

## 生姜精油微胶囊制备及其对冷鲜猪肉品质的影响

郭家刚<sup>1,2</sup>, 杨松<sup>1,2</sup>, 伍玉菡<sup>1,2</sup>, 朱倩<sup>1,2</sup>, 杜京京<sup>1,2</sup>, 江舰<sup>1,2\*</sup>

(<sup>1</sup>安徽省农业科学院农产品加工研究所 合肥 230031

<sup>2</sup>安徽省食品微生物发酵与功能应用工程实验室 合肥 230031)

**摘要** 为研究生姜精油对冷鲜猪肉品质的影响,以生姜精油、水解大豆蛋白和阿拉伯胶为复合材料,采用复凝聚技术制备生姜精油微胶囊,通过粒径分析、扫描电子显微镜、傅里叶变换红外光谱和热重分析表征生姜精油微胶囊性能,分析生姜精油微胶囊的抗氧化能力,并评估生姜精油微胶囊对猪肉品质的影响。结果表明:复凝聚反应最佳条件为水解大豆蛋白与阿拉伯胶质量比为 5:1,反应 pH 值为 3.9,此工艺条件下制备的生姜精油微胶囊包埋率为 76.51%,平均粒径为 51.38  $\mu\text{m}$ 。冻干后的生姜精油微胶囊呈现不规则片状结构,保持了较高的热稳定性和抗氧化性能。将生姜精油微胶囊应用于肉品保鲜,与对照组相比,生姜精油微胶囊有效抑制了冷鲜肉的 pH 值、挥发性盐基氮(TVB-N)和菌落总数(TBC)的增加,较好地保持了冷鲜猪肉的品质,延长了猪肉货架期。研究结果为生姜精油保鲜剂的开发与应用提供参考。

**关键词** 生姜精油;微胶囊;抗菌;猪肉保鲜

**文章编号** 1009-7848(2025)02-0342-11 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2025.02.030

冷鲜肉因滋味鲜美、肉嫩多汁,富含蛋白质、脂肪和微量元素等多种营养成分,深受广大消费者的喜爱<sup>[1-2]</sup>。然而,冷鲜肉极易因微生物的浸染以及自身氧化作用而发生腐败变质<sup>[3-5]</sup>。目前,低温冷藏虽然是冷鲜肉最常用的保鲜方式之一,但只能在一定程度上抑制微生物的生长,一些嗜冷微生物的繁殖仍会导致肉品的腐败变质<sup>[6]</sup>。为延长冷鲜肉的货架期,抑制肉品脂质氧化和腐败菌的生长,近年来,绿色天然保鲜剂的开发越来越受到关注<sup>[7-8]</sup>。生姜精油是从生姜中萃取的一种具有活性的次生代谢产物,为透明、浅黄色油状液体<sup>[9]</sup>,研究表明其具有良好的抗氧化及抗菌功能,可应用于果蔬、冷鲜肉和冷冻海鲜等产品保鲜<sup>[10-11]</sup>。然而,生姜精油存在易挥发、水溶性差、化学性质不稳定等问题,限制了其在食品保鲜等领域的应用<sup>[12]</sup>。

微胶囊是一种微封装技术,可将目标物包裹成微型颗粒,具有保护不稳定成分、可控释放等特点,已广泛应用于食品、医药等行业<sup>[13-15]</sup>。复凝聚法是精油微胶囊制备最常用的方法<sup>[16]</sup>。复凝聚技术是由两个带相反电荷的胶体相互作用引起的聚合,具有操作条件温和、可控释放和耐热性能优异

等特点,是改善精油缺陷的理想选择<sup>[17-18]</sup>。近年来,蛋白-多糖复合物在食品工业中的应用前景广阔,利用复凝聚技术对活性成分进行处理以提高其稳定性的研究取得一定成效,其中明胶与阿拉伯胶是复凝聚最典型的组合材料<sup>[19]</sup>。阿拉伯胶因结构带有部分蛋白和多糖而具有良好的乳化特性及优越的成膜性能,被用于制备精油等香味物质微胶囊<sup>[20]</sup>。明胶黏性大,反应温度高,同时因朊病毒等动物源蛋白安全问题而使其应用范围不断缩小<sup>[21]</sup>。大豆蛋白因来源广、成本低和功能特性优良而被认为是动物蛋白的良好替代品,虽已被应用于活性成分的微囊化研究,但存在溶解性和乳化性不佳等问题,导致其应用受限<sup>[22]</sup>。研究发现,通过水解等手段对大豆蛋白进行改性处理,可以提高其乳化性能<sup>[23-25]</sup>。目前,有关大豆蛋白改性的研究较多,而利用水解大豆蛋白与阿拉伯胶制备生姜精油微胶囊并应用于肉品保鲜尚未见研究报告。

本研究以生姜精油为芯材,以水解大豆蛋白、阿拉伯胶为复合壁材,采用复凝聚技术制备生姜精油微胶囊,对其形态、结构、热稳定性和抗氧化性能进行表征,并分析生姜精油微胶囊对冷鲜猪肉品质的影响,以期为植物精油在肉品保鲜中的应用和绿色生物保鲜剂的开发提供依据。

收稿日期: 2024-02-23

基金项目: 安徽省重点研发计划项目(202004a06020011)

第一作者: 郭家刚,男,硕士,助理研究员

通信作者: 江舰 E-mail: ahkyejj@163.com

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

生姜精油、水解大豆蛋白均为实验室自制;生鲜猪肉,合肥市永辉超市;阿拉伯胶、醋酸,中国医药集团上海化学试剂有限公司;试验用水均为超纯水;其它试剂均为分析纯级。

### 1.2 仪器与设备

ME204 电子显示天平,梅特勒-托利多(上海)仪器有限公司;PHS-3C pH计,上海仪电科学仪器股份有限公司;UV-26001 紫外-可见分光光度计,岛津仪器(苏州)有限公司;MS-2000 激光粒度仪,英国 Malvern 仪器公司;GeminiSEM500 扫描电子显微镜,德国 ZEISS 公司;Nicolet8700 傅里叶红外光谱仪,美国 Thermo Fisher 公司;TGA Q5000 热重分析仪,美国 TA 仪器公司;真空冷冻干燥机,北京松源华兴科技发展有限公司;Y-25 高剪切乳化分散机,上海约迪机械设备有限公司;HJ-4B 四联加热磁力搅拌器,上海达姆实业有限公司。

### 1.3 方法

**1.3.1 复凝聚反应条件的确定** 复凝聚反应 pH 值和 HSP-GA 质量比是影响复合凝聚反应的关键因素,因此,需要首先确定复凝聚反应的最佳 pH 值和 HSP-GA 质量比。配制不同质量比的 HSP-GA(1:1,3:1,5:1,7:1)溶液,壁材溶液的质量分数均为 0.1%。将混合液在磁力搅拌器上持续搅拌,反应温度 45 ℃,用质量分数 5%的醋酸溶液缓慢调节壁材溶液的 pH 值,取不同 pH 值下的聚合物溶液于波长 600 nm 处进行浊度测定,绘制浊度随 pH 值变化的曲线。配制不同混合质量比的 HSP-GA(1:1,3:1,5:1,7:1)溶液,壁材溶液的质量分数均为 1%,将混合液在磁力搅拌器上持续搅拌,反应温度 45 ℃,用质量分数 5%的醋酸溶液缓慢调节壁材溶液的 pH 值调节至浊度最高。5 000 r/min 离心 8 min,弃去上清,将收集的复凝聚物在 105 ℃条件下烘干至恒重。凝聚物产率的计算公式如下:

$$\text{凝聚物产率}(\%) = m_1/m_0 \times 100 \quad (1)$$

式中: $m_0$  为壁材总的质量,g; $m_1$  为复凝聚物的质量,g。

**1.3.2 复凝聚物及生姜精油微胶囊的制备** 称取

一定量的水解大豆蛋白和阿拉伯胶粉末,加入超纯水分别配制成不同质量分数的 HSP-GA 溶液,在 45 ℃水浴条件下搅拌至壁材充分溶解,搅拌速率为 400 r/min,并除去不溶性杂质。在 600 r/min 搅拌速率下,用质量分数 5%的醋酸溶液缓慢调节溶液 pH 值为 3.9,复凝聚反应 30 min。冰水浴降温至 5 ℃左右,保持 30 min。静置分层,弃去上清液,将复凝聚物平铺在培养基表面,经冷冻干燥后制得水解大豆蛋白和阿拉伯胶凝聚物(HSP-GA)。

在混合溶液中加入适量的生姜精油,在 11 000 r/min 转速下均质分散 5 min,后续制备过程同上,即得生姜精油微胶囊(GEO-MPs),冷冻干燥后得到固态生姜精油微胶囊。

### 1.3.3 生姜精油微胶囊的性能及表征

**1.3.3.1 包埋率的测定** 以甲醇为溶剂,配制质量浓度 5,10,15,20,25,30 μg/mL 生姜精油-甲醇溶液,以甲醇为对照,在生姜精油最大吸收波长 207 nm 处测定各质量浓度生姜精油溶液吸光度值,绘制标准曲线,得到生姜精油线性回归方程。

生姜精油微胶囊表面油含量测定:称取 0.1 g 生姜精油微胶囊,用 20 mL 甲醇提取 1 min,5 000 r/min 离心 10 min,取上清液测定其吸光度,由线性回归方程计算微胶囊表面生姜精油的含量。

生姜精油微胶囊总油含量测定:称 0.1 g 生姜精油微胶囊,加入 20 mL 甲醇,于超声设备中超声浸提 35 min,5 000 r/min 离心 10 min,取上清液测定其吸光度,由线性方程计算微胶囊中总生姜精油含量。生姜精油微胶囊包埋率计算公式如下:

$$\text{包埋率}(\%) = (\text{总生姜精油含量} - \text{表面生姜精油含量}) / \text{总生姜精油含量} \times 100 \quad (2)$$

**1.3.3.2 粒径测定** 以超纯水作为分散剂,使用激光粒度仪分析微胶囊的粒径。设备参数设定为:样品颗粒折射率 1.45,分散剂折射率 1.33,样品颗粒吸收指数 0,分析模型为通用型(球形)。

**1.3.3.3 形态表征** 采用光学显微镜对湿基微胶囊形态进行观察,并以 400 倍的放大倍数采集湿基微胶囊的图像。将一定量固态微胶囊粉末固定在导电胶上,吹去多余粉末后进行喷金处理。加速电压为 20 kV,电流 50 mA,采用扫描电子显微镜观察固态微胶囊表面结构。

**1.3.3.4 傅里叶变换红外光谱分析** 取适量试样

与溴化钾(KBr)于研钵中研磨混匀,压片机制片,以KBr薄片作为对照,采用傅里叶红外光谱仪对薄片和生姜精油等试样进行测试。扫描范围4 000~500  $\text{cm}^{-1}$ ,分辨率为4  $\text{cm}^{-1}$ 。

1.3.3.5 热重分析 称取适量试样于坩埚中,采用TGA Q5000热重分析仪对微胶囊的热力学特性进行分析,测试温度30~500  $^{\circ}\text{C}$ ,升温速率5  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,氮气流速20  $\text{mL}/\text{min}$ 。

1.3.4 生姜精油微胶囊的抗氧化能力 分别称取50 mg和100 mg的测试样品(HSP-GA、GEO-MPs)溶于10 mL DPPH-乙醇溶液(0.05  $\text{mmol}/\text{L}$ )中,在室温避光条件下反应30 min,反应液经4 000  $\text{r}/\text{min}$ 离心20 min,取上清液于波长517 nm波长处测定吸光值 $A_1$ ,并测定空白DPPH吸光值 $A_0$ 。DPPH自由基清除率计算方法见式(3)。

$$\text{DPPH 自由基清除率}(\%) = (A_0 - A_1) / A_0 \times 100 \quad (3)$$

式中: $A_0$ 为空白DPPH的吸光度值; $A_1$ 为测试样品的吸光度值。

1.3.5 生姜精油微胶囊在冷鲜肉中的应用

1.3.5.1 样品预处理 在无菌操作条件下,将新鲜的猪里脊肉分切成每块100 g,分别设置空白对照组(CK)、空白微胶囊处理组(HSP-GA)和生姜精油微胶囊处理组(GEO-MPs)3个试验组。GEO-MPs组是将里脊肉浸泡于1%的生姜精油微胶囊溶液,HSP-GA组是将里脊肉浸泡于空白微胶囊溶液,CK组直接浸泡于无菌水中,浸泡时间为10 min,沥水,将每组18块猪里脊肉分装于保鲜盒中,随机分为6个平行小组,每个平行3块猪里脊肉,置于4  $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中保藏。每隔2 d分别进行冷藏猪里脊肉的pH值、挥发性盐基氮(TVB-N)值和菌落总数(TBC)值及感官评分等指标测定。

1.3.5.2 pH值的测定 参照《食品安全国家标准食品pH值的测定》(GB 5009.237-2016)中的方法,称取5 g样品,加入适量的氯化钾溶液(0.1  $\text{mol}/\text{L}$ ),用绞肉机绞碎肉样,进行pH值测定。

1.3.5.3 挥发性盐基氮的测定 参照《食品安全国家标准食品中挥发性盐基氮的测定》(GB 5009.228-2016)中自动凯氏定氮法,准确称取10 g肉样,用组织粉碎机绞碎肉样,转移至消化管中,加入适量纯水,振荡提取30 min,进行TVB-N值

测定。

1.3.5.4 菌落总数的测定 参照《食品安全国家标准食品微生物学检验菌落总数测定》(GB 4789.2-2022)中的方法测定菌落总数。

1.3.5.5 感官评价 参照《肉与肉制品感官评定规范》(GB/T 22210-2008)中的方法,由6名食品专业人员组成感官评价小组,对测试肉样色泽、气味、组织状态和黏度等指标进行评分,评价标准见表1。

表1 冷鲜肉感官评分标准

Table 1 Sensory evaluation criteria of cold meat

指标	评分标准	分值
色泽(25%)	肉质浅粉色,光泽感明显	4~5
	肉质偏红或泛白,略有光泽	2~3
	肉质呈现暗色,无光泽	0~1
气味(25%)	猪肉特有的鲜味,无异味	4~5
	肉香味不足,略有腥味	2~3
	无肉香味,腥味过重	0~1
组织状态(25%)	弹性很好,指压后立即恢复	4~5
	弹性一般,指压后能缓慢恢复	2~3
	无弹性,指压后凹陷明显	0~1
黏度(25%)	外表微湿,不黏手	4~5
	表面发干、较黏手	2~3
	外表有黏液、很黏手	0~1

## 1.4 数据统计分析

试验数据均为3次重复试验的平均值,使用SPSS 21.0数据分析软件对数据进行处理,组间比较采用单因素方差分析(one-way ANOVA), $P < 0.05$ 为有显著性差异。采用GraphPad Prism 7.00和OriginPro 9.0软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 复凝聚反应条件

水解大豆蛋白质与阿拉伯胶(HSP-GA)复凝聚反应是典型的静电相互作用过程,在此过程中,pH值在调节静电相互作用的强度和HSP-GA凝聚反应程度方面起着至关重要的作用。HSP-GA体系随着溶液pH值的改变会经历胶体形态的改变,直观的表现体系浊度的变化。通过测定反应液的浊度,可知不同pH值条件下HSP-GA体系的静电作用程度。由图1可知,不同HSP-GA比例

对于体系的 pH 值-浊度曲线产生了较大的影响,随着体系 pH 值不断的降低,4 种 HSP-GA 比例体系的浊度均呈现先上升后下降的趋势,峰值处即发生了水溶液体系内静电中和。这是由于降低溶液 pH 值,水解大豆蛋白所带正电荷不断增多,而 GA 因其离子化受到抑制,所带负电荷逐渐减少,两者越来越趋向完全中和,达到电荷完全中和的临界点后,水解大豆蛋白的正电荷继续累积超过了阿拉伯胶所带的负电荷,两者出现静电排斥而逐渐分开<sup>[26]</sup>。由图 1 可知,水解大豆蛋白与阿拉伯胶质量比为 1:1,3:1,5:1,7:1 时,最佳 pH 值依次为 3.5,3.7,3.9,4.1。

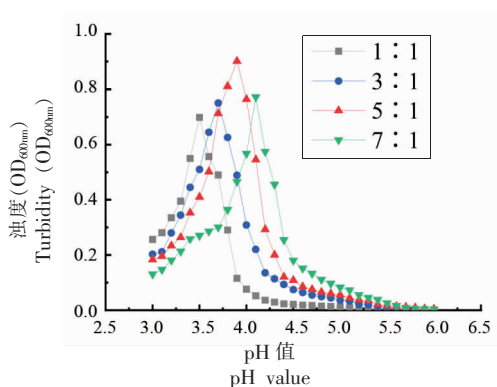


图 1 不同 HSP-GA 质量比下体系浊度随 pH 值的变化  
Fig.1 Turbidity change with pH value under different HSP-GA mass ratio

## 2.2 生姜精油微胶囊基本理化特性

通过工艺优化,在 HSP-GA 质量比为 5:1,pH 值为 3.9 条件下制备了生姜精油微胶囊,其包埋率为 76.51%。采用光学显微镜对生姜精油微胶囊形态进行了观察,如图 3a 所示,在光学显微图像中,生姜精油微胶囊呈现圆球型结构,形态比较均匀,边界清晰,囊壁厚度适中,没有互相黏结的现象,能够长时间保持稳定。微胶囊粒径及其分布是衡量微胶囊质量的重要指标<sup>[28]</sup>,粒径分布结果如图 3b 所示,生姜精油微胶囊的粒径呈现单峰正态分布,且峰形较为狭窄,粒径大小分布主要集中在 10~100  $\mu\text{m}$ ,平均粒径( $D_{[4.3]}$ )为 51.38  $\mu\text{m}$ ,说明在该工艺条件下获得的生姜精油微胶囊粒径大小相对均匀,分散性良好。

## 2.3 生姜精油微胶囊的微观结构

采用扫描电镜(SEM)对冷冻干燥处理的生

HSP-GA 混合比例是影响其复凝聚反应的第 2 个重要参数,为进一步确定 HSP-GA 最佳的质量比,HSP-GA 体系凝聚物的产率是非常重要的指标<sup>[27]</sup>。因此,可根据体系复凝聚反应的产率进一步确定 HSP-GA 的最佳质量比。由图 2 可知,凝聚物产率与 HSP-GA 质量比显著相关。随着 HSP-GA 从 1:1 增加到 7:1,凝聚物产率呈现先增加后降低趋势,凝聚产率在 56.03%~76.87%,当水解大豆蛋白与阿拉伯胶质量比为 5:1 时,可以获得最高的凝聚物产率 76.87%(pH=3.9)。因此,HSP-GA 复凝聚反应的最佳条件为 pH 值为 3.9,质量比为 5:1。

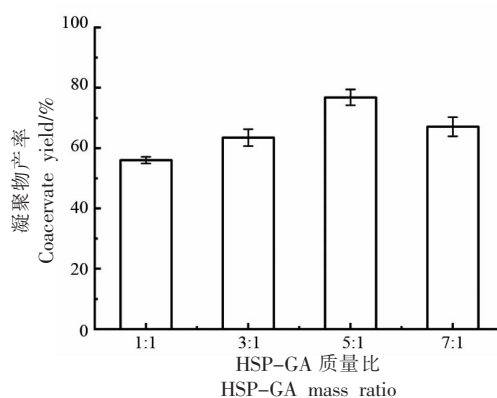


图 2 不同 HSP-GA 质量比下体系的凝聚物产率  
Fig.2 The coacervate yield of the system with different HSP-GA mass ratio

姜精油微胶囊的微观结构进行了观察,图 4a 和 4b 是生姜精油微胶囊在不同放大倍数下的微观结构形态图,从图中可以看出,生姜精油微胶囊呈不规则的片状或块状,结构紧实,生姜精油微胶囊表面有凸起和微小的空洞,且呈现片状聚集,这可能是由于生姜精油乳液在预冷冻过程中,HSP-GA 体系中的自由水凝结形成小冰晶,破坏了均匀的乳化体系,且冰晶在真空冷冻干燥过程中,升华后留下了孔道,因此,真空冷冻干燥后的生姜精油微胶囊呈现疏松多孔、不规则的块状结构,该结果与 Chen 等<sup>[29]</sup>制备的微胶囊形貌特征基本一致。

## 2.4 生姜精油微胶囊的红外光谱(FTIR)分析

红外光谱图如图 5 所示,生姜精油主要主要成分是萜烯类物质,富含 C=C、-CH<sub>3</sub> 等基团<sup>[9]</sup>,其在 3 463  $\text{cm}^{-1}$  处为典型的 O-H 伸缩振动,2 964  $\text{cm}^{-1}$  处为 C-H 伸缩振动,1 679  $\text{cm}^{-1}$  处为 C=C 伸

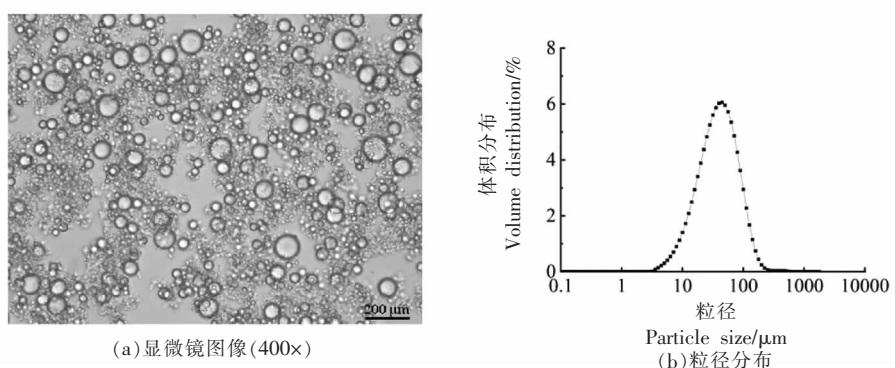


图3 生姜精油微胶囊显微镜图像及粒径分布

Fig.3 Microscopic image and particle size distribution of ginger essential oil microcapsules

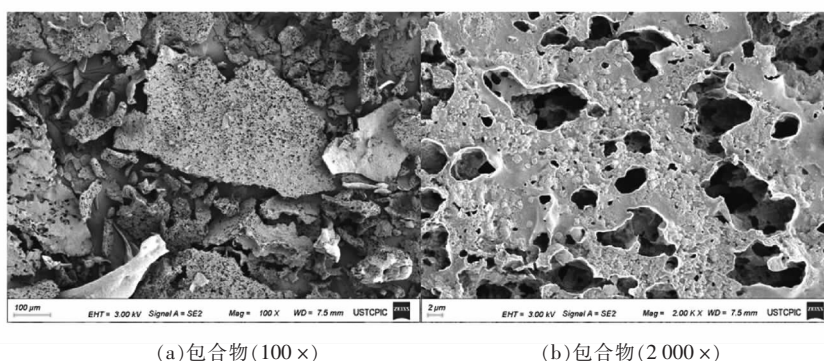


图4 生姜精油微胶囊不同放大倍数下的扫描电镜

Fig.4 SEM images of ginger essential oil microcapsules at different magnifications

缩振动,在 $1451\text{cm}^{-1}$ 附近吸收峰与 $-\text{CH}_3$ 和 $-\text{CH}_2$ 基团的C-H的面内弯曲振动有关,在 $887\text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰与 $-\text{CH}_3$ 基团的C-H的面外弯曲振动有关。GA的特征吸收峰是烷基C-H伸缩振动峰( $2928\text{cm}^{-1}$ )、羧基不对称伸缩振动峰( $1609\text{cm}^{-1}$ )以及羧基对称伸缩振动峰( $1424\text{cm}^{-1}$ )。HSP在 $3416\text{cm}^{-1}$ 处显示O-H和N-H的典型的伸缩振动峰, $1652\text{cm}^{-1}$ 为C=O拉伸振动和酰胺I带, $1542\text{cm}^{-1}$ 为酰胺II带, $1401\text{cm}^{-1}$ 为N-H弯曲和C-N拉伸振动。综上所述,比较生姜精油微胶囊红外光谱主要特征峰与生姜精油、阿拉伯胶和水解大豆蛋白的特征峰有相似之处,说明生姜精油微胶囊中保留了这些成分。在复凝聚过程中,阿拉伯胶中的羧基与水解大豆蛋白中的氨基形成含有酰胺基团的复合物,生姜精油微胶囊在 $3000\sim 3700\text{cm}^{-1}$ 范围呈现的宽频带是由 $\text{NH}_2$ 和OH基团伸缩振动引起的,同时,生姜精油的特征峰 $2964$ , $1679\text{cm}^{-1}$ 和 $887\text{cm}^{-1}$ 等在微胶囊的红外光谱图

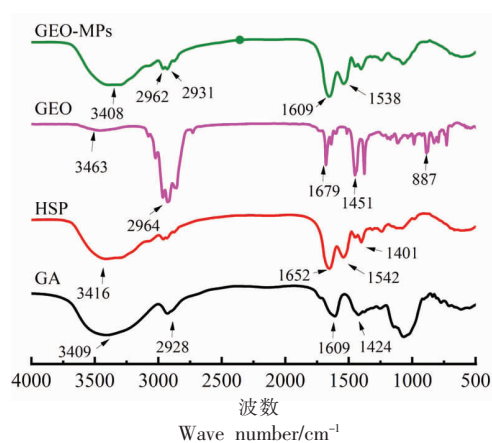


图5 生姜精油微胶囊的 FTIR 图

Fig.5 FTIR spectrum of ginger essential oil microcapsules

中变弱甚至消失,说明生姜精油与水解大豆蛋白和阿拉伯胶之间存在很强的物理交联<sup>[30]</sup>,生姜精油分子被成功包裹在了水解大豆蛋白和阿拉伯胶复合凝聚物空腔内。

## 2.5 生姜精油微胶囊的热稳定性分析

热重分析(TGA)是衡量微胶囊产品耐热性能的重要方法,为评估微胶囊的热稳定性,对生姜精油微胶囊进行了热重分析。如图 6 所示,从 100 ℃到 200 ℃,生姜精油进入了快速分解阶段,生姜精油在该阶段的质量损失率为 96.49%,几乎全部损失。空白微胶囊和生姜精油微胶囊的热分解经历了 3 个过程:首先从室温到 125 ℃,两者的质量损失程度都较小,分别为 7.85%,7.99%,主要是由于微胶囊中的水分蒸发所致。其次为 125 ℃到 400 ℃,空白微胶囊的质量损失率为 44.38%,生姜精油微胶囊的质量损失率为 52.70%,表明微胶囊的热分解主要发生在该阶段,由于壁材交联键的断裂导致生姜精油泄漏并快速释放,造成了较大的质量损失,且生姜精油微胶囊的质量损失程度大于空白微胶囊的质量损失程度,可见壁材对生姜精油起到了较好的保护作用。最后为 400 ℃到 500 ℃,该阶段的微胶囊仍有部分热降解,两者的质量损失分别为 7.67%,7.09%,生姜精油已基本完全释放,主要是残余碳的降解<sup>[31]</sup>。结果表明,生

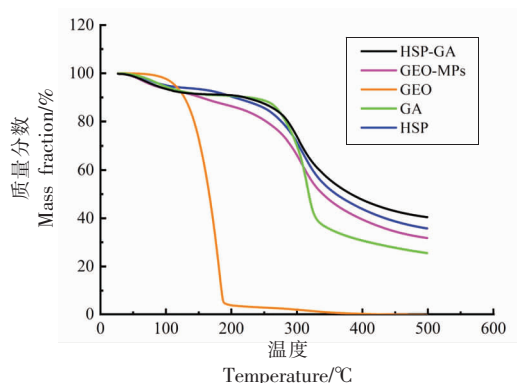


图 6 生姜精油及复凝聚微胶囊 TGA 分析

Fig.6 The TGA analysis of ginger essential oil and complex coacervation microcapsules

## 2.7 生姜精油微胶囊对猪肉保鲜效果的影响

2.7.1 生姜精油微胶囊对猪肉 pH 值的影响 肉类产品的 pH 值是判断肉和肉制品微生物腐败的重要指标之一,pH 值的变化可以反映其腐败程度,根据《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》(GB 5009.237-2016)评价标准,pH 值在 5.7~6.2 范围为一级鲜肉,pH 值在 6.2~6.7 范围为次级鲜肉,pH 值大于 6.7,即为腐败肉。由图 8 可知,随着

姜精油微胶囊在 300 ℃的高温条件下才能大量降解,结果表明,生姜精油通过微胶囊化具有较高的热稳定性。

## 2.6 生姜精油微胶囊 DPPH 自由基清除能力分析

生姜精油微胶囊 DPPH 自由基清除能力如图 7 所示,在质量浓度 5~10 mg/mL 范围内,随着质量浓度的升高,HSP-GA 复合物和生姜精油微胶囊对 DPPH 自由基清除率逐渐升高,即 HSP-GA 复合物和生姜精油微胶囊均呈现质量浓度依赖性。在同一质量浓度下,生姜精油微胶囊对 DPPH 自由基清除率要高于 HSP-GA 复合物,这是由于微胶囊中有生姜精油的存在,生姜精油中的姜烯和姜醇等活性物质具有较强的抗氧化能力<sup>[32]</sup>。当 GEO-MPs 质量浓度为 10 mg/mL 时,其 DPPH 自由基清除率高达 52.65%。上述结果分析表明,生姜精油微胶囊具有清除活性自由基的能力,表现出较高的抗氧化功效。因此生姜精油微胶囊作为一种天然抗氧化剂,能够有效抑制肉品中脂肪、蛋白质的氧化腐败,在一定程度上改善肉品品质。

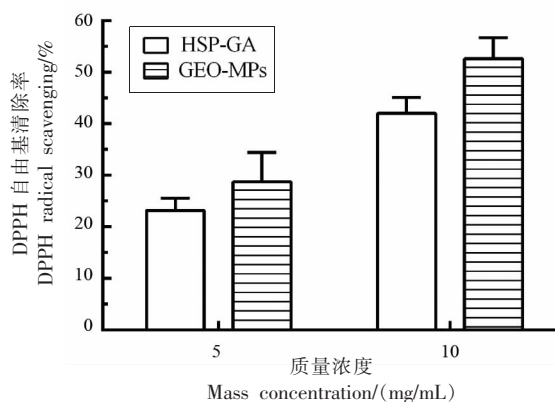


图 7 不同质量浓度生姜精油微胶囊的抗氧化能力

Fig.7 Antioxidant capacity of thymol microcapsules with different mass concentrations

贮藏时间的增加,各处理组肉样品的 pH 值均呈现缓慢升高趋势,是由于肉品中蛋白质在腐败菌及酶的作用下发生了一系列反应,生成了氨类等碱性化合物,导致肉品 pH 值逐渐升高<sup>[33]</sup>。其中,对照组的 pH 值在第 6 天达到 6.71,空白微胶囊处理组 pH 值在第 8 天达到 6.75,而生姜精油微胶囊组 pH 值在第 10 天仍然低于 6.7,结果表明生姜精油微胶囊处理组的保鲜效果明显优于其它处理组,

说明生姜精油的添加,抑制了微生物的生长繁殖,降低了蛋白质的分解,从而延缓了猪肉 pH 值的升高。

2.7.2 生姜精油微胶囊对猪肉 TVB-N 值的影响  
猪肉在贮藏过程中,由于微生物和蛋白酶的作用会产生胺、氮等碱性物质,这些物质的含量对猪肉的新鲜度有很大影响<sup>[34]</sup>。TVB-N 值是重要的肉品鲜度评价指标,根据《食品安全国家标准 鲜(冻)畜、禽产品》(GB 2707-2016)评价标准,肉品中 TVB-N 值大于 15 mg/100 g,即视为腐败肉。如图 9 所示,不同处理组样品的 TVB-N 值随着储藏时间

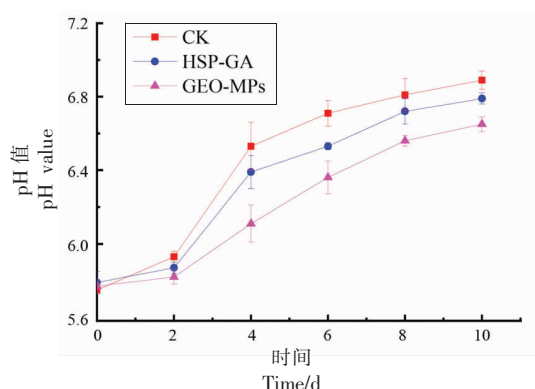


图 8 生姜精油微胶囊对猪肉 pH 值的影响

Fig.8 Effects of ginger essential oil microcapsules on pH value of pork

2.7.3 生姜精油微胶囊对猪肉菌落总数的影响  
菌落总数是评判食品被微生物污染程度以及卫生质量的重要依据,微生物是导致鲜肉变质的主要因素<sup>[35]</sup>。根据《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》(GB 4789.2-2016)标准规定,菌落总数超过 6 lg(CFU/g),即为腐败肉。不同处理组在贮藏期的菌落总数如图 10 所示,各处理组肉样的菌落总数随着贮藏时间的增加均呈现增加趋势,且生姜精油处理组菌落总数的增长速度要低于其它处理组。对照组菌落总数在第 6 天已超过 6 lg(CFU/g),空白微胶囊处理组菌落总数在第 10 天超过 6 lg(CFU/g)。生姜精油微胶囊处理组菌落总数在第 10 天达 5.7 lg(CFU/g),低于 6 lg(CFU/g)。由此可知,生姜精油微胶囊处理组的保鲜效果要明显优于其它处理组,说明生姜精油微胶囊能够有效抑制微生物的生长繁殖,延长猪

肉贮藏期。空白微胶囊处理组和生姜精油微胶囊处理组 TVB-N 值始终低于对照组,且生姜精油微胶囊处理组 TVB-N 值增长最为缓慢。对照组 TVB-N 值在第 10 天达 15.18 mg/100 g,表明已经腐败变质,而空白微胶囊处理组和生姜精油微胶囊处理组 TVB-N 值在第 10 天均未超过国家规定的鲜肉标准。同时,生姜精油处理组 TVB-N 值要显著低于空白微胶囊处理组。结果表明生姜精油微胶囊能够有效抑制贮藏期间猪肉 TVB-N 值的升高,延长贮藏期。

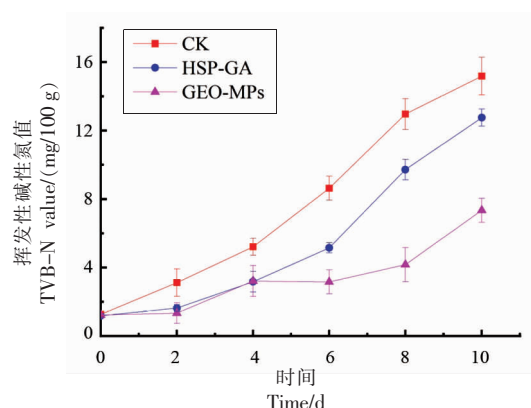


图 9 生姜精油微胶囊对猪肉 TVB-N 值的影响

Fig.9 Effects of ginger essential oil microcapsules on TVB-N value of pork

肉贮藏期。

2.7.4 感官品质 肉制品在储存期间感官评价的变化如图 11 所示。随着冷鲜猪肉贮藏时间不断增加,各处理组试样的感官评分均呈现下降趋势。对照组猪肉在第 6 天表面黏液增多,有一定异味,第 8 天色泽加深,气味难闻,第 10 天异味严重,弹性完全消失,已失去商品价值。生姜精油微胶囊处理组猪肉在第 10 天仍有较好的感官品质,保持着较好的新鲜度。同时,肉样经生姜精油微胶囊液浸泡后,表面泛白,贮藏 3 d 后基本恢复正常,感官品质优于其它处理组。结果表明生姜精油微胶囊能够明显抑制猪肉的腐败变质,较好地保持了猪肉的感官品质。另外,猪肉经过生姜精油微胶囊处理后风味清香,没有不友好的异味产生,易被大众所接受。

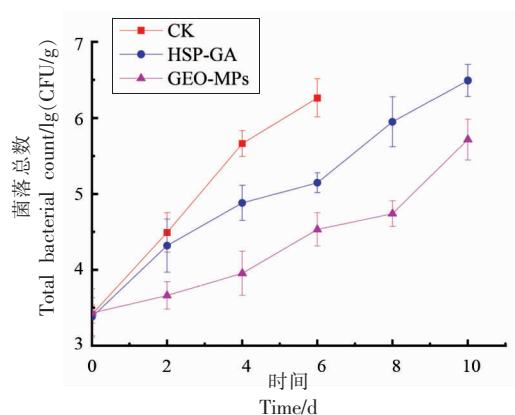


图10 生姜精油微胶囊对猪肉菌落总数的影响

Fig.10 Effects of ginger essential oil microcapsules on total bacterial count of pork

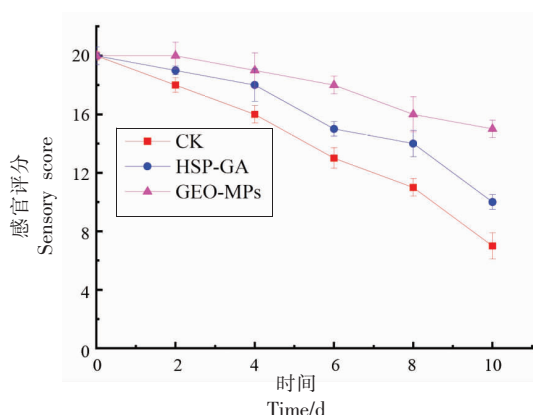


图11 生姜精油微胶囊对猪肉感官评分的影响

Fig.11 Effects of ginger essential oil microcapsules on sensory quality of pork

### 3 结论

本研究以生姜精油为芯材,水解大豆蛋白和阿拉伯胶为复合材料,采用复凝聚法制备了生姜精油微胶囊,表征了生姜精油微胶囊的理化特性和抗氧化性能,并分析了其对猪肉的保鲜效果。通过工艺优化,确定了复合凝反应的最佳反应条件为HSP-GA质量比为5:1,反应pH值为3.9。该工艺制备的生姜精油微胶囊包埋率为76.51%,平均粒径为51.38  $\mu\text{m}$ 。SEM、FT-IR和TGA分析表明,冷冻干燥后的生姜精油微胶囊呈不规则片状,包封效果和热稳定性良好。抗氧化能力结果表明,生姜精油微胶囊表现出较高DPPH自由基清除率,当其质量浓度为10 mg/mL时,DPPH自由基清除率高达52.65%。在猪肉贮藏期间,生姜精油微胶囊有效抑制了冷鲜肉的pH值、挥发性盐基氮和菌落总数的升高,较好地保持了猪肉的贮藏期品质,延长了猪肉货架期。综上所述,HSP和GA可用于生姜精油的包封,微囊化的生姜精油水溶性和热稳定性得到了提高,可用于猪肉保鲜,改善肉品贮藏期品质,延长货架期。该研究结果为新型、天然保鲜剂的开发及其在肉品保鲜中的应用提供理论依据和参考。

### 参 考 文 献

[1] TANG X, SUN X, WU V C H, et al. Predicting shelf-life of chilled pork sold in China[J]. Food Control, 2013, 32(1): 334-340.

- [2] SONG W L, DU Y F, YANG C X, et al. Development of PVA/EVA-based bilayer active film and its application to mutton[J]. LWT, 2020, 133: 110109.
- [3] 周琰冰, 艾启俊, 张德权. 4  $^{\circ}\text{C}$ 贮藏期内冷鲜羊肉表面菌相变化分析[J]. 食品科学, 2015, 36(6): 242-245.
- ZHOU Y B, AI Q J, ZHANG D Q. Changes in microflora on fresh mutton during chilled storage[J]. Food Sci, 2015, 36(6): 242-245.
- [4] 王新惠, 孙劲松, 赵芮, 等. 冷鲜猪肉贮藏过程中细菌群落结构演替规律分析[J]. 中国食品学报, 2021, 21(9): 233-240.
- WANG X H, SUN J S, ZHAO R, et al. Analysis of the succession of bacterial community structure of chilled pork during storage[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(9): 233-240.
- [5] DOMENECH E, JIMENEZ-BELENQUER A, AMOROS J A, et al. Prevalence and antimicrobial resistance of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella* strains isolated in ready-to-eat foods in eastern Spain[J]. Food Control, 2015, 47: 120-125.
- [6] MANSUR A R, OH D H. Combined effects of thermosonication and slightly acidic electrolyzed water on the microbial quality and shelf life extension of fresh-cut kale during refrigeration storage[J]. Food Microbiology, 2015, 51: 154-162.
- [7] 王明, 张家涛, 周斌, 等. 丁香酚复合保鲜剂对腐败希瓦氏菌的抗菌作用机制[J]. 食品科学, 2021, 42(13): 10-16.
- WANG M, ZHANG J T, ZHOU B, et al. Antibac-



- terial mechanism of eugenol-containing composite preservatives against *Shewanella putrefaciens*[J]. Food Sci, 2021, 42(13): 10–16.
- [8] 王盼, 何贝贝, 李志成, 等. 生物保鲜剂对冷却肉保鲜的影响[J]. 中国食品学报, 2019, 19(11): 199–207.  
WANG P, HE B B, LI Z C, et al. Effect of biological preservative on preservation of chilled pork[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(11): 199–207.
- [9] 郭家刚, 杨松, 伍玉菡, 等. 超临界萃取结合分子蒸馏纯化生姜精油及其挥发性成分分析[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(3): 224–231.  
GUO J G, YANG S, WU Y H, et al. Purification of ginger essential oil by supercritical combined with molecular distillation and analysis of its volatile constituents[J]. Food Ferment Ind, 2024, 50(3): 224–231.
- [10] SACCHETTI G, MAIETTI S, MUZZOLI M, et al. Comparative evaluation of 11 essential oils of different origin as functional antioxidants, antiradicals and antimicrobials in foods[J]. Food Chemistry, 2005, 91(4): 621–632.
- [11] HE J, HADIDI M, YANG S, et al. Natural food preservation with ginger essential oil: Biological properties and delivery systems[J]. Food Research International, 2023, 173(1): 113221.
- [12] 宋文龙, 李洋洋, 郜海燕, 等. 生姜精油微胶囊薄膜包装对秋葵保鲜效果的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(8): 142–148.  
SONG W L, LI Y Y, GAO H Y, et al. Effect of ginger essential oil microcapsule film packaging on okra preservation[J]. Food Ferment Ind, 2020, 46(8): 142–148.
- [13] BONILLA E, AZUARA E, BERISTAIN C I, et al. Predicting suitable storage conditions for spray-dried microcapsules formed with different biopolymer matrices[J]. Food Hydrocolloids, 2010, 24: 633–640.
- [14] CUI F C, ZHANG H W, WANG D F, et al. Advances in the preparation and application of microencapsulation to protect food functional ingredients[J]. Food & Function, 2023, 14(15): 6766–6783.
- [15] 刘艳凤, 乌日娜, 李默, 等. 益生菌微胶囊包埋及靶向递送体系研究进展[J]. 中国食品学报, 2023, 23(5): 400–410.  
LIU Y F, WU R N, LI M, et al. Research progress of probiotic microcapsule embedding and targeted delivery system[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(5): 400–410.
- [16] 杨小兰, 袁娅, 谭玉荣, 等. 纳米微胶囊技术在功能食品中的应用研究[J]. 食品科学, 2013, 34(21): 359–368.  
YANG X L, YUAN Y, TAN Y R, et al. Research and applications on nanocapsule technology in functional foods[J]. Food Sci, 2013, 34(21): 359–368.
- [17] SCHMIDT I, NOVALES B, BOU F, et al. Foaming properties of protein/pectin electrostatic complexes and foam structure at nanoscale[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2010, 345(2): 316–324.
- [18] RIOS-MERA J D, SALDANA E, RAMIREZ Y, et al. Encapsulation optimization and pH- and temperature-stability of the complex coacervation between soy protein isolate and inulin entrapping fish oil[J]. LWT – Food Science & Technology, 2019, 116: 108555.
- [19] COMUNIAN T A, NOGUEIRA M, SCOLARO B, et al. Enhancing stability of echium seed oil and beta-sitosterol by their coencapsulation by complex coacervation using different combinations of wall materials and crosslinkers[J]. Food Chemistry, 2018, 252: 277–284.
- [20] OZDEMIR N, BAYRAK A, TAT T, et al. Microencapsulation of basil essential oil: Utilization of gum arabic/whey protein isolate/maltodextrin combinations for encapsulation efficiency and *in vitro* release[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2021, 15: 1865–1876.
- [21] CHOURPA I, DUCCEL V, RICHARD J, et al. Conformational modifications of  $\alpha$  gliadin and globulin proteins upon complex coacervates formation with gum arabic as studied by Raman microspectroscopy[J]. Biomacromolecules, 2006, 7(9): 2616–2623.
- [22] 李佳笑, 石爱民, 刘红芝, 等. 植物蛋白酸性条件下溶解性提高的改性方法及应用研究进展[J]. 中国油脂, 2019, 44(9): 59–65.  
LI J X, SHI A M, LIU H Z, et al. Progress in modification methods to improve plant protein solubility under acidic conditions and its application China Oils Fats, 2019, 44(9): 59–65.
- [23] DE OLIVEIRA C F, CORRÊA A P F, COLETTO D, et al. Soy protein hydrolysis with microbial pro-

- tease to improve antioxidant and functional properties[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(5): 2668–2678.
- [24] LI W, WANG Y, ZHAO H, et al. Improvement of emulsifying properties of soy protein through selective hydrolysis: Interfacial shear rheology of adsorption layer[J]. *Food hydrocolloids*, 2016, 60: 453–460.
- [25] SHEN P H, ZHOU F B, ZHANG Y H, et al. Formation and characterization of soy protein nanoparticles by controlled partial enzymatic hydrolysis[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 105: 1–10.
- [26] 葛慧娟, 肖军霞, 黄国清. 乳清分离蛋白-果胶复合物在 Pickering 乳液制备中的应用[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(3): 161–172.
- GE H J, XIAO J X, HUANG G Q. The application of whey protein isolate-pectin complex in the preparation of pickering emulsions[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(3): 161–172.
- [27] 肖军霞, 杨剑, 黄国清, 等. SPI-GA 复凝聚法制备甜橙油微胶囊及表征[J]. *中国食品学报*, 2012, 12(11): 64–68.
- XIAO J X, YANG J, HUANG G Q, et al. Preparation of sweet orange oil microcapsule by soybean protein isolate-gum arabic complex coacervation and its characterization[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2012, 12(11): 64–68.
- [28] LIU F, TANG C H. Emulsifying properties of soy protein nanoparticles: Influence of the protein concentration and/or emulsification process[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(12): 2644–2654.
- [29] CHEN Q, ZHONG F, WEN J Y, et al. Properties and stability of spray-dried and freeze-dried microcapsules co-encapsulated with fish oil, phytosterol esters, and limonene[J]. *Drying Technology*, 2013, 31(6): 707–716.
- [30] 谭睿, 申瑾, 董文江, 等. 复合凝聚法制备绿咖啡油微胶囊及其性能[J]. *食品科学*, 2020, 41(23): 144–152.
- TAN R, SHEN J, DONG W J, et al. Preparation of green coffee oil microcapsules by complex coacervation method and its physicochemical properties[J]. *Food Sci*, 2020, 41(23): 144–152.
- [31] YANG Z M, PENG Z, LI J H, et al. Development and evaluation of novel flavour microcapsules containing vanilla oil using complex coacervation approach[J]. *Food Chemistry*, 2014, 145(7): 272–277.
- [32] 杜红霞, 李洪军, 李小勇, 等. 国内外香辛料抗氧化效果最新研究进展[J]. *食品科学*, 2008, 29(1): 359–363.
- DU H X, LI H J, LI X Y, et al. New development on antioxidant effects of natural spices antioxidants[J]. *Food Sci*, 2008, 29(1): 359–363.
- [33] MANCINI R A, RAMANATHAN R. Effects of post-mortem storage time on color and mitochondria in beef[J]. *Meat Science*, 2014, 98(1): 65–70.
- [34] ZHANG H Y, LIANG Y, LI X L, et al. Effect of chitosan-gelatin coating containing nano-encapsulated tarragon essential oil on the preservation of pork slices[J]. *Meat Science*, 2020, 166: 108137.
- [35] SONG X Y, WANG L, LIU T, et al. Mandarin (*Citrus reticulata* L.) essential oil incorporated into chitosan nanoparticles: Characterization, anti-biofilm properties and application in pork preservation [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 185: 620–628.

## Preparation of Ginger Essential Oil Microcapsule and Its Effect on the Quality of Chilled Pork

GUO Jiagang<sup>1,2</sup>, YANG Song<sup>1,2</sup>, WU Yuhan<sup>1,2</sup>, ZHU Qian<sup>1,2</sup>, DU Jingjing<sup>1,2</sup>, JIANG Jian<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Agro-products Processing Research, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031*

<sup>2</sup>*Anhui Engineering Laboratory of Food Microbial Fermentation and Functional Application, Hefei 230031*

**Abstract** In order to investigate the effect of ginger essential oil on the quality of chilled pork, ginger essential oil (GEO) was microencapsulated by the coacervation method with hydrolyzed soybean protein (HSP) and gum arabic (GA) as wall materials. The properties of ginger essential oil microcapsules (GEO-MPs) were characterized by particle size, scanning electron microscopy (SEM), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and thermogravimetric analysis

(TGA). The antioxidant capacity of GEO-MPs was analyzed, and the effect of ginger essential oil microcapsules on pork quality was evaluated. The results showed that the optimum conditions of coacervation method were as follows: Mass ratio of HSP to GA was 5:1, reaction pH value was 3.9. The microencapsulation rate of GEO-MPs prepared by the optimized process was 76.51%, and the particle size was 51.38  $\mu\text{m}$ . The freeze-dried ginger essential oil microcapsules showed irregular flake structure, and maintained high thermal stability and antioxidant properties. The freeze-dried GEO-MPs showed irregular flaked structure and maintained high thermal stability and antioxidant properties. GEO-MPs were applied to meat preservation. Compared with the blank control, GEO-MPs effectively inhibited the increase of pH value, total volatile basic nitrogen (TVB-N) and the total bacterial count (TBC) of pork, better maintained the quality of pork, and extended the shelf life of pork. These results provided guidance for the development and application of plant essential oil preservatives.

**Keywords** ginger essential oil; microcapsule; antibacterial; pork preservation