replacers in low-fat pepperoni[J]. Journal of Muscle Foods, 2002, 13(3): 205-222. DOI:10.1111/j.1745-4573.2002.tb00331.x.

[6] 乔彩利, 范晓全, 刘慕华, 等. 再生纤维素凝胶对发酵香肠品质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(15): 49-55. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201615009.

[7] CHOI Y S, KIM Y B, HWANG K E, et al. Effect of apple pomace fiber and pork fat levels on quality characteristics of uncured, reduced-fat chicken sausages[J]. Poultry Science, 2016, 95(6): 1465-1471. DOI:10.3382/ps/pew096.

[8] JIMÉNEZ-COLMENERO F, HERRERO A, PINTADO T, et al. Influence of emulsified olive oil stabilizing system used for pork backfat replacement in frankfurters[J]. Food Research International, 2010, 43(8): 2068-2076. DOI:10.1016/j.foodres.2010.06.010.

[9] MORA-GALLEGO H, SERRA X, DOLORS GUARDIA M, et al. Effect of the type of fat on the physicochemical, instrumental and sensory characteristics of reduced fat non-acid fermented sausages[J]. Meat Science, 2013, 93(3): 668-674. DOI:10.1016/j.meatsci.2012.11.042.

[10] MORAIS C S N, MORAIS JUNIOR N N, VICENTE-NETO J, et al. Mortadella sausage manufactured with Caiman yacare (*Caiman crocodilus yacare*) meat, pork backfat, and soybean oil[J]. Meat Science, 2013, 95(2): 403-411. DOI:10.1016/j.meatsci.2013.04.017.

[11] GAO L, HUANG Y P, GAO X C. Influence of pre-emulsified sunflower oil used for pork backfat replacement in Sika deer (*Cervus nippon hortulorum*) frankfurter[J]. Food Science and Technology Research, 2013, 19(5): 773-780. DOI:10.3136/fstr.19.773.

[12] 王晓娟, 李伟锋, 唐长波, 等. 酪蛋白酸钠-葵花籽油协同对乳化肠品质特性的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(3): 51-56. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201503010.

[13] BISHOP D J, OLSON D G, KNIPE C L. Pre-emulsified corn-oil, pork fat, or added moisture affect quality of reduced fat bologna quality[J]. Journal of Food Science, 1993, 58(3): 484-487. DOI:10.1111/j.1365-2621.1993.tb04306.x.

[14] CALERO N, MUNOZ J, COX P W, et al. Influence of chitosan concentration on the stability, microstructure and rheological properties of O/W emulsions formulated with high-oleic sunflower oil and potato protein[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 30(1): 152-162. DOI:10.1016/j.foodhyd.2012.05.004.

[15] JIA X, XU R, SHEN W, et al. Stabilizing oil-in-water emulsion with amorphous cellulose[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 43: 275-282. DOI:10.1016/j.foodhyd.2014.05.024.

[16] JIA X J, CHEN Y W, SHI C, et al. Rheological properties of an amorphous cellulose suspension[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 39: 27-33. DOI:10.1016/j.foodhyd.2013.12.026.

[17] 赵尹毓, 田筱娜, 周光宏, 等. 再生纤维素凝胶对乳清分离蛋白预乳化液稳定性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(6): 16-21. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180109-108.

[18] 卫生部. 食品中水分的测定: GB/T 5009.3—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

[19] BLIGH E G, DYER W J. A rapid method of total lipid extraction and purification[J]. Canadian Journal of Biochemistry and Physiology, 1959, 37(8): 911-917. DOI:10.1139/y59-099.

[20] SALCEDO-SANDOVAL L, COFRADES S, RUIZ-CAPILLAS PEREZ C, et al. Healthier oils stabilized in konjac matrix as fat replacers in *n*-3 PUFA enriched frankfurters[J]. Meat Science, 2013, 93(3): 757-766. DOI:10.1016/j.meatsci.2012.11.038.

[21] GAO X Q, KANG Z L, ZHANG W G, et al. Combination of kappa-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. DOI:10.1007/s11947-015-1516-x.

[22] KANG Z L, WANG P, XU X L, et al. Effect of a beating process, as a means of reducing salt content in Chinese-style meatballs (kung-wan): a dynamic rheological and Raman spectroscopy study[J]. Meat Science, 2014, 96(2): 669-674. DOI:10.1016/j.meatsci.2013.09.024.

[23] ZHANG W G, XIAO S, LEE E J, et al. Consumption of oxidized oil increases oxidative stress in broilers and affects the quality of breast meat[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(3): 969-974. DOI:10.1021/jf102918z.

[24] CHOI Y S, CHOI J H, HAN D J, et al. Effects of *Laminaria japonica* on the physico-chemical and sensory characteristics of reduced-fat pork patties[J]. Meat Science, 2012, 91(1): 1-7. DOI:10.1016/j.meatsci.2011.11.011.

[25] 赵颖颖, 邹玉峰, 王鹏, 等. 预乳化液超声处理对低脂法兰克福香肠品质的影响[J]. 中国农业科学, 2014(13): 2634-2642. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2014.13.015.

[26] GIBIS M, SCHUH V, WEISS J. Effects of carboxymethyl cellulose (CMC) and microcrystalline cellulose (MCC) as fat replacers on the microstructure and sensory characteristics of fried beef patties[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 45: 236-246. DOI:10.1016/j.foodhyd.2014.11.021.

[27] CHOI Y S, KIM H W, HWANG K E, et al. Physicochemical properties and sensory characteristics of reduced-fat frankfurters with pork back fat replaced by dietary fiber extracted from makgeolli lees[J]. Meat Science, 2014, 96(2): 892-900. DOI:10.1016/j.meatsci.2013.08.033.

[28] 潘丽华, 冯美琴, 孙健, 等. 不同温度下亚麻籽胶对肌原纤维蛋白凝胶特性的影响及机制[J]. 食品科学, 2016, 37(9): 1-6. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201609001.

[29] ESTEVEZ M, VENTANAS S, CAVA R. Physicochemical properties and oxidative stability of liver pate as affected by fat content[J]. Food Chemistry, 2005, 92(3): 449-457. DOI:10.1016/j.foodchem.2004.08.014.

[30] KARGAR M, FAYAZMANESH K, ALAVI M, et al. Investigation into the potential ability of Pickering emulsions (food-grade particles) to enhance the oxidative stability of oil-in-water emulsions[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2012, 366(1): 209-215. DOI:10.1016/j.jcis.2011.09.073.