专题研究专栏

编者按:乳化凝胶型肉制品是加工食品中的重要品类,而功能性添加物对此类产品品质的影响是近期肉品科学领域的研究热点。这类影响主要体现在两个方面:第一是添加物是否影响肉蛋白稳定水-肉的乳化作用以及在加热下有序组装的凝胶功能;第二是添加物能否提升产品的营养品质,从而使肉制品成为功能性营养成分的载体。本期文章选择了姜黄素、燕麦β-葡聚糖、圆苞车前子壳粉三种功能添加物,分别从以下角度进行了研究:利用油相负载姜黄素,再以姜黄素高浓度乳化物替代乳化肠中的背膘脂肪,以提升产品营养品质;在肌原纤维蛋白体系中添加燕麦β-葡聚糖,研究其对肌原纤维蛋白体系的乳化活性和凝胶结构的影响;圆苞车前子壳粉的添加对肉饼制品的保水性、微结构和质构性质的影响。这三项研究对以功能性成分提升肉蛋白体系的乳化凝胶性能、产品营养品质以及对功能性肉制品的开发等具有重要参考价值。 (主持人:徐幸莲教授)

doi:10.3969/j.issn.2095-6002.2019.05.004 文章编号:2095-6002(2019)05-0023-09
引用格式:方艾虎,王越溪,杨宗韫,等.负载姜黄素的高浓度乳化物对乳化肠品质的影响[J].食品科学技术学报,2019,37(5):23-31.
FANG Aihu,WANG Yuexi,YANG Zongyun,et al. Study on properties of high concentration emulsion loaded curcumin and its influence on quality of emulsified sausages[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019,37(5):23-31.

负载姜黄素的高浓度乳化物对乳化肠品质的影响

方艾虎, 王越溪, 杨宗韫, 徐幸莲, 王 鹏*
(南京农业大学 食品科技学院/肉品加工与质量控制教育部重点实验室, 江苏 南京 210095)

摘 要:姜黄素具有很强的生理和药理活性,但在水中的低溶解度限制了其生物可接受度以及在食品工业中的应用。为了提高姜黄素的生物可接受度,发挥其抗氧化性能,采用超声方式将其溶解于亚麻籽油中。制备姜黄素-卵清分离蛋白高浓度乳化物,并在乳化肠生产中使用此高浓度乳化物替代背膘脂肪。研究姜黄素不同质量浓度(800、900、1 000、1 100、1 200 mg/L)时高浓度乳化物的抗氧化性、生物可接受度;以姜黄素高浓度乳化物按照不同质量分数(25%、50%、75%、100%)替代乳化肠中的背膘脂肪,测定乳化肠的质构、色差等性质。结果表明:1 200 mg/L姜黄素的抗氧化性能最好,且生物可接受度最好;进行背膘脂肪替代后,总体上看,乳化肠亮度及黄度值增加,蒸煮损失减小,硬度降低,弹性升高。综合考虑各项指标,以姜黄素高浓度乳化物替代75%的背膘脂肪是较为合适的替代率。最终的乳化肠背膘脂肪用量降低25%,在乳化肠油相中存在的姜黄素生物可接受度达到0.112 mg/g。

关键词:姜黄素;卵清分离蛋白;乳液;抗氧化;生物可接受度;脂肪替代物
中图分类号:TS251.1 **文献标志码**:A

姜黄素(curcumin)来自植物姜黄(*Curcuma longa*),是一种疏水性酚类化合物[1],因其烯醇式结构和酚羟基而具有较强的抗氧化活性[2],被我国批准在调理肉制品等中使用。虽然姜黄素的功能性作

收稿日期:2019-08-23
基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0401203);国家自然科学基金资助项目(31571769);国家肉鸡产业技术体系项目(CARS-41)。
第一作者:方艾虎,男,硕士研究生,研究方向为畜产品加工与质量控制;
共同第一作者:王越溪,女,硕士研究生,研究方向为畜产品加工与质量控制。
*通信作者:王 鹏,男,教授,博士,主要从事畜产品加工与质量控制方面的研究。

用非常明确,但由于其不溶于水,因而在以水为主要介质的体系中分散性差,从而限制了姜黄素在食品中的更广泛应用,以及被人体更充分的吸收[3]。为了解决这个问题,有研究者以蛋白质负载姜黄素,这种方法可有效提高姜黄素的溶解度、稳定性和生物可接受度[4]。也有研究者以纳米乳液负载姜黄素,在保持姜黄素生物活性的同时,增加其在人体的吸收率,充分地发挥了姜黄素的抗氧化功能活性[5]。而利用乳化肠中的油相负载姜黄素,尚未见相关研究。本研究使用卵清分离蛋白在油-水界面上形成稳定的物理屏障,构建高浓度乳化物体系,将姜黄素溶解于油相;利用高浓度乳化物的高黏性等物理稳定性,提升姜黄素的分散效果[6],希望能提高姜黄素化学稳定性和生物利用度。

随着人们健康饮食的追求日益增加,低脂、脂肪酸均衡型食品的研究近年来受到越来越多的重视,脂肪替代物作为低脂、无脂食品生产过程中重要的添加剂,正是研究者着力探索的内容之一[7]。以蛋白、水、植物油为原料加工而成的高浓度乳化物的稳定性优良,具有应用于含脂肪食品的潜力[8];而卵清分离蛋白高浓度乳化物对姜黄素的负载能力,以及以姜黄素-卵清分离蛋白高浓度乳化物作为乳化肠中的背膘脂肪替代物尚需深入研究。本研究拟对卵清分离蛋白的姜黄素负载效果,复合体系替代背膘脂肪后乳化肠的持水能力、颜色和质构特性,以及乳化肠内姜黄素的生物可接受度[9]等问题进行探讨。希望为降低产品脂肪含量,改善产品脂肪酸组成[10],增加人体中天然抗氧化剂(姜黄素)的摄入[11],从而为姜黄素-卵清分离蛋白高浓度乳化物在食品加工中的应用提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

卵清分离蛋白粉(水分质量比≤8.0%;蛋白质质量比≥78.0%),吉林金翼蛋品有限公司;亚麻籽油(压榨一级,2.456L),锡林郭勒盟红井源有限责任公司;鸡胸肉,苏果超市;姜黄素,Sigma-Aldrich 公司;胃蛋白酶,Sigma-Aldrich 公司;猪胆盐,国药集团化学试剂有限公司;人工唾液,上海源叶生物科技有限公司;其他试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

PD500-TP 型高性能分散匀浆机,英国 Prima 公司;MX-F 型固定式混匀仪,大龙兴创实验仪器(北京)有限公司;MCR301 型高级旋转流变仪,奥地利 Anton Paar 公司;JA2003 型电子天平,上海天平仪器厂;M2e 型多功能酶标仪,美国 MD 公司;AR64 型高速冷冻离心机,美国 Beckman-Coulter 公司;超越系列 T5 型滴定仪,瑞士 Mettler Toledo 公司;VCX750 型超声波细胞破碎仪,美国 Sonics 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 卵清分离蛋白高浓度乳化物包埋姜黄素样品的制备

将粉状姜黄素(800、900、1 000、1 100、1 200 mg)溶于 1 L 亚麻籽油中,利用超声细胞破碎仪进行冰浴超声促溶(390 W,60 min),高速离心(3 000 r/min,2 min),除去未溶解的姜黄素,得到溶解有姜黄素的油相,放置于棕玻璃瓶中避光备用。称取一定量的卵清分离蛋白粉(质量分数 6%),与去离子水定量混合,通过混匀仪将蛋白粉均匀分散在去离子水中,静置 1 h 使其充分水合溶解,此溶液作为高浓度乳化物的连续相。向连续相中加入质量分数为 75% 的含有姜黄素的亚麻籽油,用振荡器让两相均匀混合;用分散匀浆机以 13 500 r/min 剪切 2.5 min(每 30 s 间隔 10 s)制成高浓度乳化物,所得乳化物样品放入冰桶中迅速降至室温,置于棕玻璃瓶中避光低温保存。

1.3.2 姜黄素在卵清分离蛋白高浓度乳化物中抗氧化性的测定

1.3.2.1 DPPH 自由基清除能力测定

参照文献[12]测定样品 DPPH 自由基清除能力。称取 DPPH 粉末 2 mg,溶解于 10 mL 无水乙醇中,定容至 50 mL,配制成最终浓度为 0.1 mmol/L 的 DPPH 乙醇溶液,在棕色瓶中避光保存,尽快使用。将姜黄素高浓度乳化物样品 1 g 充分溶解于 20 mL 无水乙醇后,以 3 000 r/min 离心 20 min,取上清液备用。使用无水乙醇将 DPPH 溶液稀释 1.75 倍。量取 0.5 mL 上清液样品于 10 mL 试管中,加入 3.5 mL 已稀释后的 DPPH 乙醇溶液,涡旋混合后于暗处放置 30 min,于 517 nm 处测定样品吸光度值。以无水乙醇作为空白对照,并根据公式(1)计算 DPPH 自由基的清除率。

$$\text{DPPH 自由基清除率} = (1 - A/A_0) \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中:A 为上清液样品在 517 nm 处的吸光值;A_0 为空白对照在 517 nm 处的吸光值。

1.3.2.2 总抗氧化能力的检测

用总抗氧化能力检测试剂盒(ABTS 法)进行样

品的总抗氧化能力检测。新鲜配制 ABTS 母液，室温避光保存，在 12 ~ 16 h 后使用。将 ABTS 母液稀释至 734 nm 处的吸光值为 0.7 ±0.5 时待用。96 孔板的每个检测孔中加入 200 μL 稀释后的 ABTS 工作液。空白对照孔中加入 10 μL 磷酸缓冲溶液；样品检测孔内加入 10 μL 样品液，轻轻混匀。室温孵育 2 ~6 min 后利用酶标仪在 734 nm 处测定其吸光度，并根据公式(2)计算 ABTS 清除率。

$$\text{ABTS 清除率} = (1 - A/A_0) \times 100\%。 \quad (2)$$

式(2)中，A 为上清液样品在 734 nm 处的吸光值；A_0 为空白对照在 734 nm 处的吸光值。

1.3.3 *卵清分离蛋白高浓度乳化物包埋姜黄素的生物可接受度的测定*

准确称取姜黄素样品 10 mg 溶于 100 mL 氯仿中，再取 25 mL 0.01 mg/mL 的姜黄素原液与 25 mL 氯仿混合得到 0.005 mg/L 的姜黄素溶液。取 0.005 mg/L 的姜黄素溶液 0、2、4、6、8、10 mL 用氯仿定容至 10 mL，配制成标准姜黄素溶液。在 419 nm 波长下测定标准溶液的吸光值，用得到的吸光度值做出标准姜黄素样品的标准曲线($y = 26.448x + 0.027$，$R^2 = 0.998\ 3$)，式中 y 表示吸光度，x 表示姜黄素质量浓度。

模拟消化采取三阶段方式，主要参考文献[6]、[13]、[14]的方法，稍作改动。

唾液消化阶段：模拟唾液的配置，精密称取 1.594 g NaCl，0.328 g NH_4NO_3，0.636 g KH_2PO_4，0.202 g KCl，0.308 g 柠檬酸钾，0.021 g 尿酸钠，0.198 g 尿素，0.146 g 乳酸钠，5 g 黏蛋白，溶于 1 L 蒸馏水中，用 0.1 mol/L 的盐酸或氢氧化钠将 pH 值调至 7.0，置于 4 ℃环境下避光保存。取 0.23 g 乳液于滴定容器中，加入 6 mL 唾液溶液，在 37 ℃水浴中以 100 r/min 搅拌 30 min，以模拟口腔段的唾液消化。

胃液消化阶段：将 2 g 氯化钠、7 mL HCl 溶于 1 L 蒸馏水中，pH 值约为 1.5，作为储备液，储存于 4 ℃环境中，使用前 30 min 于每 20 mL 储备液中加入 0.064 g 胃蛋白酶，作为模拟胃液。在口腔消化的产物中加入 12 mL 模拟胃液，磁力搅拌 1.5 h，以模拟胃段的胃液消化。

小肠液消化阶段：模拟小肠液由 2 部分构成。称取 5.5 g $CaCl_2$ 和 32.85 g NaCl 溶于 1 L 蒸馏水中作为混合盐溶液，用于调整小肠液的盐浓度。另称取 7.9 g NaCl，0.2 g KCl，0.24 g KH_2PO_4，1.8 g K_2HPO_4 溶于 1 L 蒸馏水中，用稀盐酸调节溶液的 pH 值至 7.4，保存于 4 ℃环境中作为磷酸缓冲液。实验前 30 min，称取 0.060 g 胰脂肪酶和 0.188 g 胆汁盐用 4 mL 磷酸缓冲液分散成悬浊液，作为模拟小肠液储备液。将胃段消化后的产物用 Na_2CO_3 溶液调节 pH 值至 7.0 左右，加入 2 mL 混合盐溶液和 4 mL 模拟小肠液储备液，以 100 r/min 搅拌 2 h，期间使用 pH-stat 滴定仪进行恒 pH 值滴定，终点为 pH 值 7.0，滴定剂为 0.05 mol/L NaOH[15]。

体外消化后，将消化产物离心(12 500 r/min，6 ℃，30 min)。离心后消化产物在底部形成不透明的沉淀相，分离为中间透明的胶束相，有时在顶部分离成油性或奶油相。使用注射器收集 4 mL 中层透明的胶束相，与 4 mL 氯仿涡旋充分混合，然后在室温下离心(1 750 r/min，10 min)，收集离心后的底部氯仿层，同时将顶层部分再与 4 mL 氯仿涡旋混合，在室温下离心(1 750 r/min，10 min)。将第二部分混合物底部氯仿层加入第一次预先留下的氯仿层中，涡旋混合，并用多功能酶标仪在波长 425 nm 处分析。将有纯氯仿的比色皿用作参考组，将吸光度值归零，测定氯仿层中姜黄素的吸光度值。根据氯仿中姜黄素浓度的标准曲线确定从样品中提取的姜黄素浓度。

1.3.4 *乳化肠的制作*

姜黄素-卵清分离蛋白高浓度乳化物的制备同 **1.3.1** 中方法，乳化肠制备参照文献[16]进行。

先将鸡胸肉洗净切丁，用食盐、磷酸盐在 4 ℃冷库中腌制过夜；将腌制后的鸡胸肉肉丁加上糖、白胡椒等配料后斩拌成糊状；在肉糊中加入切成丁的猪背膘或替代的不同比例的高浓度乳化物，继续高速斩拌；将斩拌好的乳化肠灌入肠衣并放入 20 ℃水浴锅中，以 2 ℃/min 的速率升温至 80 ℃，在 80 ℃保温 20 min，取出、待测。实验中，用姜黄素-卵清分离蛋白乳化物作为脂肪代替物，代替不同比例的猪背膘(25%、50%、75%、100%)加工乳化肠：

以未用高浓度乳化物替代猪背膘制备的乳化肠，作为对照组(C)；以 25% 乳化物替代猪背膘制备的乳化肠为(T1)；以 50% 乳化物替代猪背膘制备的乳化肠为(T2)；以 75% 乳化物替代猪背膘制备的乳化肠为(T3)；以 100% 乳化物替代猪背膘制备的乳化肠为(T4)。

1.3.5 *乳化肉糜热扫描流变的测定*

利用高级旋转流变仪测定乳化物的储能模量、损耗模量和相位角(G'、G''、δ)。测试平板的直径为 50 mm，上下平板间距为 1 mm，应力为 1%，频率为 1

Hz,测试温度从 20 ℃升温至 80 ℃,升温速率 2 ℃/min,随后降温至 20 ℃。使用液体石蜡封住平行板外蛋白与空气接触处部分,防止加热过程中水分蒸发。

1.3.6 乳化肠持水能力的测定

乳化肠的持水能力参考李伟锋的方法[17],包括蒸煮损失、保水性。蒸煮损失是在生肉加工成熟过程中,由于蒸煮等原因发生的质量减少的现象,分别称量蒸煮前乳化肠的质量以及蒸煮冷却后拭去肠衣表面水分的乳化肠的质量。重复测定 3 次,取平均值。按照式(3)计算。

$$\text{蒸煮损失} = (\text{蒸煮前肠的质量} - \text{蒸煮后肠的质量})/\text{蒸煮前肠的质量} \times 100\% 。 \quad (3)$$

保水性是样品对抗外界压力保持凝胶内水分的能力[18],以压力作用前后样品的质量比表示。将乳化肠切成合适小块,称量样品质量,将称好的样品放在滤纸上,上面用滤纸覆盖,在滤纸正上方施加 35 kg 质量的物体并保持 5 min,称取压榨后的样品质量。重复测定 3 次,取平均值,按照式(4)计算乳化肠保水性。

$$\text{保水性} = (\text{压后质量}/\text{压前质量}) \times 100\% 。 \quad (4)$$

1.3.7 乳化肠色差的测定

参照文献[19],将低脂乳化肠样品切成合适的长方体,色差仪在室温下经校正后,测定乳化肠的 Lab 色度空间的 3 个参数:L^* 表示亮度,a^* 表示红度,b^* 表示黄度,3 次测定后取平均值。

1.3.8 乳化肠质构特性的测定

参照文献[20],使用质构仪,分析出乳化肠硬度、黏着性、弹性、回复性等指标参数。

1.3.9 乳化肠内包埋姜黄素的生物可接受度的测定

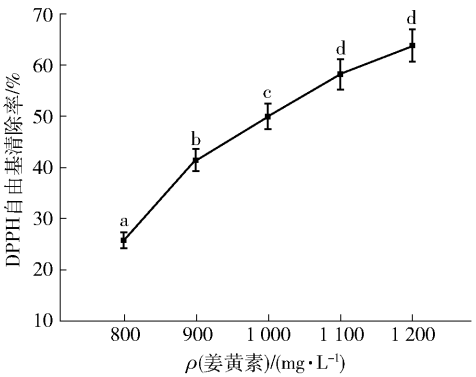
将制备好的乳化肠参照 **1.3.3** 的方法进行消化,测定乳化肠消化后混合胶束中的姜黄素含量。

2 结果与分析

2.1 姜黄素在卵清分离蛋白高浓度乳化物中抗氧化性分析

2.1.1 DPPH 自由基清除能力分析

姜黄素以不同质量浓度溶解于油相后,卵清分离蛋白高浓度乳化物 DPPH 自由基清除能力分析结果见图 1。姜黄素具有较强的 DPPH 清除能力,但其在水中的溶解度极差。实验中用无水乙醇将乳化物中的姜黄素提取出来,比较不同姜黄素添加量的



不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图 1 姜黄素质量浓度对高浓度乳化物 DPPH 自由基清除率的影响

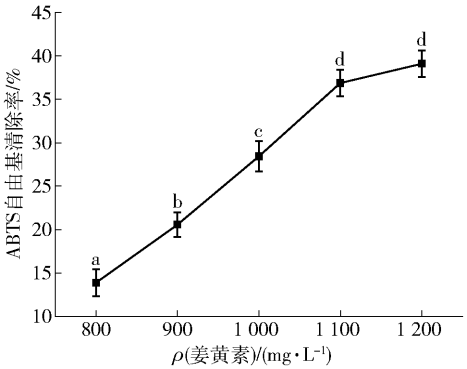
Fig. 1 DPPH free radical scavenging function of high concentration emulsions with different curcumin concentrations

高浓度乳化物的 DPPH 自由基清除能力[21]。

图 1 中,包埋姜黄素的卵清分离蛋白高浓度乳化物的 DPPH 自由基清除率随着姜黄素质量浓度的升高而提高。姜黄素质量浓度从 800 mg/L 增加到 1 200 mg/L,乳化物的 DPPH 自由基清除率由 26.01% 提升为 63.84%,这表示姜黄素质量浓度的增加提高了乳化物的抗氧化活性。随着油相中姜黄素浓度的饱和,高浓度乳化物对 DPPH 自由基的清除率也到达了极限,不会随着姜黄素浓度的提高而显著提升。为了充分发挥姜黄素的抗氧化活性,让其在食物基质中稳定而均匀地分散是必须的[22]。除了本研究的油相溶解方法,也有研究者使用蛋白包埋姜黄素,不但起到均匀分散的效果,还可以保护姜黄素的抗氧化活性[23]。

2.1.2 总抗氧化能力分析

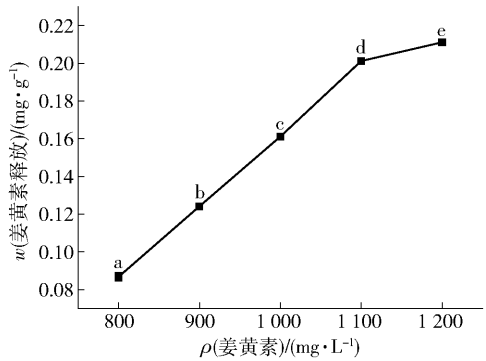
姜黄素以不同质量浓度溶解于油相后,卵清分离蛋白高浓度乳化物总抗氧化能力分析结果见图 2。图 2 显示,随着包埋姜黄素的卵清分离蛋白高浓度乳化物的姜黄素质量浓度从 800 mg/L 升高为 1 200 mg/L,乳化物的总抗氧化能力,即 ABTS 自由基清除率从 13.86% 提升为 39.51%。随着油相中姜黄素添加量在 1 100 mg/L 达到饱和,1 100 mg/L 与 1 200 mg/L 姜黄素添加量的高浓度乳液 ABTS 自由基清除率无显著性差异。这与 DPPH 自由基清除率有着相同的变化趋势,说明随着油相中姜黄素浓度增加量的饱和,ABTS 同样也到达了极限。自由基清除率的显著提升,意味着高浓度乳化物能很好地保护姜黄素的抗氧化活性。



不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图 2　姜黄素质量浓度对高浓度乳化物总抗氧化能力的影响

Fig. 2　Total antioxidant capacity of high concentration emulsions with different curcumin concentrations



不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图 3　姜黄素质量浓度对高浓度乳化物消化产物的影响

Fig. 3　Effect on digestion products of high concentration emulsions with different curcumin concentrations

2.2　卵清分离蛋白高浓度乳化物包埋姜黄素的生物可接受度分析

生物可接受度是评价姜黄素包埋处理效果的决定性因素，图 3 为高浓度乳化物消化产物的姜黄素释放量。由图 3 可以看出，在模拟小肠消化 2 h 后，消化产物混合胶束中的姜黄素含量仍较多，800 mg/L 添加量的乳化物消化产物中，姜黄素质量比可以达到 0.210 mg/g，这也表明了高浓度乳化物可以很好地保护姜黄素，免于生物降解。消化后的小脂滴能够带着姜黄素穿过小肠水化层，使其真正被人体吸收。当姜黄素质量浓度小于 1 100 mg/L 时，随着油相中姜黄素质量浓度的增加，卵清分离蛋白乳化物消化后混合胶束相中的姜黄素含量逐渐增加，趋势十分明显。当乳化物中油相的姜黄素浓度超过1 100 mg/L 时，混合胶束相中的姜黄素含量增加趋势变缓，这同样与油相中姜黄素浓度达到饱和有关。

2.3　乳化肉糜热扫描流变测定结果

使用负载了姜黄素的高浓度乳化物替代猪背膘后，图 4 为肉糜在加热条件下的流变形成变化规律。从图 4 可以看出，随着高浓度乳化物替代物比例的逐渐上升，C、T1、T2、T3 组乳化肉糜的 G' 与 G'' 变化明显，T3 与 T4 组无显著差异。随着替代物比例的升高，乳化肉糜的 G' 与 G'' 均呈现上升趋势。G' 在测定的时间、温度内远远高于 G''，表明乳化肉糜都呈现出弹性为主的凝胶性质。在前 10 min（20 ~ 40 ℃）范围内乳化肉糜 G' 与 G'' 基本保持平稳，tan δ 均呈现上升趋势，且 C 组 tan δ 远高于其他组；后 10 ~ 18 min（40 ~ 56 ℃）随着温度上升，乳化肉糜 G' 与 G'' 均突然下降，乳化肉糜 tan δ 也在此阶段开始减小，各组之间差别减小；在 18 ~ 30 min（56 ~ 80 ℃）时，G' 与 G'' 增长迅速，tan δ 持续下降至最低点；至 30 ~ 36 min（80 ~ 20 ℃）冷却时，乳化肉糜 G' 与 G'' 达到最大值，tan δ 开始上升，各组之间无显著差异。

2.4　乳化肠持水能力分析

包埋了姜黄素的高浓度乳化物对乳化肠蒸煮损失率、保水性和颜色的影响见表 1。本实验中，随着高浓度乳化物替代物比例的逐渐上升，乳化肠的蒸煮损失在 C、T1、T2、T3 之间减小十分明显，蒸煮损失率由 11.415% 降低为 1.459%。此结果的主要原因在于，和油含量相比，高浓度乳化物中的水分含量少[24]，因此乳化肠中的水分含量总体降低。其次，由于连续相中的高蛋白浓度，使得高浓度乳化物在形成凝胶过程中，会形成能保持大量水分的高度有序的三维网络结构或基体，总体减小了乳化肠内部水分的蒸煮损失。在保水性特征中，随着乳化物替代比例的增加，乳化肠保水性总体呈下降趋势，最低为 100% 替代率下的 73.90%；而 T1、T2、T3 三组乳化肠保水性均在 75% 附近。保水性和蒸煮损失率的不同变化趋势可能是因为两种测定的方式不同，蒸煮损失率主要反映在加热过程中肉糜保持水分的能力，而保水性则反映了熟肉糜在外加压力下对水分的保持。对照组的乳化肠会形成一种包含微小结构单元的立体网状结构[21]，从而将水与脂肪微粒包裹在结构单元中，而乳化物的加入会使得这种结构单元减少，对处理组乳化肠的保水性有一定影响。

2.5　乳化肠色差分析

从表 1 中可以看出，随着乳化物替代比例的增

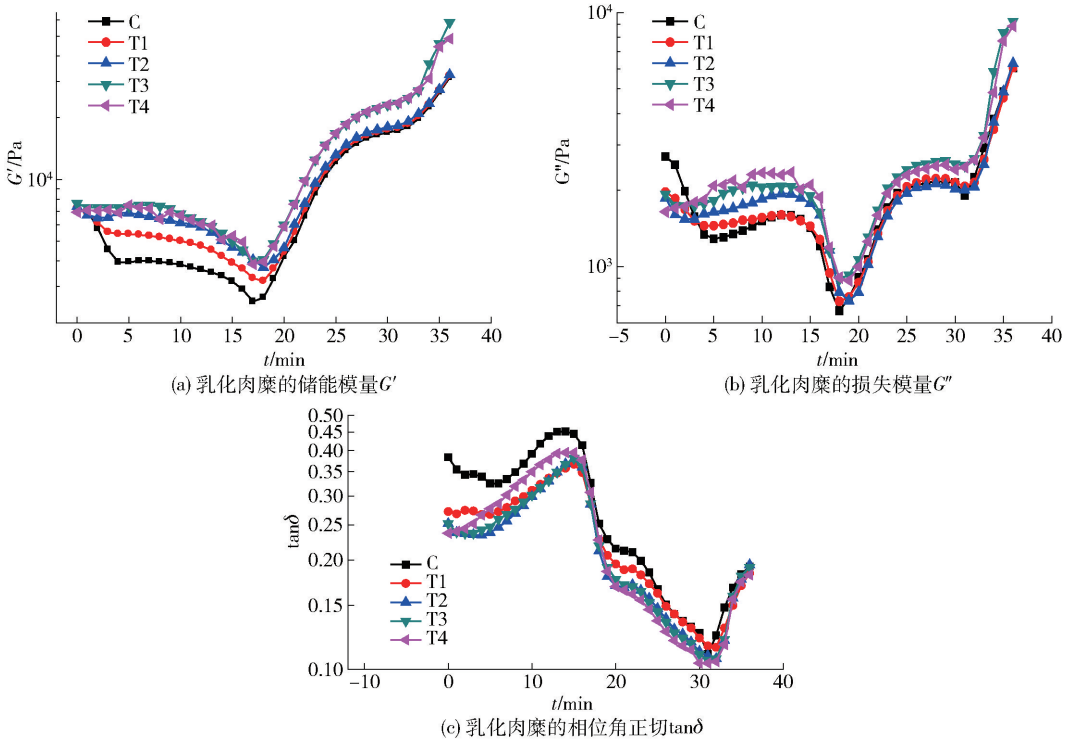


图 4 不同组乳化肉糜热扫描流变结果

Fig. 4 Thermal scanning rheological results of emulsified minced meat in different groups

表 1 不同组乳化肠的蒸煮损失率、保水性与颜色变化情况

Tab. 1 Cooking loss, water retention and color of different groups of emulsified sausages

组别	蒸煮损失率/%	保水性/%	L^*	a^*	b^*
C	11.415 ± 0.190^a	77.84 ± 1.06^a	73.98 ± 0.31^d	1.80 ± 0.16^d	16.15 ± 0.12^d
T1	3.416 ± 0.065^b	76.05 ± 1.12^b	80.19 ± 0.49^c	−3.36 ± 0.19^c	24.71 ± 0.29^c
T2	2.483 ± 0.084^b	75.01 ± 0.56^{bc}	82.00 ± 0.75^b	−6.42 ± 0.16^b	37.18 ± 0.65^b
T3	1.459 ± 0.019^c	74.25 ± 0.62^c	83.18 ± 0.46^a	−8.36 ± 0.62^a	44.43 ± 0.92^a
T4	1.323 ± 0.025^c	73.90 ± 0.97^c	83.51 ± 0.37^a	−9.14 ± 0.12^a	45.60 ± 0.29^a

不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

加,乳化肠的亮度呈现递增的趋势,但当乳化物替代比例为 75% 及更高时,乳化肠 T3 与 T4 组之间并无显著性差异($P>0.05$)。a^* 值表示的是乳化肠表面的红绿范围,从表中可以看出,除了 C 对照组外,其他替代组 a^* 值均为负数,并且随着乳化物替代比例的上升持续减小,但 T3 与 T4 组之间并无显著性差异($P>0.05$)。肉眼观察,乳化肠此时为橙黄色。b^* 值表示乳化肠的蓝黄范围,数值越大表示乳化肠越偏黄[25]。从表中可以看出,乳化物替代组的黄度均远远高于对照组乳化肠,替代组 T1、T2、T3 之间差异明显($P>0.05$)。综合来看,用乳化物替代猪背膘能提高乳化肠的亮度与黄度,但由于姜黄素的着色功能,使得乳化肠红度下降明显,乳化肠呈现橙黄色。

2.6 乳化肠质构特性分析

包埋了姜黄素的高浓度乳化物对乳化肠质构特性的影响结果见表 2。由表 2 可知,姜黄素-卵清分离蛋白高浓度乳化物通过代替不同比例的猪背膘,乳化肠的整体硬度呈现先下降后上升的趋势;T1、T2 与对照组 C 之间均存在显著性差异($P<0.05$),这两组的硬度均随着乳化物比例的升高而降低。当高浓度乳化物替代比例达到 50% 及以上时,乳化肠

表 2　不同组乳化肠的质构特性

Tab. 2　Texture characteristics of different emulsified sausages

组别	硬度/g	黏性/(g·s)	弹性	回复性	咀嚼性/g
C	4 549.40 ± 78.70^{a}	−75.15 ± 2.59^{a}	0.88 ± 0.02^{b}	0.25 ± 0.01^{a}	3 087.22 ± 156.60^{a}
T1	3 674.29 ± 103.71^{b}	−63.50 ± 3.19^{b}	0.89 ± 0.00^{ab}	0.28 ± 0.01^{b}	2 602.83 ± 200.45^{b}
T2	3 834.77 ± 165.93^{b}	−21.26 ± 1.61^{c}	0.89 ± 0.01^{ab}	0.30 ± 0.00^{c}	2 804.18 ± 187.27^{b}
T3	4 056.91 ± 143.67^{bc}	−12.14 ± 1.23^{d}	0.90 ± 0.01^{ab}	0.31 ± 0.01^{d}	3 420.02 ± 203.54^{cd}
T4	4 881.729 ± 97.39^{d}	−7.09 ± 0.82^{e}	0.91 ± 0.01^{a}	0.32 ± 0.01^{e}	3 898.66 ± 109.57^{d}

不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

的硬度上升。黏性为仪器探头在测试样品后离开样品时,克服样品表面与探头表面之间的吸引力所做的功[26]。表 2 显示,随着高浓度乳化物替代比例的升高,乳化肠的黏性呈现出显著降低的状态($P<0.05$),并且在 100% 替代时,其黏性达到 −7.09。弹性为乳化肠样品被探头两次压缩后,除去变性力,恢复样品原来状态的比率;回复性则为样品第一次压缩过程中探头回弹时的弹性势能[27]。表 2 中,随着乳化物替代猪背膘比例升高,乳化肠的弹性与回复性均上升,且均在 100% 替代比例时与对照组相比变化最明显($P<0.05$)。表 2 中可以看出,T1 替代组的乳化肠咀嚼性最低,T1 之后乳化肠咀嚼性随着替代比例的升高而提高。

2.7　乳化肠内包埋姜黄素的生物可接受度分析

高浓度乳液应用于乳化肠后,乳液中负载的姜黄素在产品消化过程中的释放规律,也就是生物可接受度情况见图 5。

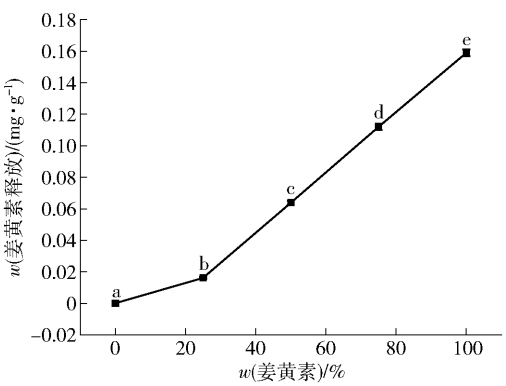


图 5　不同组乳化肠消化产物的姜黄素含量

Fig. 5　Curcumin content in digested products from different groups of emulsified sausages

由图 5 可知,随着乳化肠中高浓度乳化物替代比例的升高,乳化肠消化产物中姜黄素的含量都明显提升。在高浓度乳化物替代比例从 25% 增加到 100% 时,消化产物中姜黄素质量比也从 0.016 mg/g 增加到了 0.159 mg/g。综合考虑乳化肠质构、色泽、保水等指标,高浓度乳化物替代比例为 75% 时的乳化肠最佳,此时的生物可接受度达到了 0.112 mg/g。与姜黄素-卵清分离蛋白高浓度乳化物中姜黄素的生物可接受度对比,其消化产物中姜黄素的生物可接受度有所提升,说明凝胶结构可能增加姜黄素在人体的生物可接受度[28]。

3　结　论

高浓度乳化物能很好地保护姜黄素的抗氧化活性,并使其免于生物降解,提高其生物可接受度,且其抗氧化性能、生物可接受度与油相中姜黄素浓度呈正相关。以姜黄素-卵清分离蛋白高浓度乳化物作为脂肪替代物代替猪背膘制作乳化肠,能够引起乳化肠凝胶强度、颜色及品质变化:乳化肠亮度及黄度值增加,蒸煮损失率减小,保水性降低;与此同时,乳化肠的质构特性也发生明显变化。综合考虑人们的口感与接受能力,高浓度乳化物替代比例为 75% 最为合适。比较乳化肠与单纯高浓度乳化物的生物可接受度发现,乳化肠对于姜黄素的包埋保护效果高于高浓度乳化物。通过在脂肪替代物中添加姜黄素,开拓出了一条姜黄素在食品中应用的新途径,同时也使低脂乳化肠具有了一定的抗氧化性能。不过,由于姜黄素自身颜色的关系,乳化肠被赋予的黄色是否能被消费者接受,还需要基于健康营养角度的消费引导。

参考文献:

[1]　王子天, 周荣雪. 姜黄素生理功能的研究进展[J]. 饮料工业, 2019, 22(1):72 − 74.
WANG Z T, ZHOU R X. Advances in research on physiological functions of curcumin [J]. Beverage Industry, 2019, 22(1):72 − 74.

[2] FENG J Y, LIU Z Q. Phenolic and enolic hydroxyl groups in curcumin: which plays the major role in scavenging radicals[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(22):11041 - 11046.

[3] ANITA U, CAROLINE G, FELIPE O A, et al. Polymeric nanoparticles for increasing oral bioavailability of curcumin[J]. Antioxidants, 2018, 7(4):46 - 64.

[4] DAVIDOVPARDO G. L-enriched emulsion-based delivery systems: influence of pH and temperature on physical and chemical stability[J]. Food Chemistry, 2016, 196: 821 - 827.

[5] SHAH B R. 基于壳聚糖纳米粒子稳定皮克林乳液的制备、表征与姜黄素包埋[D]. 武汉:华中农业大学, 2015.

[6] 郑杰耿. 纳米乳液包埋姜黄素衍生物提高生物可接受度的研究[D]. 广州:华南农业大学, 2016.

[7] WOLFER T L, ACEVEDO N C, PRUSA K J, et al. Replacement of pork fat in frankfurter-type sausages by soybean oil oleogels structured with rice bran wax[J]. Meat Science, 2018, 145:352 - 362.

[8] XU Y T, TANG C H, LIU T X, et al. Ovalbumin as an outstanding pickering nanostabilizer for high internal phase emulsions[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(33):8795 - 8804.

[9] 闵敏,丁海燕,吴香,等. 应用亲水胶体改善低脂香肠品质研究[J]. 肉类工业,2018(1):40 - 44.
MIN M, DING H Y, WU X, et al. Study on improving the quality of low-fat sausage with hydrophilic colloid[J]. Meat Industry, 2018(1):40 - 44.

[10] 李雪, 张玲, 高飞虎,等. 健康乳化肠开发新思路探讨[J]. 南方农业, 2014, 8(19):52 - 54.
LI X, ZHANG L, GAO F H, et al. Exploration of new ideas for the development of healthy emulsified sausages [J]. South China Agriculture, 2014, 8(19):52 - 54.

[11] 万文博. 荷载姜黄素油脂凝胶的制备及性能研究[D]. 广州:华南理工大学,2016.

[12] SARI T P, MANN B, KUMAR R, et al. Preparation and characterization of nanoemulsion encapsulating curcumin[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 43:540 - 546.

[13] 陈责, 贾慧. 体外消化模型的研究进展[J]. 农产品加工, 2017(9):61 - 64.
CHEN Z,JIA H. The advances of digestion simulation *in vitro*[J]. Farm Products Processing,2017(9):61 - 64.

[14] 姚晓琳, 聂珂, 陈玉,等. 复合界面对食品乳液中脂肪消化的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(2):1 - 7.
YAO X L, NIE K, CHEN Y, et al. Effect of complex interface on lipid digestion in food emulsion[J]. Food Science,2018, 39(2):1 - 7.

[15] LI Y, HU M, DU Y, et al. Control of lipase digestibility of emulsified lipids by encapsulation within calcium alginate beads[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(1):122 - 130.

[16] 於慧利,徐宝才,李景军,等. 水油乳化剂替代猪背脂法兰克福香肠的品质及感官研究[J]. 食品与机械, 2012,28(6):74 - 79.
YU H L, XU B C, LI J J, et al. Pork back fat substituted by oil-in-water emulsifier as ingredient influencing quality and sensory of low-fat frankfurters[J]. Food & Machinery,2012,28(6):74 - 79.

[17] 李伟锋. 血浆蛋白-大豆油高浓度乳化体系特性及在乳化肠中的应用研究[D]. 南京:南京农业大学, 2013.

[18] MOORE V J, SEPHTON S W. Effect of anaerobic chilled storage on the pH, water-holding capacity, emulsifying capacity, and drip of lamb packaged fresh or thawed[J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 1989, 32(2):313 - 315.

[19] 师萱,陈娅,符宜谊,等. 色差计在食品品质检测中的应用[J]. 食品工业科技,2009,30(5):373 - 375.
SHI X, CHEN Y, FU Y Y, et al. Application of color difference meter in the quality inspection of food[J]. Science and Technology of Food Industry,2009,30(5): 373 - 375.

[20] 杨慧娟,于小波,胡忠良,等. 低场核磁共振技术研究超高压处理对乳化肠质构和水分分布的影响[J]. 食品工业科技,2014,35(4):96 - 100.
YANG H J, YU X B, HU Z L, et al. Texture properties and water distribution analysis in emulsion type sausages by different high pressure processing supported by low-field NMR technology[J]. Science and Technology of Food Industry,2014,35(4):96 - 100.

[21] DELGADO-PANDO G, COFRADES S, RUIZ-CAPILLAS C, et al. Low-fat frankfurters formulated with a healthier lipid combination as functional ingredient: microstructure, lipid oxidation, nitrite content, microbiological changes and biogenic amine formation[J]. Meat Science, 2011, 89(1):65 - 71.

[22] MUGUERZA E, FISTA G, ANSORENA D, et al. Effect of fat level and partial replacement of pork backfat with olive oil on processing and quality characteristics of fermented sausages[J]. Meat Science, 2002, 61(4): 397 - 404.

[23] HYUN-JIN L, EUN-HEE J, SANG-HWA L, et al. Effect of replacing pork fat with vegetable oils on quality

properties of emulsion-type pork sausages[J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2015, 35(1):130 – 136.

[24] 郑卫东,阴文娅,王光慈,等. 添加物对食品乳状液稳定性的影响[J]. 食品科学,2000(4):26 – 28.
ZHENG W D, YIN W Y, WANG G C, et al. Effects of additives on the stability of food emulsion[J]. Food Science,2000(4):26 – 28.

[25] JACOB G, KARSTEN O, SUSANNE K, et al. Colour formation in fermented sausages by meat-associated staphylococci with different nitrite- and nitrate-reductase activities[J]. Meat Science, 2008, 78(4):492 – 501.

[26] FLETCHER D L. Broiler breast meat color variation, pH, and texture[J]. Poultry Science, 1999, 78(9): 1323 – 2327.

[27] LIN S, HUFF H E, HSIEH F. Texture and chemical characteristics of soy protein meat analog extruded at high moisture[J]. Journal of Food Science, 2010, 65(2):264 – 269.

[28] GUO Q, BELLISSIMO N, ROUSSEAU D. Role of gel structure in controlling *in vitro* intestinal lipid digestion in whey protein emulsion gels[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 69:264 – 272.

Study on Properties of High Concentration Emulsion Loaded Curcumin and Its Influence on Quality of Emulsified Sausages

FANG Aihu, WANG Yuexi, YANG Zongyun, XU Xinglian, WANG Peng*

(*College of Food Science and Technology/Key Laboratory of Meat Processing and Quality Control, Ministry of Education, Nanjing Agricultural University, Nanjing* 210095, *China*)

Abstract: Curcumin has strong physiological and pharmacological activities. However, its bioavailability and application in food industry is limited due to the low solubility in water. In order to improve the bioavailability of curcumin and exert its antioxidant properties, this study first dissolved curcumin in flaxseed oil by ultrasound, then prepared high concentration emulsion of curcumin-egg white protein, and finally used this high concentration emulsion to replace backfat in emulsified sausages. The antioxidant and bioacceptability of high concentration emulsion with different concentrations curcumin (800, 900, 1 000, 1 100, 1 200 mg/L) were measured, and then the backfat in emulsified sausages was replaced by high concentration emulsion loaded curcumin at different mass fractions (25%, 50%, 75%, 100%). The texture and color difference of emulsified sausages were determined. The results showed that curcumin had the best antioxidant activity and bioacceptability at the concentration of 1 200 mg/L. After replacing backfat, the brightness and yellowness of emulsified sausages were increased, along with decreasing cooking loss, reducing hardness and increasing elasticity. Considering all the indexes, replacing 75% backfat with high concentration emulsion loaded curcumin was acceptable. The final amount of backfat in emulsified sausages was reduced 25%, and the bioavailability of curcumin in oil phase of emulsified sausages was up to 0.112 mg/g.

Keywords: curcumin; egg-white protein; emulsion; antioxidant; bioavailability; fat substitutes

(责任编辑:叶红波)