

# 桑椹多酚及其微胶囊对猪肉脯品质的改良

沈双伟<sup>1,2,3</sup>, 李登龙<sup>1,2,3</sup>, 林伟玲<sup>4</sup>, 张贤斌<sup>4</sup>, 刘学铭<sup>2</sup>, 林耀盛<sup>2</sup>, 唐道邦<sup>2</sup>, 王旭莘<sup>2</sup>, 程镜蓉<sup>2\*</sup>, 朱明军<sup>1,3,5\*</sup>

(1. 喀什大学生命与地理科学学院, 新疆喀什 844000) (2. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610)

(3. 叶尔羌绿洲生态与生物资源研究高校重点实验室, 新疆喀什 844000)

(4. 中山市黄圃镇农业服务中心, 广东中山 528429) (5. 华南理工大学生物科学与工程学院, 广东广州 510006)

**摘要:** 该实验使用超声法将桑椹多酚(MP)包埋入 $\beta$ -环糊精中( $\beta$ -CD), 制备桑椹多酚- $\beta$ -环糊精微胶囊(MPM), 验证了 $\beta$ -环糊精对桑椹多酚的保护作用, 并探究了桑椹多酚对肉脯的理化特性、抗氧化活性以及氧化稳定性的影响。结果表明, $\beta$ -环糊精可以提高酚类物质的稳定性, 实现酚类物质的缓释。添加有0.2%MPM的肉脯在贮藏28d后总酚保留率达到54.55%, 较对照组(添加0.2%MP)提高了71.06%。同时, $\beta$ -环糊精的包合作用还有助于进一步改善桑椹肉脯的质构和色泽。较空白对照组而言, 以MPM部分替代MP制作的肉脯ABTS自由基清除能力、FRAP还原能力、DPPH自由基清除率分别提升了1.05倍、20.99倍、1.04倍; 产品的过氧化值、TBARS值和羰基含量分别下降了75.11%、19.16%、44.77%, 巯基向二硫键的转化受到了抑制。该研究有助于推进桑椹多酚在功能性肉制品开发中的应用, 为提高植物多酚在热加工食品中的稳定性提供技术参考。

**关键词:** 桑椹多酚;  $\beta$ -环糊精; 微胶囊; 肉脯; 氧化特性

文章编号: 1673-9078(2022)03-185-194

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.3.0545

## Improving the Quality of the Dried Minced Pork Slices by Mulberry

### Polyphenols and Its Microcapsules

SHEN Shuangwei<sup>1,2,3</sup>, LI Denglong<sup>1,2,3</sup>, LIN Weiling<sup>4</sup>, ZHANG Xianbin<sup>4</sup>, LIU Xueming<sup>2</sup>, LIN Yaosheng<sup>2</sup>,  
TANG Daobang<sup>2</sup>, WANG Xuping<sup>2</sup>, CHENG Jingrong<sup>2\*</sup>, ZHU Mingjun<sup>1,3,5\*</sup>

(1.College of Life and Geographic Sciences, Kashi University, Kashi 844000, China) (2.Sericultural and Agri-food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China) (3.The Key Laboratory of Ecology and Biological Resources in Yarkand Oasis at Colleges & Universities under the Department of Education of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Kashi University, Kashi 844000, China)

(4.Zhongshan Huangpu Town Agricultural Service Center, Zhongshan 528429, China)

(5.School of Biology and Biological Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** In the present study, mulberry polyphenols (MP) were embedded in  $\beta$ -cyclodextrin ( $\beta$ -CD) by ultrasound to produce mulberry polyphenol- $\beta$ -cyclodextrin on the physicochemical properties, antioxidant activity, and oxidation stability of the dried minced pork slice were microcapsules (MPM). The protective effect of  $\beta$ -cyclodextrin on mulberry polyphenols was verified, and the effects of mulberry polyphenols

引文格式:

沈双伟,李登龙,林伟玲,等.桑椹多酚及其微胶囊对猪肉脯品质的改良[J].现代食品科技,2022,38(3):185-194

SHEN Shuangwei, LI Denglong, LIN Weiling, et al. Improving the quality of the dried minced pork slices by mulberry polyphenols and its microcapsules [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(3): 185-194

收稿日期: 2021-05-24

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金项目(2019B1515210018); 清远市科技计划项目(DZXQY031); 广州市科技计划项目(201807010080)

作者简介: 沈双伟(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工, E-mail: shuangwei\_shen@163.com; 共同第一作者: 李登龙(1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工, E-mail: 1312121038@qq.com

通讯作者: 程镜蓉(1988-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 农产品加工, E-mail: chengjingrong@gdaas.cn; 共同通讯作者: 朱明军(1969-), 男, 博士, 教授, 天山学者特聘教授, 研究方向: 发酵工程, E-mail: mjzhu@scut.edu.cn

investigated. The results showed that  $\beta$ -cyclodextrin could improve the stability of polyphenols and facilitate the slow release of phenolic compounds. After 28 days of storage, the retention rate of total phenolics in dried minced pork slices made with 0.2% MPM reached 54.55%, which increased by 71.06% compared with the control (supplemented with 0.2% MP). At the same time, the inclusion effect of  $\beta$ -cyclodextrin further improved the texture and color of the mulberry polyphenols-enriched dried minced pork slices. Compared with the blank control group, the ABTS free radical scavenging ability, FRAP reduction ability, and DPPH free radical scavenging rate of the meat prepared by of replaced partially MP with MPM increased by 1.05 times, 20.99 times, and 1.04 times, respectively. The peroxide value, TBARS value, and carbonyl content decreased by 75.11%, 19.16%, and 44.77%, respectively, with the conversion of sulfhydryl groups to disulfide bonds being significantly inhibited. This research will help to promote the application of mulberry polyphenols in the development of functional meat products and provide technical reference for improving the stability of plant polyphenols in thermal processed food products.

**Key words:** mulberry polyphenols;  $\beta$ -cyclodextrin; microcapsules; dried minced pork slice; oxidation property

猪肉脯作为我国市场主要的干肉制品之一，是一种中国传统风味美食。将新鲜的猪瘦肉经过去筋膜、拌料、摊片、干燥、烘烤等系列加工工序后制得肉脯成品，因其色香味独特、营养丰富，且方便携带、深受大众喜爱，具有广阔的市场前景。但是，作为肉制品，猪肉脯的脂质和蛋白质含量较高，在高温烤制与贮运过程中易受到氧、光照及酶等的氧化诱导，使得脂质和蛋白质发生不同程度地氧化，最终影响产品的色泽、风味及其营养价值<sup>[1,2]</sup>。为了有效调控肉制品的氧化，抗氧化剂被广泛应用于肉制品生产。然而，近年来一些常见的合成型抗氧化剂（抗坏血酸，丁基羟基甲苯，丁基羟基茴香醚等）被证实具有潜在致病性和致敏性<sup>[3-5]</sup>。于是人们开始关注新型绿色、天然的抗氧化剂的开发。研究发现，许多天然植物成分可以作为肉制品的抗氧化剂，改善加工类肉制品的抗氧化活性，且效果可以与传统抗氧化剂相媲美<sup>[6]</sup>。

桑椹是一种富含多酚类物质的水果，被证实具有广泛的生物活性，如清除自由基，抗糖尿病，神经保护，抗疲劳，抗动脉粥样硬化，抗血栓，免疫调节等<sup>[7]</sup>。前期研究发现<sup>[8-10]</sup>，桑椹多酚（MP）可有效改善肉制品的氧化稳定性，并赋予肉制品一定的抗氧化性。然而，由于酚类物质的热敏性，桑椹多酚在高温、光照和有氧等环境下易发生降解，必然影响其生物活性的发挥。因此，设法提高酚类物质的热稳定性、改善其加工性能，成为植物多酚在加工肉制品应用中的重要课题。微胶囊是一种有效提高活性物质生物利用度和稳定性的技术，它有助于实现生物活性物质的缓释，减少外界环境对核心材料的影响<sup>[11]</sup>，该技术广泛应用于食品和医药领域，其通过包裹或密封等方式，保护对外界敏感的化合物，是解决物料不稳定问题的一种优良手段。通过该技术对多酚类物质进行保护，可以克服其溶解度低、稳定性差、口感不佳等问题。 $\beta$ -环糊精（ $\beta$ -CD）衍生自淀粉，可以在一定条件下进行生物降解，由于具有亲水性外表面和疏水性内腔，能够与

生物活性物质形成包合物，其空腔尺寸适合各种小分子，因此被广泛用作包埋的材料。本实验采用 $\beta$ -环糊精（ $\beta$ -CD）作为壁材制备了桑椹多酚- $\beta$ -环糊精微胶囊（MPM），将其添入猪肉脯中，探究桑椹多酚对肉脯氧化特性的调控作用并验证微胶囊技术对桑椹多酚的保护作用，以期能为植物多酚在肉脯等肉制品加工中的应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料

猪里脊肉购自广东华润万家超市； $\beta$ -环糊精，上海市麦克林生化试剂厂；超纯水，美国 Milli-Q 纯水仪；ABTS、DPPH、FRAP 试剂盒，中国南京建成生物工程研究所，其它试剂均为分析纯。

### 1.2 仪器与设备

Ultrasonic Cleaner SB25-12 清洗池，宁波新芝生物科技有限公司；T25D 均质机，德国 IKA 集团；UltraScan VIS 色度仪，美国 Hunter Lab 公司；TA-Xt.PLUS 质构仪，英国 SMS 公司；UV-1800 紫外-可见分光光度计，日本岛津公司；WRH 热泵干燥机，广东威尔信实业有限公司；酶标仪 Gen5，美国 Bio Tek 公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 样品制备

##### 1.3.1.1 桑椹多酚的制备

本研究使用的桑椹多酚（MP）源自桑椹（大 10）品种，由实验室自制得到，制备方法参照课题组前期研究<sup>[12]</sup>。样品中总酚、总黄酮和总花青素的含量分别为  $406.00 \pm 1.36$  mg 没食子酸当量(GAE)/g、 $94.47 \pm 1.08$  mg 槲皮素当量(QE)/g 和  $73.59 \pm 1.25$  mg 矢车菊素-3-葡萄糖苷当量(C3GE)/g。

表 1 不同处理组肉脯配方

Table 1 Different treatment groups of dried minced pork slice

原料	配方含量/g				
	空白组	$\beta$ -CD 组	MP 组	MPM 组	MP+MPM 组
瘦肉	850	850	850	850	850
肥肉	150	150	150	150	150
盐	20	20	20	20	20
糖	80	80	80	80	80
复合磷酸盐	3	3	3	3	3
木瓜蛋白酶 g (5000 U/mg)	4.40	4.40	4.40	4.40	4.40
$\beta$ -CD	-	2	-	-	-
MP	-	-	2	-	1
MPM	-	-	-	2	1

### 1.3.1.2 桑椹多酚- $\beta$ 环糊精微胶囊的制备

将桑椹多酚与  $\beta$ -环糊精以 1:6 ( $m/m$ ) 比例溶于蒸馏水, 在 25 °C、450 W 条件下超声 1.5 h。反应结束后, 将上述样品溶液在 -20 °C 预冻, 再使用真空冷冻干燥机冻干。冻干后的固体粉末, 即桑椹多酚- $\beta$  环糊精微胶囊 (MPM)。

### 1.3.1.3 猪肉脯的制作

参考 Xu 等<sup>[13]</sup>的方法制作肉脯。猪瘦肉和纯肥肉, 用绞肉机分别绞碎。猪肉脯的配方如下: 850 g 瘦肉、150g 纯肥肉、20 g 盐、80 g 糖、3 g 磷酸盐和 4.4 g 木瓜蛋白酶 (5000 U/g)。将搅碎后的肥肉和其他成分用拌料机混合均匀。混合后, 制备四组干燥的猪肉切片 (具体配方见表 1)。然后包括空白组在内进行 30 min 的搅拌以便彻底混合。混合后的原料制作成 4 cm×4 cm×4 cm 的正方形。之后, 采用热泵干燥 (温度 55 °C, 湿度 30%), 直至样品水分含量接近 17%。最后, 将所有样品在 150 °C 下烘烤 3 min。待样品冷却至室温后, 用聚乙烯袋包装, 置于室温 (25±2 °C) 光照下保存。

### 1.3.2 酚类物质的提取

肉脯中酚类物质的提取方法参考 Stojadinovic 等<sup>[14]</sup>的方法并适当修改。向 2 g 肉脯样品中加入 50 mL 模拟胃液和 50 mL 去离子水, 在 10000 r/min 下均质 30 s, 加入 10 mL 猪胃蛋白酶溶液 (4 mg/mL), 在恒温水浴震荡器中, 37 °C、120 r/min 消化 4 h。使用中速定性滤纸过滤, 取上清液使用旋转蒸发器蒸干水分, 收集固体残留物并溶解在 20 mL 蒸馏水中, 即得肉脯多酚粗提液。再将肉脯多酚粗提液和 TCA 溶液 (20%,  $m/V$ ) 以 1:1 ( $V/V$ ) 比例混合后, 漩涡震荡, 在 10000 r/min 下离心 10 min, 过滤并收集上清液, 此步骤重复 2 次, 最终得到的上清液就是肉脯多酚提取液。

### 1.3.3 总酚含量测定

使用福林酚法测定 1.3.2 中提取液的总酚含量, 参照 Lee 等<sup>[15]</sup>方法稍加修改。0.1 mL 的提取液中加入 2.5 mL 福林酚试剂 (0.2 mol/L) 使用去离子水定容至 3 mL 后, 置于室温反应 5 min。再向上述溶液中加入 2 mL  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (7.5%,  $m/V$ ), 室温下避光反应 1 h 后, 于 765 nm 处测吸光值。用没食子酸制作标准曲线。

### 1.3.4 肉脯色泽测定

每个样品随机选取三个位置进行采样, 使用 UltraScan VIS 色度仪对样品色度进行测定, 记录每一次测得的  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值。

### 1.3.5 肉脯质构测定

将两块肉脯重叠, 使用 TA-XT.PLUS 质构仪对样品进行测定, 探头型号为 P50。模式选择为 TPA, 参数设置如下: 测前、测后的速度均为 2.0 mm/s、测中速度为 1.0 mm/s; 两次下压间隔 5.0 s; 应变和下压距离均为 30%。

### 1.3.6 肉脯抗氧化活性的测定

取 5 g 样品加入 45 mL 生理盐水, 于 10000 r/min 均质 30 s, 将均质后的液体用中速定性滤纸过滤, 收集滤液备用。滤液蛋白浓度采用双缩脲法测定。

肉脯的抗氧化活性是依照抗氧化试剂盒使用说明对滤液进行的测定的。

### 1.3.7 脂质氧化测定

TBARS 测定基于 Zhang 等<sup>[16]</sup>的方法并进行了适当修改。取肉脯 1 g 加入 9 mL 0.9% NaCl 溶液, 用均质机在 10000 r/min 下均质 30 s, 重复此步骤两次。取 0.2 mL 匀浆液加入 0.2 mL 的 SDS 溶液 (8.1%,  $m/V$ )、1.5 mL pH 3.5 的醋酸缓冲液 (20%,  $V/V$ )、1.5 mL TBARS 水溶液 (0.8%,  $m/V$ ) 和 0.6 mL 双蒸水, 放置在 95 °C 水浴锅中 1 h, 取出, 迅速冷却至室温后, 10000 r/min 离心 5 min, 在 532 nm 处测定吸光值。用 1,1,3,3-四乙氧基丙烷 (TEP) 制作标准曲线。

参照国标 GB5009.227-2016 第一法<sup>[17]</sup>对过氧化值进行测定。

### 1.3.8 蛋白氧化测定

取 2 g 肉脯加入 20 mL 甲溶液 (3.5 mmol/L 磷酸二氢钾、15.6 mmol/L 磷酸氢二钠, pH 7.5), 10000 r/min 均质 30 s 后, 匀浆使用高速冷冻离心机在 4 °C、10000 r/min 下离心 10 min, 过滤。沉淀中加入 20 mL 溶液乙 (15.6 mmol/L 磷酸氢二钠、0.45 mol/L 氯化钾、3.5 mmol/L 磷酸二氢钾, pH 7.5) 10000 r/min 下均质 30 s 后, 在 4 °C、10000 r/min 条件下离心 10 min, 过滤, 所得滤液为肌原纤维蛋白溶液。

#### 1.3.8.1 蛋白羰基值测定

蛋白羰基值的测定依据 Georgiou 等<sup>[18]</sup>的方法并适当修改。取 0.1 mL 肌原纤维蛋白溶液, 加入 0.5 mL 0.02 mol/L 2,4-二硝基苯肼(DNPH), 将混合液于 37 °C 水浴 15 min 之后加入 0.5 mL 三氯乙酸 (20%, V/V), 旋涡振荡、10000 r/min 离心 5 min, 沉淀用 1 mL 无水乙醇和乙酸乙酯 (1:1, V/V) 洗涤 3 次后离心, 分离上清后, 所得沉淀加入 1 mL 6 mol/L 的盐酸胍溶液, 37 °C 水浴 15 min, 加入 4 倍于溶液体积的蒸馏水, 在 370 nm 测吸光值, 牛血清蛋白绘制标准曲线, 对照组样品采用 0.5 mL 2 mol/L 盐酸代替 DNPH。

计算公式如下:

$$\text{nmol羰基/mg蛋白} = \frac{5 \times 10^6 \times (A - A_0)}{\epsilon \times C}$$

式中:

A—样品吸光值;

A<sub>0</sub>—对照组吸光值;

ε—摩尔消光系数 (2.1×10<sup>4</sup> L/mol·cm);

C—洗涤后的蛋白浓度。

#### 1.3.8.2 巯基和二硫键含量测定

游离巯基使用 Sedlak 等<sup>[19]</sup>的方法并稍加修改。取 0.5 mL 肌原纤维蛋白溶液加入 2.5 mL Tris-Gly-8 mol/L 尿素缓冲液, 充分振荡混匀, 加入 20 μL Ellman 试剂, 37 °C 水浴 15 min 后, 10000×g 离心 5 min, 测定 412 nm 处吸光值, 对照组使用 Tris-Gly 缓冲液代替 Ellman 试剂。

计算公式如下:

$$\text{巯基值(nmol / mg protein)} = \frac{10^6 \times (A - A_0) \times V}{\epsilon \times V_0 \times C}$$

式中:

A—样品吸光值;

A<sub>0</sub>—对照组吸光值;

V—反应总体积;

ε—摩尔消光系数 (1.36×10<sup>4</sup> L/mol·cm);

V<sub>0</sub>—加入样品体积;

C—蛋白浓度。

蛋白总巯基及二硫键含量的测定<sup>[20]</sup>: 取 0.2 mL 肌原纤维蛋白溶液, 依次加入 2 mL Tris-Gly-8 mol/L 尿素溶液, 20 μL β-巯基乙醇, 在 37 °C 下水浴 15 min 后加入 50% TCA 至最终浓度为 10% (m/V), 10000 r/min 离心 5 min, 取出上清, 沉淀用丙酮洗涤三次后, 加入 3 mL Tris-Gly-8 mol/L 尿素缓冲液和 20 μL Ellman 试剂, 充分混匀后, 将悬浮液置于 37 °C 下水浴 15 min, 取出, 10000 r/min 离心 5 min, 测定上清液在 412 nm 吸光度。对照组加入 20 μL Tris-Gly 缓冲液代替 Ellman 试剂。总巯基含量的计算同游离巯基; 二硫键含量为总巯基与游离巯基含量的差值。

### 1.3.9 数据分析

每个实验都进行 3 次独立实验, 数据结果为平均值±标准差。使用 SPSS 19.0 统计软件程序做出分析。使用 Anova 和 Duncan 的多重范围检验来进行显著性差异分析, 其中 p<0.05 才认定有统计学意义。

## 2 结果与讨论

### 2.1 肉脯中酚类物质稳定性分析

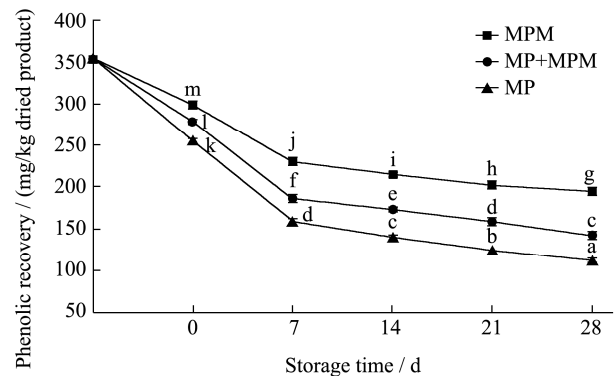


图 1 肉脯在贮藏过程中总酚的变化

Fig.1 Change of total phenols in the dried minced pork slices during storage

注: 同组数据不同小写字母代表总酚含量的显著差异 (p<0.05)。

如图 1 所示, 贮藏期间, 各实验组肉脯总酚含量 (TPC) 均出现不同程度下降, 且在加工和储藏前期损失最严重。这说明加工和贮藏过程伴随着多酚的降解。贮藏 28 d 后, 添加 MP 组中 TPC 值较初始值减少了 68.32%, 这说明多酚的稳定性可能受到光照和氧的影响。利用 β-环糊精对 MP 进行包埋后, 肉脯 (添加 MPM) 的 TPC 保留率提高到 54.55%, 较处理前 (MP 组) 提升了 71.06%。由于环糊精分子呈锥形的中空圆筒立体环状结构, 其表面亲水, 而内部空腔疏水, 能

够与疏水化合物形成包合物,不仅可以提高溶解度和生物利用度,还可以减弱环境因子(氧、温度和光等)对活性物质造成的应激损伤<sup>[21]</sup>。这也是MPM中多酚稳定性提高的原因。与本实验结果类似,Wang等<sup>[22]</sup>发现, $\beta$ -CD可以较好的包埋八角多酚,提高其稳定性和溶解性。因此,以 $\beta$ -环糊精包埋的桑椹多酚部分替代MP,所得的肉脯酚类物质的含量较对照组有了显著的提高。其中,未受到 $\beta$ -环糊精保护的酚类物质的热损失是造成肉脯酚类物质损失的主要原因。另外,除了氧化损伤外,酚类物质与肉制品中碳水化合物、脂质和蛋白质等成分的结合也会影响酚类物质的提取率<sup>[23]</sup>,造成可提取酚含量的下降。与我们推测相一致,Pešić等<sup>[24]</sup>研究发现将葡萄皮提取物加入含有火鸡肉的混合食物基后,葡萄皮花青素会与肉类蛋白等成分相互作用导致其含量下降。总的来看, $\beta$ -环糊精对桑椹多酚进行包埋,可有效提高桑椹多酚在肉脯加工和贮藏过程中的稳定性。

## 2.2 MP及MPM对肉脯色泽的影响

由表2可知,在肉脯制作过程中,添加MP及MPM会使肉脯L\*(亮度)、a\*(红度)和b\*值(黄度)下降,这可能是因为桑椹多酚富含花青素,如矢

车菊素-3-葡萄糖苷和矢车菊素-3-芸香糖苷,在肉制品弱酸性的环境中呈现紫红色,影响了肉脯的色泽。然而,相较MP组,添加MPM的肉脯色泽有了明显改善,这主要是因为 $\beta$ -CD在一定程度上掩盖了桑椹多酚颜色,减少桑椹多酚对肉脯色泽带来的不良影响。在贮藏期间,对照组肉脯的L\*值下降,这可能是肉脯氧化所导致。与本研究相似,Wang等人<sup>[25]</sup>在研究中也发现兔肉氧化会导致L\*值下降。值得注意的是,所有添加MP肉脯在储藏过程中L\*、a\*和b\*值均呈增加趋势。L\*值和a\*值的变化,主要源于酚类物质的降解<sup>[10]</sup>。与本研究结果相似,徐亮<sup>[26]</sup>使用阿拉伯胶对桑椹多酚进行包埋处理并用于肉脯的研究,同样发现添加桑椹多酚的肉脯在贮藏20d后L\*值和a\*值上升。然而,总体而言,对MP进行微胶囊处理后,MPM组L\*、a\*值的增幅高于MP组样品。该现象说明可能是 $\beta$ -CD对多酚的包埋和缓释作用降低了酚类物质在储藏过程中的降解。实验组肉脯中b\*值可能是由于肉蛋白中变性珠蛋白的氧化降解和血红素色素的氧化裂解,使得铁从血红素分子中释放出来,造成b\*值的改变<sup>[27]</sup>。总体而言,利用 $\beta$ -CD对桑椹多酚进行微胶囊处理有助于改善由MP对肉脯色泽带来的不利影响。

表2 肉脯在贮藏期色泽的变化

Table 2 Color variation of the dried minced pork slice during storage

	贮藏时间/d	空白组	$\beta$ -CD	MPM	MP+MPM	MP
L*	0	51.82±0.39 <sup>e</sup>	47.40±0.45 <sup>d</sup>	38.41±0.56 <sup>c</sup>	34.56±0.31 <sup>b</sup>	31.32±0.56 <sup>a</sup>
	7	50.73±0.07 <sup>e</sup>	45.99±0.61 <sup>d</sup>	40.41±0.53 <sup>c</sup>	35.23±0.11 <sup>b</sup>	32.55±0.23 <sup>a</sup>
	14	49.76±0.60 <sup>e</sup>	43.79±0.69 <sup>d</sup>	42.32±0.54 <sup>c</sup>	36.44±0.34 <sup>b</sup>	33.40±0.22 <sup>a</sup>
	21	48.85±0.39 <sup>e</sup>	41.74±0.52 <sup>c</sup>	44.27±0.34 <sup>d</sup>	37.29±0.24 <sup>b</sup>	34.40±0.58 <sup>a</sup>
	28	47.72±0.21 <sup>e</sup>	36.69±0.20 <sup>b</sup>	46.29±0.41 <sup>d</sup>	38.30±0.33 <sup>c</sup>	35.37±0.46 <sup>a</sup>
a*	0	7.53±0.20 <sup>c</sup>	6.40±0.56 <sup>b</sup>	6.24±0.17 <sup>b</sup>	5.57±0.17 <sup>a</sup>	5.43±0.19 <sup>a</sup>
	7	6.73±0.37 <sup>b</sup>	8.31±0.30 <sup>c</sup>	7.02±0.15 <sup>b</sup>	5.88±0.06 <sup>a</sup>	5.81±0.15 <sup>a</sup>
	14	6.09±0.28 <sup>a</sup>	9.53±0.24 <sup>c</sup>	7.95±0.11 <sup>b</sup>	6.24±0.28 <sup>a</sup>	6.19±0.22 <sup>c</sup>
	21	5.35±0.20 <sup>a</sup>	11.60±0.26 <sup>d</sup>	8.63±0.36 <sup>c</sup>	6.54±0.13 <sup>b</sup>	6.53±0.37 <sup>b</sup>
	28	4.71±0.15 <sup>a</sup>	12.94±0.39 <sup>d</sup>	9.37±0.22 <sup>c</sup>	6.95±0.29 <sup>b</sup>	6.89±0.28 <sup>b</sup>
b*	0	18.36±0.37 <sup>c</sup>	16.39±0.38 <sup>d</sup>	9.61±0.29 <sup>c</sup>	7.87±0.36 <sup>b</sup>	5.63±0.20 <sup>a</sup>
	7	18.64±0.54 <sup>e</sup>	17.27±0.52 <sup>d</sup>	11.56±0.28 <sup>c</sup>	8.60±0.10 <sup>b</sup>	6.79±0.07 <sup>a</sup>
	14	19.12±0.47 <sup>e</sup>	18.22±0.21 <sup>d</sup>	13.71±0.39 <sup>c</sup>	9.34±0.10 <sup>b</sup>	7.57±0.28 <sup>a</sup>
	21	19.80±0.19 <sup>e</sup>	18.84±0.25 <sup>d</sup>	15.00±0.14 <sup>c</sup>	10.39±0.29 <sup>b</sup>	8.49±0.21 <sup>a</sup>
	28	20.57±0.16 <sup>e</sup>	19.30±0.32 <sup>d</sup>	16.57±0.23 <sup>c</sup>	11.33±0.21 <sup>b</sup>	9.33±0.20 <sup>a</sup>

注:不同小写字母代表相同天数不同实验组组间的显著差异( $p < 0.05$ )。

## 2.3 MP及MPM对肉脯质构的影响

质构是影响肉脯品质的重要因素。由表3可知,空白组和实验组肉脯在贮藏期间的弹性、凝聚力和回

复性无显著差异( $p > 0.05$ ),硬度和咀嚼性均有所增加,这可能是在贮藏过程中水分迁移和蛋白质氧化所致。在贮藏期第0d,MP组样品的硬度和咀嚼性较空白组有明显改善。有研究表明<sup>[26]</sup>,抗氧化剂可以降低

肉脯因蛋白质和脂质的氧化而引起的肌肉膜损伤, 保护肌肉纤维的完整性, 使硬度降低。因此我们推测, 可能是桑椹多酚中酚类物质有效缓解了肉脯加工过程中的氧化, 改善了肉脯的质构。与本研究结果相似, Zhang 等<sup>[16]</sup>研究发现鼠尾草可以显著减少氧化引起的香肠质地下降; 方辉<sup>[28]</sup>发现迷迭香作为肉制品氧化抑

制剂, 可有效缓解由于火腿氧化造成的硬度和咀嚼性的上升。在贮藏过程中, 添加了 MP 及 MPM 的实验组肉脯硬度和咀嚼性均低于空白组。其中 MP+MPM 组的效果最佳, 这可能是由于 MPM 可以实现多酚的缓释, 进一步改善肉脯的氧化稳定性和质构特性。

表 3 肉脯在贮藏期的质构变化

Table 3 Texture variation of the dried minced pork slice during storage

	贮藏时间/d	空白组	$\beta$ -CD	MPM	MP+MPM	MP
硬度(N)	0	3563±72 <sup>d</sup>	3486±76 <sup>cd</sup>	3396±40 <sup>c</sup>	3036±97 <sup>a</sup>	3239±76 <sup>b</sup>
	7	4275±40 <sup>d</sup>	4138±54 <sup>c</sup>	4061±60 <sup>c</sup>	3755±44 <sup>a</sup>	3905±92 <sup>b</sup>
	14	4953±44 <sup>d</sup>	4863±37 <sup>d</sup>	4745±57 <sup>c</sup>	4465±59 <sup>a</sup>	4629±54 <sup>b</sup>
	21	5702±67 <sup>d</sup>	5575±70 <sup>c</sup>	5466±61 <sup>c</sup>	5153±46 <sup>a</sup>	5337±61 <sup>b</sup>
	28	6423±67 <sup>e</sup>	6286±73 <sup>d</sup>	6153±46 <sup>c</sup>	5864±59 <sup>a</sup>	6013±85 <sup>b</sup>
弹性	0	0.93±0.01 <sup>a</sup>	0.93±0.02 <sup>a</sup>	0.93±0.03 <sup>a</sup>	0.93±0.04 <sup>a</sup>	0.93±0.01 <sup>a</sup>
	7	0.96±0.02 <sup>a</sup>	0.96±0.03 <sup>a</sup>	0.95±0.03 <sup>a</sup>	0.95±0.02 <sup>a</sup>	0.95±0.03 <sup>a</sup>
	14	0.99±0.04 <sup>a</sup>	0.99±0.02 <sup>a</sup>	0.97±0.04 <sup>a</sup>	0.97±0.03 <sup>a</sup>	0.97±0.02 <sup>a</sup>
	21	1.02±0.03 <sup>a</sup>	1.02±0.04 <sup>a</sup>	0.99±0.06 <sup>a</sup>	0.99±0.03 <sup>a</sup>	0.99±0.04 <sup>a</sup>
	28	1.05±0.04 <sup>a</sup>	1.04±0.03 <sup>a</sup>	1.01±0.06 <sup>a</sup>	1.01±0.04 <sup>a</sup>	1.01±0.05 <sup>a</sup>
凝聚力	0	0.93±0.02 <sup>a</sup>	0.93±0.03 <sup>a</sup>	0.93±0.03 <sup>a</sup>	0.92±0.04 <sup>a</sup>	0.92±0.01 <sup>a</sup>
	7	0.94±0.01 <sup>a</sup>	0.94±0.03 <sup>a</sup>	0.94±0.04 <sup>a</sup>	0.93±0.02 <sup>a</sup>	0.93±0.02 <sup>a</sup>
	14	0.95±0.03 <sup>a</sup>	0.95±0.02 <sup>a</sup>	0.95±0.04 <sup>a</sup>	0.94±0.03 <sup>a</sup>	0.94±0.02 <sup>a</sup>
	21	0.96±0.02 <sup>a</sup>	0.96±0.02 <sup>a</sup>	0.96±0.03 <sup>a</sup>	0.95±0.02 <sup>a</sup>	0.95±0.03 <sup>a</sup>
	28	0.97±0.02 <sup>a</sup>	0.97±0.03 <sup>a</sup>	0.97±0.05 <sup>a</sup>	0.96±0.02 <sup>a</sup>	0.96±0.03 <sup>a</sup>
咀嚼性	0	3185±50 <sup>d</sup>	3084±61 <sup>cd</sup>	2984±68 <sup>ac</sup>	2785±71 <sup>a</sup>	2883±59 <sup>ab</sup>
	7	3894±81 <sup>d</sup>	3783±68 <sup>cd</sup>	3684±60 <sup>bc</sup>	3481±75 <sup>a</sup>	3578±65 <sup>ab</sup>
	14	4590±70 <sup>d</sup>	4481±76 <sup>cd</sup>	4381±46 <sup>bc</sup>	4181±54 <sup>a</sup>	4283±50 <sup>ab</sup>
	21	5282±46 <sup>d</sup>	5180±79 <sup>cd</sup>	5081±47 <sup>bc</sup>	4877±59 <sup>a</sup>	4981±65 <sup>ab</sup>
	28	5981±36 <sup>e</sup>	5884±51 <sup>d</sup>	5782±47 <sup>c</sup>	5579±51 <sup>a</sup>	5681±28 <sup>b</sup>
回复性	0	0.72±0.02 <sup>a</sup>	0.73±0.03 <sup>a</sup>	0.72±0.03 <sup>a</sup>	0.71±0.03 <sup>a</sup>	0.71±0.02 <sup>a</sup>
	7	0.73±0.04 <sup>a</sup>	0.74±0.05 <sup>a</sup>	0.73±0.02 <sup>a</sup>	0.72±0.04 <sup>a</sup>	0.72±0.05 <sup>a</sup>
	14	0.74±0.03 <sup>a</sup>	0.75±0.03 <sup>a</sup>	0.74±0.04 <sup>a</sup>	0.73±0.04 <sup>a</sup>	0.73±0.03 <sup>a</sup>
	21	0.75±0.04 <sup>a</sup>	0.76±0.03 <sup>a</sup>	0.75±0.05 <sup>a</sup>	0.74±0.04 <sup>a</sup>	0.74±0.05 <sup>a</sup>
	28	0.76±0.04 <sup>a</sup>	0.77±0.06 <sup>a</sup>	0.76±0.05 <sup>a</sup>	0.75±0.07 <sup>a</sup>	0.75±0.06 <sup>a</sup>

注: 不同小写字母代表相同天数不同实验组组间的显著差异 ( $p < 0.05$ )。

#### 2.4 MP 及 MPM 对肉脯抗氧化活性的影响

本研究通过 DPPH 清除能力、ABTS 法和 FRAP 法测定总抗氧化能力来评估肉脯的抗氧化活性, 如图 2 所示, 对照组肉脯的抗氧化能力较低 (ABTS 清除能力、FRAP 还原能力和 DPPH 清除率分别为 77.00  $\mu\text{mol equivalent/mg sample}$ 、6.48  $\mu\text{mol equivalent/mg sample}$  和 36.51%), 桑椹多酚中酰化花色苷、酚酸等物质具有较强的抗氧化活性, 当添加 MP 后, 肉脯的抗氧化能力显著提高 (ABTS 清除能力、FRAP 还原

能力和 DPPH 清除率、分别达到 156.33  $\mu\text{mol equivalent/mg sample}$ 、142.01  $\mu\text{mol equivalent/mg sample}$  和 64.02%)。这说明桑椹多酚作为一种抗氧化剂可改善肉脯的抗氧化性, 这与 Arun K 等<sup>[29]</sup>和 Li 等<sup>[30]</sup>的研究结果是一致的。MP 经包埋后一定程度上降低了肉脯的抗氧化能力, 这可能是  $\beta$ -环糊精与桑椹多酚结合后, 形成的微胶囊促成了桑椹多酚的缓释所致。胡方斌<sup>[31]</sup>研究与本实验结果相类似, 他采用 PLGA 载虾青素纳米粒, 发现包埋后虾青素的 ABTS 自由基清除能力下降。此外, 我们注意到 MP 和 MPM 混合添加组

的肉脯抗氧化能力在各组中是最强的,这再次证实肉脯抗氧化活性的提高源于桑椹多酚的介入, $\beta$ -CD 作为多酚保护剂,实现了酚类物质的缓释,减少了其在热加工过程中的损失,从而提高了肉脯的抗氧化能力。

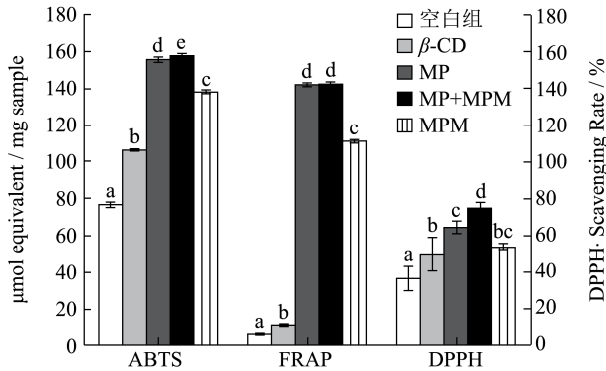


图2 肉脯的抗氧化能力

Fig.2 The antioxidant capacity of the dried minced pork slices

注:不同小写字母代表同种抗氧化能力不同实验组组间的显著性差异 ( $p < 0.05$ )。

### 2.5 MP 及 MPM 对肉脯脂质氧化的影响

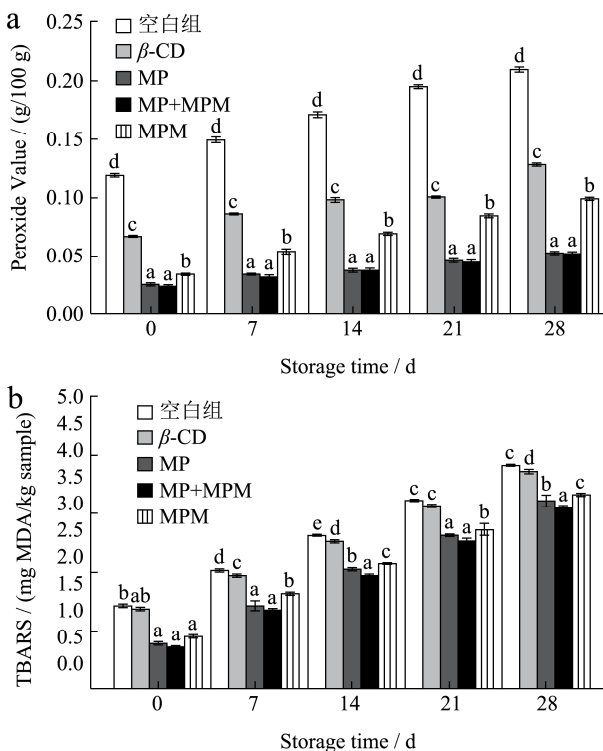


图3 肉脯过氧化值 (a)、TBARS 值 (b) 在贮藏过程中的变化

Fig.3 Variations of the peroxidation value and the TBARS value of the dried minced pork slices during storage

注:不同小写字母代表相同天数不同实验组组间的显著性差异 ( $p < 0.05$ )。下图同。

本实验选择过氧化值和 TBARS 值来表征肉脯的脂质氧化程度。如图 3 (a、b) 所示,在贮藏期第 0 d 对照组肉脯过氧化值和 TBARS 值相对较高,且随着

贮藏时间的增加,二者数值呈上升趋势;MP 的添加显著缓解了该趋势。这可能是因为桑椹多酚富含黄酮化合物,具有清除自由基和螯合金属离子的活性,可以延缓脂质氧化<sup>[32,33]</sup>。在贮藏 28 d 后,相对对照组(未添加任何抗氧化剂),添加 MP 的肉脯过氧化值和 TBARS 值分别降低了 74.80%和 15.91%,这同样证明 MP 可有效缓解肉脯在热加工和贮藏过程中的脂质氧化。与本结论类似的,姚波<sup>[34]</sup>将 0.15%的茶黄素和 0.15%脂溶性茶多酚加入牛肉棒,可有效延缓牛肉棒的脂质过氧化,延长产品的保质期。将 MP 制成微胶囊 (MPM) 后,肉脯在贮藏过程中过氧化值和 TBARS 值较前者略有增加,这同样是因为桑椹多酚的屏障作用减弱了多酚与自由基的直接作用所致。尽管如此,其值仍显著低于对照组。值得注意的是,贮藏末期,添加 MP+MPM 组肉脯的脂质氧化程度在各组中是最低的,这说明 MP 和 MPM 二者在调控肉脯氧化过程中可能存在协同作用。

### 2.6 MP 及 MPM 对肉脯蛋白质氧化的影响

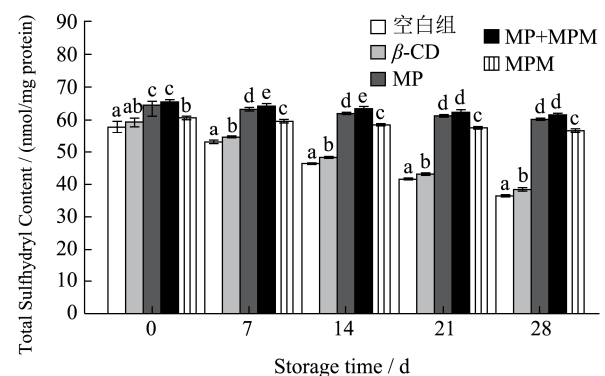


图4 肉脯中游离巯基在贮藏过程中的变化

Fig.4 Free sulfhydryl content variation of the dried minced pork slice during storage

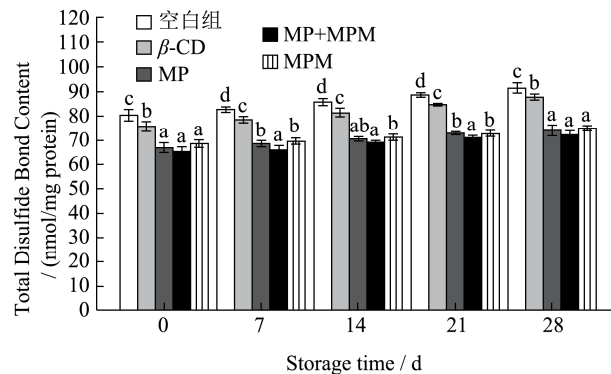


图5 肉脯二硫键在贮藏过程中的变化

Fig.5 Variation of disulfide bond of the dried minced pork slices during storage

半胱氨酸残基上巯基的氧化会导致 SH 和 S-S 数量改变<sup>[20]</sup>,因此,巯基和二硫键的变化被广泛用于蛋

白质氧化程度的表征。图 4、5 描述了肉脯在贮藏过程中巯基和二硫键的变化。可以发现,在贮藏过程中,巯基含量呈现逐渐下降的趋势而二硫键呈上升趋势。空白组的巯基水平最低,从第 0 d 的 57.81 nmol/mg 蛋白质减少到 36.29 nmol/mg 蛋白质,二硫键含量由 79.94 nmol/mg 蛋白质增加至 91.19 nmol/mg 蛋白质。这说明储藏过程中伴随着蛋白质的氧化降解,造成巯基向二硫键的转化。添加桑椹多酚后,样品的巯基含量显著提高,同时二硫键生成量显著降低。该结果说明,桑椹多酚可以有效抑制肉脯中蛋白质氧化,这可能是因为桑椹多酚中的酚羟基竞争性地与过氧自由基反应,从而保护巯基不受破坏,减少了二硫键的生成。与本实验结果相类似的,Wei 等<sup>[35]</sup>发现酚类物质可以维持蛋白质构象(增加氢键,减少二硫键),延缓蛋白质变性和降解,在冷冻过程中,多酚可以用来保持罗非鱼片的质地和延长其货架期。在向荣<sup>[36]</sup>的研究中同样发现,多酚可以延缓广式腊肠中巯基的降低,抑制二硫键的产生。

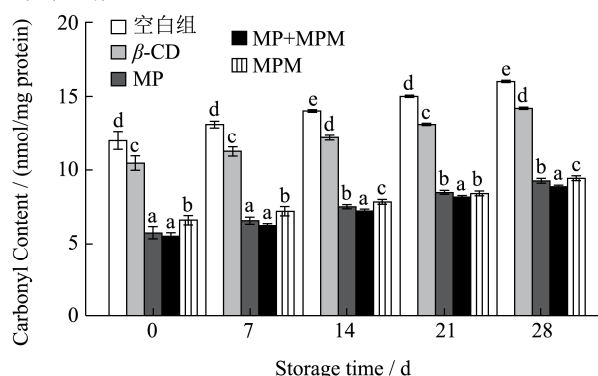


图 6 肉脯羰基值在贮藏过程中的变化

Fig.6 Carbonyl content variation of the dried minced pork slice during storage

如图 6 所示,与肉脯贮藏期巯基和二硫键变化得出的结论相似,MP 和 MPM 的添加抑制了肉脯中羰基含量的增加,减缓了肉脯中的蛋白质氧化。张慧芸等<sup>[37]</sup>发现,添加 0.05%鞣酸和 0.25%没食子酸,可显著抑制肌原纤维蛋白羰基和二聚酪氨酸含量的增加。与本研究结果相似,Xiang 等<sup>[38]</sup>的研究中也指出桑椹多酚可以较好的抑制腊肠中蛋白质的氧化。由于  $\beta$ -CD 的屏障作用,单纯添加 MPM 组的肉脯抑制氧化效果略低于 MP 组。此外,酚类物质与蛋白质的相互作用,对蛋白质结构的修饰作用也是造成肉脯蛋白质氧化稳定性提高的重要原因。Cheng 等<sup>[39]</sup>研究中发现,桑椹多酚与肌原纤维蛋白相互作用,有助于提高蛋白质的结构稳定性和氧化稳定性。与脂质氧化结果相似,以 MPM 部分替代 MP 加入肉脯中可进一步改善肉脯的蛋白质氧化稳定性。这可能与  $\beta$ -环糊精自身的抗氧化

性有关(添加  $\beta$ -环糊精的样品羰基化程度也弱于对照组),但更重要的是微胶囊实现了多酚的缓释,提高了酚类物质的稳定性。一方面未被包埋的酚类物质凭借其酚羟基捕捉自由基和螯合金属离子的形式抑制蛋白质的氧化,造成酚类物质的氧化损失;与此同时,被包埋的酚类物质被缓慢释放,弥补了游离酚类物质的损失。

### 3 结论

本研究探讨了  $\beta$ -环糊精作为多酚保护剂在改善桑椹肉脯品质中的作用。研究结果发现  $\beta$ -环糊精可以有效提高肉脯加工和储藏过程中酚类物质的稳定性,缓解酚类物质对肉脯色泽带来的不利影响。以  $\beta$ -环糊精作为壁材制备桑椹多酚微胶囊(MPM),用于肉脯加工,可以进一步改善肉脯的质构和氧化稳定性,提高产品的抗氧化活性。其中,以 MPM 部分替代 MP 制作的肉脯抗氧化活性和氧化稳定性最佳。由于桑椹多酚的成分较为复杂, $\beta$ -环糊精与桑椹多酚间的相互作用在肉脯氧化稳定性提升中发挥的作用机制还有待进一步研究。

### 参考文献

- [1] 姚芳,刘靖,褚洁明,等.抗氧化剂对猪肉脯抗氧化性能的影响研究[J].食品工业科技,2009,2:105-107  
YAO Fang, LIU Jing, CHU Jieming, et al. Effects of antioxidants on the antioxidant activity of pork jerky [J]. Science and Technology of Food Industry, 2009, 2: 105-107
- [2] 王军,王忠合,林乔仪,等.壳聚糖-葡萄糖美拉德反应修饰产物的抗氧化性及其对猪肉脯色泽和贮藏性的影响[J].食品科技,2018,43(8):258-262  
WANG Jun, WANG Zhonghe, LIN Qiaoyi, et al. Antioxidative properties of chitosan-glucose Maillard reaction products and its effect on color and shelf-life of dried pork slice [J]. Food Science and Technology, 2018, 43(8): 258-262
- [3] Hasler C M. The changing face of functional foods [J]. Journal of the American College of Nutrition, 2000, 19(5 Suppl): 499S-506S
- [4] Pereira L F S, Inácio M L C, Pereira R C, et al. Prevalência de aditivos em alimentos industrializados comercializados em uma cidade do sul de minas gerais/prevalence of additives in processed food marketed in a south city of minas gerais [J]. Health Sciences Journal, 2015, 5(3): 46-52
- [5] Lajolo F. Alimentos funcionais: aspectos científicos e normativos [J]. Dieta e Saúde, 2002: 8
- [6] Ribeiro J S, Santos M J M C, Silva L K R, et al. Natural



- antioxidants used in meat products: a brief review [J]. Meat Science, 2018, 148: 181-188
- [7] Khalifa I, Zhu W, Li K K, et al. Polyphenols of mulberry fruits as multifaceted compounds: compositions, metabolism, health benefits, and stability - a structural review [J]. Journal of Functional Foods, 2018, 40: 28-43
- [8] Jingrong C, Liang X, Rong X, et al. Effects of mulberry polyphenols on oxidation stability of sarcoplasmic and myofibrillar proteins in dried minced pork slices during processing and storage [J]. Meat Science, 2020, 160: 107973
- [9] Jingrong C, Xueming Liu, Wei Z, et al. Stability of phenolic compounds and antioxidant capacity of concentrated mulberry juice-enriched dried-minced pork slices during preparation and storage [J]. Food Control, 2018, 89: 187-195
- [10] Liang X, Jingrong C, Xueming Liu, et al. Effect of microencapsulated process on stability of mulberry polyphenol and oxidation property of dried minced pork slices during heat processing and storage [J]. LWT, 2019, 100: 62-68
- [11] 陈程莉.黑枸杞花青素提取及微胶囊制备研究[D].重庆:西南大学,2020  
CHEN Chengli. Extraction and microcapsule preparation of anthocyanin from *Lycium ruthenicum* murr [D]. Chongqing: Southwest University, 2020
- [12] Liu X, Xiao G, Chen W, et al. Quantification and purification of mulberry anthocyanins with macroporous resins [J]. Journal of Biomedicine & Biotechnology, 2007, 2004(5): 326
- [13] Xu L, Zhu M J, Liu X M, et al. Inhibitory effect of mulberry (*Morus alba*) polyphenol on the lipid and protein oxidation of dried minced pork slices during heat processing and storage [J]. LWT, 2018, 91: 222-228
- [14] Stojadinovic M, Radosavljevic J, Ognjenovic J, et al. Binding affinity between dietary polyphenols and  $\beta$ -lactoglobulin negatively correlates with the protein susceptibility to digestion and total antioxidant activity of complexes formed [J]. Food Chemistry, 2013, 136(3-4): 1263-1271
- [15] Lee Y, Hwang K T. Changes in physicochemical properties of mulberry fruits (*Morus alba* L.) during ripening [J]. Scientia Horticulturae, 2017, 217: 189-196
- [16] Zhang L, Lin Y H, Leng X J, et al. Effect of sage (*Salvia officinalis*) on the oxidative stability of Chinese-style sausage during refrigerated storage [J]. Meat Science, 2013, 95(2): 145-150
- [17] GB 5009.227-2016,食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定[S]  
GB 5009.227-2016. National Food Safety Standard - Determination of peroxide value in food [S]
- [18] Georgiou C D, Zisimopoulos D, Argyropoulou V, et al. Protein and cell wall polysaccharide carbonyl determination by a neutral pH 2,4-dinitrophenylhydrazine-based photometric assay [J]. Redox Biology, 2018, 17: 128-142
- [19] Sedlak J, Lindsay R H. Estimation of total, protein-bound, and nonprotein sulfhydryl groups in tissue with Ellman's reagent [J]. Analytical Biochemistry, 1968, 25(1): 192-205
- [20] Cui C, Zhou X, Zhao M, et al. Effect of thermal treatment on the enzymatic hydrolysis of chicken proteins [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2009, 10(1): 37-41
- [21] 沈海民,纪红兵,武宏科,等. $\beta$ -环糊精的固载及其应用最新研究进展[J].有机化学,2014,34(8):1549-1572  
SHEN Haimin, JI Hongbing, WU Hongke, et al. Recent advances in the immobilization of  $\beta$ -cyclodextrin and their application [J]. Chinese Journal of Organic Chemistry, 2014, 34(8): 1549-1572
- [22] Wang Y, Li M F, Wang L, et al. Improvement of the stabilities and antioxidant activities of polyphenols from the leaves of Chinese star anise (*Illicium verum* Hook. f.) using  $\beta$ -cyclodextrin-based metal-organic frameworks [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(1): 287-296
- [23] Jakobek L. Interactions of polyphenols with carbohydrates, lipids and proteins [J]. Food Chemistry, 2015, 175: 556-567
- [24] Mirjana B Pešić, Danijel D Milinčić, Aleksandar Ž Kostić, et al. *In vitro* digestion of meat- and cereal-based food matrix enriched with grape extracts: how are polyphenol composition, bioaccessibility and antioxidant activity affected? [J]. Food Chemistry, 2019, 284: 28-44
- [25] Zhaoming W, Juncai T, Hui Z, et al. A comprehensive insight into the effects of microbial spoilage, myoglobin autoxidation, lipid oxidation, and protein oxidation on the discoloration of rabbit meat during retail display [J]. Meat Science, 2021, 172: 108359
- [26] 徐亮.桑椹多酚对猪肉脯品质改良及其机理研究[D].广州:华南理工大学,2019  
XU Liang. Studies on quality improvement and mechanism of mulberry polyphenol on dried minced pork slices [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019
- [27] Ganhao R, Morcuende D, Estevez M. Protein oxidation in emulsified cooked burger patties with added fruit extracts: influence on colour and texture deterioration during chill storage [J]. Meat Science, 2010, 85(3): 402-409
- [28] 方辉.西式熏煮火腿贮藏品质及货架期预测模型研究[D].长春:吉林大学,2020

- FANG Hui. Prediction model of storage quality and shelf life of western-style smoked ham [D]. Changchun: Jilin University, 2020
- [29] Arun K, Das, Vincent, et al. Antioxidant efficacy of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) pericarp extract in sheep meat nuggets [J]. *Antioxidants* (Basel), 2016, 5(2): 16
- [30] Li W, Zhang X, He Z, et al. *In vitro* and *in vivo* antioxidant activity of eucalyptus leaf polyphenols extract and its effect on chicken meat quality and cecum microbiota [J]. *Food Research International*, 2020, 136: 109302
- [31] 胡方斌. PLGA载虾青素纳米粒的优化制备及其对HaCaT细胞光损伤保护作用的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019
- HU Fangbin. Study on optimization of PLGA nanoparticles loaded with astaxanthin and evaluation of anti-photodamage effect *in vitro* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019
- [32] Yang X, Yang L, Zheng H. Hypolipidemic and antioxidant effects of mulberry (*Morus alba* L.) fruit in hyperlipidaemia rats [J]. *Food & Chemical Toxicology*, 2010, 48(8-9): 2374-2379
- [33] Jongberg S, Tørngren M A, Gunvig A, et al. Effect of green tea or rosemary extract on protein oxidation in Bologna type sausages prepared from oxidatively stressed pork [J]. *Meat Science*, 2013, 93(3): 538-546
- [34] 姚波. 茶黄素和脂溶性茶多酚对加工肉制品的抗氧化护色作用[D]. 杭州: 浙江大学, 2016
- YAO Bo. Antioxidant and color-protecting effect of theaflavins and lipid-soluble tea polyphenols on processed [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016
- [35] Wei P, Zhu K, Cao J, et al. The inhibition mechanism of the texture deterioration of tilapia fillets during partial freezing after treatment with polyphenols [J]. *Food Chemistry*, 2020, 335: 127647
- [36] 向荣. 桑椹多酚对广式腊肠品质及其蛋白质氧化调控机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020
- XIANG Rong. Studies on the mechanism of mulberry polyphenols on the quality and protein oxidation of Cantonese sausage [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019
- [37] 张慧芸, 吴静娟, 郭新宇. 多酚对猪肉肌原纤维蛋白氧化和凝胶特性的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(21): 43-47
- ZHANG Huiyun, WU Jingjuan, GUO Xinyu. Effect of polyphenols on the oxidation and gel properties of pork myofibrillar protein [J]. *Food Science*, 2016, 37(21): 43-47
- [38] Xiang R, Cheng J, Zhu M, et al. Effect of mulberry (*Morus alba*) polyphenols as antioxidant on physicochemical properties, oxidation and bio-safety in Cantonese sausages [J]. *LWT*, 2019, 116: 108504
- [39] Jingrong C, Mingjun Z, Xueming L. Insight into the conformational and functional properties of myofibrillar protein modified by mulberry polyphenols [J]. *Food Chemistry*, 2020, 308: 125592

---

(上接第 32 页)

- [24] 云少君, 李晨光, 冯翠萍, 等. 巴氏蘑菇多糖对巨噬细胞 RAW264.7 免疫活性的影响[J]. *中国食品学报*, 2015, 15(8): 32-36
- YUN Shaojun, LI Chengguang, FENG Cuiping, et al. Effect of *Pasteurella* mushroom polysaccharide on the immune activity of macrophage RAW264.7 [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2015, 15(8): 32-36
- [25] 董瑛, 施英, 沈建平. 香菇多糖联合 GP 化疗方案治疗晚期非小细胞肺癌近期疗效及对外周血促炎性细胞因子 IL-1 $\beta$ 、IL-6 和 TNF- $\alpha$  表达的影响[J]. *中国现代医生*, 2017, 55(3): 18-21
- DONG Ying, SHI Ying, SHEN Jianping. Recent efficacy of lentinan combined with GP chemotherapy in the treatment of advanced non-small cell lung cancer and on the expression of proinflammatory cytokines IL-1 $\beta$ , IL-6 and TNF- $\alpha$  in peripheral blood [J]. *China Modern Doctor*, 2017, 55(3): 18-21
- [26] 欧阳学农, 余宗阳, 王文武, 等. 香菇多糖抗炎作用的实验研究[J]. *军医进修学院学报*, 2006, 27(1): 56-57
- OUYANG Xuenong, YU Zongyang, WANG Wenwu, et al. Experimental study on anti-inflammatory effect of lentinan [J]. *Academic Journal of Chinese PLA Medical School*, 2006, 27(1): 56-57